

Вольфрамовый цементированный карбид
Комплексное исследование физических и химических
свойств, процессов и приложений (XIV)

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Мировой лидер в области интеллектуального производства для вольфрамовой,
молибденовой и редкоземельной промышленности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD – дочерняя компания, полностью принадлежащая компании и имеющая независимую правосубъектность, созданная CHINATUNGSTEN ONLINE, – занимается продвижением интеллектуального, интегрированного и гибкого проектирования и производства вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета. CHINATUNGSTEN ONLINE, основанная в 1997 году с www.chinatungsten.com – первым в Китае веб-сайтом, посвященным вольфрамовой продукции, – является новаторской в стране компанией в сфере электронной коммерции, специализирующейся на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Используя почти три десятилетия обширного опыта в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP унаследовала исключительные проектные и производственные возможности своей материнской компании, превосходное обслуживание и международную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области вольфрамовых химикатов, вольфрамовых металлов, твердых сплавов, сплавов высокой плотности, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет компания CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов, посвященных вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков. На сайте размещено более миллиона страниц новостей, цен и анализа рынка вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов. С 2013 года в официальном аккаунте компании в WeChat «CHINATUNGSTEN ONLINE» было опубликовано более 40 000 информационных материалов, что позволило привлечь почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставлять бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря миллиардам посещений веб-сайта и официального аккаунта, компания стала признанным глобальным и авторитетным информационным центром для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной отраслей, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, информацию о характеристиках продукции, рыночных ценах и тенденциях рынка.

Опираясь на технологии и опыт CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологии искусственного интеллекта (ИИ), компания совместно с клиентами разрабатывает и производит изделия из вольфрама и молибдена с заданным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Компания предлагает комплексные интегрированные услуги, охватывающие весь процесс: от вскрытия пресс-формы и опытного производства до финишной обработки, упаковки и логистики. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству более 500 000 видов изделий из вольфрама и молибдена более чем 130 000 клиентам по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP продолжает углублять интеллектуальное производство и комплексные инновации в области вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного интернета.

Доктор Ханис и его команда в CTIA GROUP, основываясь на более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и опубликовали знания, технологии, анализ цен на вольфрам и рыночных тенденций, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Доктор Хан, имеющий более чем 30-летний опыт работы с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве твердых сплавов и высокоплотных сплавов, является признанным экспертом в области вольфрамовой и молибденовой продукции как на внутреннем, так и на международном уровне. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и высококачественной информации для отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов рынка, завоевывая широкое признание в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства и информационных услуг в области продукции из вольфрама и молибдена.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP® | Прогрессивные технологии, умное будущее

Мировой лидер в области цифровых и интеллектуальных услуг для вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности

Индивидуальная обработка твердосплавных сопел

Твердосплавные сопла обладают износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой термостойкостью и длительным сроком службы. Они широко используются в пескоструйной обработке, распылении, гидроабразивной резке, бурении нефтяных скважин, химической промышленности, сельском хозяйстве, пищевой промышленности и других областях.

Основные характеристики твердосплавных сопел

Твердость: HRA 88 - 92; Точность : допуск отверстия сопла ±0,001 мм, шероховатость поверхности Ra 0,10,4 мкм .

Адаптивность: термостойкость 800 - 1000°C, коррозионная стойкость pH 210.

Эффективность: обеспечивает впрыск под высоким давлением (0,1500 МПа), при этом эффективность увеличивается на 20–50%.

Срок службы: Отличная износостойкость, срок службы в 515 раз превышает срок службы обычных материалов.

Изготовление на заказ: различные типы (пескоструйная обработка, распыление, производство сухого молока и т.д.), подходящие для различных условий работы.

Основные типы твердосплавных сопел

тип	описывать	Основные области применения и сценарии применения	Типичные характеристики мм
Пескоструйное сопло Пескоструйное сопло	Высокая износостойкость, абразивоструйная обработка	Удаление ржавчины с кораблей, снятие заусенцев с деталей автомобилей и очистка бетона.	Диаметр сопла 2 - 12, длина 50 - 200
Водоструйное сопло Водоструйное сопло	Гидроструя высокого давления, резка твердых материалов	Резка титана в аэрокосмической промышленности, резка композитных материалов в автомобильной промышленности, обработка камня.	Диаметр сопла 0,12, длина 20-100 ,
Распылительная насадка Сопло для распыления покрытия	Точное распыление краски или керамических покрытий	Покрытие лопаток турбин, покрытие двигателей, напыление электронных плат.	Диаметр сопла 0,55, длина 30-150 ,
Нефтепромысловые насадки Насадка для нефтяного месторождения	Высокая устойчивость к давлению, коррозионная стойкость, гидромониторное бурение	Закачка бурового раствора, очистка скважин, закачка бурового раствора.	Диаметр сопла 3 - 15, длина 50 - 150,
Распылительная насадка Распылительная насадка	Тонкое распыление, дисперсия жидкости	Распыление сельскохозяйственных пестицидов, распыление химических жидкостей, очистка отходящих газов в окружающей среде.	Диаметр сопла 0,23, длина 20-100 ,
Сопло сгорания Сопло горелки	Конструкция, устойчивая к высоким температурам,	Сжигание в энергетическом котле, химическая высокотемпературная реакция, инжекция в	Диаметр сопла 1 - 10, длина 30 - 120,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	впрыск топлива или газа	металлургическую печь.	
Микросопло Микросопло	Сверхмаленькое отверстие сопла, высокоточный впрыск	Медицинский лекарственный спрей, очистка электронных чипов, прецизионное авиационное покрытие.	Диаметр сопла 0,05 - 0,5, длина 10 - 50
Коррозионнотойкие насадки Коррозионнотойкое сопло	Устойчив к воздействию сильных кислот, щелочей и химических сред	Закачка химических растворов кислот и щелочей, десульфурация и денитрификация в целях защиты окружающей среды, закачка морской воды в морских условиях.	Диаметр сопла 1 - 10, длина 30 - 150,
Насадка для производства сухого молока Распылительная насадка для сухого молока	Специально разработан для распылительной сушки с целью равномерного распыления эмульсий.	Переработка пищевых продуктов, производство сухого молока, переработка сельскохозяйственной молочной продукции в соответствии со стандартами FDA/EU для контакта с пищевыми продуктами.	Диаметр сопла — 0,53 мм. Длина 20100 мм,

CTIA GROUP LTD
3-й этаж, № 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Сямынь, 361008
ТЕЛ.: 05925129595 18750234579 Электронная почта: info@ctia.group



CTIA GROUP LTD

Индивидуальная обработка твердосплавных штампов

Твердосплавные штампы обладают износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой термостойкостью и длительным сроком службы. Они широко используются в автомобилестроении, производстве электронных компонентов, производстве метизов, аэрокосмической промышленности, медицинском оборудовании и других областях.

Основные характеристики твердосплавных штампов

Твердость: HRA 8892. Точность: допуск формы $\pm 0,001$ мм, шероховатость поверхности Ra 0,1 - 0,4 мкм .

Адаптивность: термостойкость 800 - 1000°C, коррозионная стойкость pH 210.

Эффективность: поддерживает высокочастотную штамповку, эффективность которой увеличивается на 2050%.

Срок службы: Отличная износостойкость, срок службы в 515 раз превышает срок службы обычных форм.

Изготовление на заказ: Различные типы (вытяжной штамп, пробивной штамп, составной штамп и т. д.), подходящие для различных условий работы.

Основные типы твердосплавных штампов

тип	описывать	Основные области применения и сценарии применения	Типичные характеристики
Растягивающаяся матрица Вытяжной штамп	Высокая износостойкость, подходит для формовки металла вытяжкой.	Растяжка кузовных панелей автомобилей, металлических контейнеров и корпусов из алюминиевого сплава.	Диаметр штампа составляет 10200 мм, толщина — 20100 мм, срок службы — 502 млн пробивок.
Вырубной штамп Вырубной штамп	Высокоточная пробивка, подходит для резки тонких пластин.	Штамповка выводных рамок электронных компонентов, автомобильных деталей и комплектующих.	Зазор штампа составляет 0,010,1 мм, толщина — 1580 мм, срок службы — 301,5 млн штамповок.
Составная форма Составной штамп	Интегрированная многоэтапная штамповка, подходящая для сложных деталей.	Соединители для аэрокосмической техники, детали медицинского оборудования и прецизионная обработка композитных материалов.	Диаметр штампа составляет 20150 мм, толщина — 20100 мм, срок службы — 401,8 млн пробивок.
Нефтепромысловые штампы Нефтепромысловый штамп	Высокая стойкость к давлению и коррозии, подходит для штамповки под большими нагрузками.	Детали оборудования для бурения нефтяных скважин, комплектующие для трубопроводов природного газа, детали горнодобывающей техники.	Диаметр штампа составляет 30200 мм, толщина — 30120 мм, срок службы — 301,2 млн штамповок.
Высокоскоростной штамповочный штамп	Конструкция устойчива к высоким температурам и высоким частотам, подходит для быстрой штамповки.	Автомобильные крепежные элементы, электронные разъемы, непрерывные высокоскоростные штамповочные линии.	Диаметр штампа составляет 10100 мм, толщина — 1580 мм, ресурс работы — 602,5 млн штамповок .
Модель для тяжелой	Высокопрочная конструкция,	Штамповка толстолистовых деталей из	Диаметр штампа составляет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нагрузки HeavyDuty Die	подходящая для штамповки толстых пластин.	тяжелого судоконструкций и строительного оборудования.	машиностроения, мм, срок службы — 301,2 млн штамповок.
Микроформа Микро-матрица	Сверхмалый размер, подходящий для высокоточной микроштамповки.	Микродетали для медицинских приборов, микроразъемы для электроники и компоненты для авиационных датчиков.	Диаметр штампа составляет 550 мм, толщина — 1040 мм, срок службы — 20,8 млн штамповок .
Коррозионнотойкая форма Коррозионнотойкий штамп	Устойчив к воздействию сильных кислот и щелочей, пригоден для штамповки в химических средах.	Детали химического оборудования, принадлежности для морской техники и штамповка коррозионных материалов.	Диаметр штампа составляет 15150 мм, толщина — 2080 мм, срок службы — 502 млн пробивок.
Пищевая плесень FoodGrade Die	Специально разработано для штамповки деталей, связанных с пищевыми продуктами, в соответствии со стандартами.	Формы для упаковки пищевых продуктов и детали оборудования для переработки молочных продуктов соответствуют стандартам FDA/EU для контакта с пищевыми продуктами.	Диаметр штампа составляет 10100 мм, толщина — 1580 мм, срок службы — 502 млн пробивок.

CTIA GROUP LTD
3-й этаж, № 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008
, 05925129595, 18750234579, электронная почта: info@ctia.group



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

Индивидуальная обработка твердосплавных шариковых шестерен

Твердосплавные шаровидные зубья обладают износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой термостойкостью и длительным сроком службы. Они широко применяются в горнодобывающей промышленности, строительстве туннелей, дорожном фрезеровании, бурении нефтяных скважин, строительстве, добыче угля и других отраслях.

Основные типы твердосплавных шаровидных зубьев

тип	Практическое описание	Основные области применения и сценарии применения	Типичные характеристики мм
Режущий кирка	Высокая износостойкость, резка твердых пород	Добыча угля, прокладка туннелей и разработка твердых пород.	Диаметр зуба 1050, длина 50150
Туннельный зуб	Высокопрочная конструкция для туннельного оборудования	Метро, железнодорожный тоннель, подземные инженерные выработки.	Диаметр зуба 1560 Длина 60180
Фрезерный зуб	Высокочастотная резка, стойкая к высоким температурам, строгание дорог	Техническое обслуживание автомагистралей, фрезерование взлетно-посадочных полос, ремонт городских дорог.	Диаметр зуба 830, длина 40120
Сверлильный зуб	Устойчив к высокому давлению, коррозии и буровым работам.	Бурение нефтяных скважин, разведка природного газа, геологоразведка.	Диаметр зуба 1040, длина 50140
Роторные копающие зубья Роторный копающий зуб	Высокопрочная конструкция, роторное буровое оборудование	Строительство свайных фундаментов, фундаментов мостов, строительство портовых терминалов.	Диаметр зуба 2080, длина 70200
Зуб для добычи угля	Ударопрочная конструкция, добыча угля	Открытые угольные разрезы, подземная добыча угля, углепромывочное оборудование.	Диаметр зуба 1550, длина 50160
Микрозуб	Сверхмалый размер, высокоточная резка	Прецизионная геологоразведка, микробурение, авиационные компоненты.	Диаметр зуба 520, длина 2080
Коррозионностойкие зубы Коррозионностойкий зуб	Высокая стойкость к кислотам и щелочам, резка в коррозионных средах	Разработка месторождений на морском дне, добыча полезных ископаемых, разработка кислых почв.	Диаметр зуба 1050, длина 50150
Тяжелый зуб	Высокопрочная конструкция, сверхтвердый материал	Шахты по добыче твердых пород, добыча железной руды, крупномасштабное дробление.	Диаметр зуба 20100, длина 80220

CTIA GROUP LTD

3-й этаж, № 25, улица Ванхай , Software Park II, Сямынь, 361008
, тел. 05925129595 18750234579

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Электронная почта: info@ctia.group




www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Часть 4: Классификация и области применения твердых сплавов

Глава 14: Новые области применения и многофункциональность твердого сплава

Вольфрамовый карбид — это композиционный материал с высокой твёрдостью, износостойкостью и прочностью, изготовленный методом порошковой металлургии. Твёрдая фаза — карбид вольфрама (WC), связующая фаза — кобальт (Co) или другие металлы (например, никель Ni, хром Cr). Его основные компоненты обычно включают WC (70–94%), Co (6–15%) и т. д. В некоторых сложных составах могут быть добавлены такие элементы, как TiC, TaC или Pt для оптимизации производительности. Благодаря своим превосходным физическим и химическим свойствам твердый сплав стал важным материалом в современной промышленности и новых технологических областях.

14.0 Свойства твердого сплава

Эффективность твердого сплава обусловлена его уникальной микроструктурой и составом:

Высокая твердость

Диапазон твёрдости составляет $1600\text{--}2500\text{ HV} \pm 30$. Благодаря высокой твёрдости WC (близкой к алмазу) он сохраняет отличную стойкость к деформациям при высоких температурах (до $1000\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$).

Отличная износостойкость

Скорость износа составляет $<0,05\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Износостойкость материала в 10–

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

20 раз выше, чем у стали, что делает его пригодным для использования в высокоабразивных средах, таких как режущие инструменты и абразивная обработка.

Электропроводность

Удельное сопротивление составляет $<10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, что близко к сопротивлению металлических проводников и подходит для электронных приложений, особенно в сценариях, где требуется эффективное рассеивание тепла.

Биосовместимость

Выживаемость клеток составляет $>95\% \pm 2\%$ и может использоваться для имплантации *in vivo* после обработки поверхности, демонстрируя низкую токсичность и хорошую совместимость с тканями.

Каталитическая эффективность

При токе MOR (реакция окисления метанола) $>450 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$ катализаторы на основе WC хорошо работают в топливных элементах, приближаясь по каталитической эффективности к драгоценному металлу Pt.

Термическая стабильность

Он сохраняет структурную целостность при температуре $800 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и имеет низкий коэффициент теплового расширения (примерно $5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$), что делает его пригодным для высокотемпературной обработки и устройств хранения энергии.

Механическая прочность

Прочность на изгиб $600\text{-}2000 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, твердость и вязкость балансируются регулированием содержания Co.

Характеристики твердого сплава были значительно улучшены благодаря оптимизации состава (например, добавление Co $6\text{-}15 \pm 1\%$ для контроля прочности, Pt $0,5\text{-}2 \pm 0,1\%$ для повышения каталитической активности), модификации поверхности (например, нанесение PVD/CVD покрытия толщиной $15 \pm 0,1 \text{ мкм}$ для повышения коррозионной стойкости) и передовым производственным процессам (например, селективное лазерное плавление SLM, мощность лазера $200\text{-}400 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$). Например, проводимость увеличилась примерно на $20 \pm 3\%$, каталитическая эффективность – примерно на $30 \pm 5\%$, а пористость снизилась до $<2 \pm 0,1\%$, что заложило основу для многофункционального применения.

14.0 Многофункциональное применение твердого сплава

Твердый сплав показал свою универсальность в новых областях. Благодаря своим превосходным характеристикам (высокая твердость $\text{HV } 1600\text{-}2000 \pm 30$, прочность на сжатие $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, удельное электропроводность $< 10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, коррозионная стойкость скорость коррозии $< 0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) он широко используется в передовых областях, таких как электроника, биомедицина, каталитическое накопление энергии и аддитивное производство. Кроме того, основываясь на полном сетевом поиске и последних тенденциях в отрасли, многофункциональное применение твердого сплава расширилось на большее количество областей, включая, но не ограничиваясь следующими аспектами. Эта глава начинается с пяти аспектов, систематически анализируя

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тенденции его применения и развития, а также предоставляя теоретическую и практическую основу для последующих разделов.

Электронные и токопроводящие детали из твердого сплава

Высокая электропроводность и термическая стабильность твердого сплава (выдерживает температуры до $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) делают его идеальным выбором для электронных форм, теплоотводящих подложек и электрических контактных материалов, особенно в корпусировании полупроводников (выводные рамки микросхем), оборудовании 5G (высокочастотные антенные кронштейны) и разъемах аккумуляторных батарей электромобилей. Согласно онлайн-данным, твердый сплав (такой как WC-Ni) используется в инструментах для обработки микроэлектроники и сверлах для печатных плат сверхвысокой плотности благодаря своему низкому удельному сопротивлению ($<8\text{ мкОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мкОм}\cdot\text{см}$) и превосходной стойкости к окислению ($<0,01\% \pm 0,001\%$), что соответствует высоким требованиям к точности и долговечности базовых станций 5G (скорость передачи данных $>10\text{ Гбит/с} \pm 1\text{ Гбит/с}$) и квантовых вычислительных устройств (рабочая температура $<4\text{ К} \pm 0,5\text{ К}$). Кроме того, композиты на основе WC в сочетании с графеном ($0,2\text{--}1 \pm 0,01\%$) обладают повышенной проводимостью ($>150\text{ См/см} \pm 5\text{ См/см}$) и находят применение в гибкой электронике (например, носимые датчики, гибкость $>90 \pm 2\%$) и электромагнитном экранировании (эффективность экранирования $>90\text{ дБ} \pm 2\text{ дБ}$).

Биомедицинское применение твердого сплава

Биосовместимость (цитотоксичность $<5\% \pm 1\%$), износостойкость (скорость износа $<0,05\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$) и высокая твердость твердого сплава способствуют разработке имплантатов (таких как протезы тазобедренного и коленного суставов) и хирургических инструментов (таких как костные пилы и сверла) в сочетании с технологией модификации поверхности (такой как покрытие гидроксиапатитом толщиной $5\text{--}10\text{ нм} \pm 0,1\text{ нм}$) для удовлетворения требований к высокой точности ($<0,1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$) и долговременной стабильности ($>10\text{ лет} \pm 1\text{ год}$) медицинских устройств. Согласно онлайн-данным, WC-Co все чаще используется в дентальных имплантатах (степень интеграции кости $>95\% \pm 2\%$) и фиксаторах позвоночника (усталостная прочность $>1200\text{ МПа} \pm 50\text{ МПа}$), а азотирование поверхности (содержание N $1\%\text{--}2\% \pm 0,1\%$) улучшает антибактериальные свойства (степень антибактериальной защиты $>90\% \pm 2\%$). Кроме того, материалы на основе WC продемонстрировали потенциал в биосенсорах (чувствительность $>10^3 \pm 10^2$) и каркасах для тканевой инженерии (пористость $20\%\text{--}30\% \pm 1\%$) благодаря своей высокой удельной площади поверхности ($>50\text{ м}^2/\text{г} \pm 5\text{ м}^2/\text{г}$) и биоактивности (степень прикрепления клеток $>85\% \pm 2\%$).

Катализ и накопление энергии в твердом сплаве

Каталитические характеристики композитов WC-Pt (ток MOR $>450\text{ мА/см}^2 \pm 10\text{ мА/см}^2$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

превосходны в топливных элементах (плотность мощности $>1 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$) и электролизерах (производство водорода $>1 \text{ л/мин} \pm 0,1 \text{ л/мин}$), способствуя развитию технологий чистой энергии, особенно в водородной экономике (мировой рынок >200 млрд долл. США ± 20 млрд долл. США, 2025 г.) с большим потенциалом. Данные исследований показывают, что материалы на основе карбида вольфрама (WC) применяются в суперконденсаторах (удельная емкость $>200 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$), анодах литий-ионных аккумуляторов (удельная емкость $>500 \text{ мАч/г} \pm 50 \text{ мАч/г}$) и электролизе воды для производства водорода (ток OER $>300 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$), а легирование WC-Mo (Mo $1\%-3\% \pm 0,1\%$) повышает эффективность OER (ток $>350 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$). Кроме того, каталитическая активность материалов на основе карбида вольфрама (WC) в восстановлении CO_2 (степень конверсии $>80\% \pm 2\%$) и синтезе аммиака (выход $>100 \text{ мг/ч} \cdot \text{г} \pm 10 \text{ мг/ч} \cdot \text{г}$) привлекла внимание из-за их многофазной структуры и высокой стабильности (стойкость к коррозии $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), что соответствует цели углеродной нейтральности (нулевые чистые выбросы в 2040 ± 5 лет).

Аддитивное производство твердого сплава

Благодаря таким технологиям 3D-печати, как SLM и Binder Jetting, из твердого сплава можно изготавливать изделия сложной геометрической формы по индивидуальному заказу (точность $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), что используется в аэрокосмической промышленности (турбинные лопатки, высокая термостойкость $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), производстве пресс-форм (износостойкие штамповочные формы, срок службы $>10^6 \pm 10^4$ раз) и энергетическом оборудовании (высокотемпературные клапаны, давление $>500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), что значительно повышает гибкость производства (скорость печати $>100 \text{ мм}^3/\text{с} \pm 10 \text{ мм}^3/\text{с}$). Согласно информации по всей сети, технологии DED и EBM используются для ремонта крупных конструкционных деталей (прочность интерфейса $>800 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и производства градиентных материалов (содержание Co $6-15\% \pm 1\%$ градиента изменения), а прочность на разрыв композитных материалов WC-TiC в условиях высоких температур ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) составляет $>1300 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$. Аддитивное производство также распространилось на микро- и наноустройства (размер элемента $<10 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) и биопечать (пористость матрикса $20-40\% \pm 1\%$), способствуя развитию персонализированной медицины и проектирования облегченных конструкций.

Твердый сплав для оборонных и экстремальных условий эксплуатации

Твердые сплавы находят всё большее применение в обороне и экстремальных условиях. WC-Co используется в бронебойных боеголовках (глубина проникновения $>500 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$) и баллистической броне (уровень защиты NIJ IV ± 1) благодаря высокой твердости (HV 1800 ± 30) и ударопрочности (ударная вязкость $>20 \text{ Дж/см}^2 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$). Композиты WC-TiC-WN сохраняют структурную целостность (остаточная деформация $<0,1\% \pm 0,01\%$) при высоких скоростях деформации ($>10^3 \text{ с}^{-1} \pm 10^2 \text{ с}^{-1}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В глубоководной технике (давление $> 1000 \text{ бар} \pm 100 \text{ бар}$) и космической технике (вакуум $< 10^{-6} \text{ Па} \pm 10^{-7} \text{ Па}$, температура $-150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) материалы на основе карбида вольфрама (WC) используются в качестве уплотнений и теплозащитных покрытий (термостойкость $> 1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) благодаря низкому коэффициенту термического расширения ($5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) и коррозионной стойкости ($< 0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$). Кроме того, WC демонстрирует многофункциональный потенциал в качестве защитного материала и материала мишени в ядерной промышленности (устойчивость к радиации $> 10^6 \text{ Гр} \pm 10^5 \text{ Гр}$) и экспериментах по физике высоких энергий (стабильность пучка частиц $> 99\% \pm 0,5\%$).

Интеллектуальное производство и применение датчиков из твердого сплава

Применение карбида вольфрама в сочетании с интеллектуальными производственными технологиями расширилось до области датчиков и Интернета вещей. Согласно онлайн-данным, материалы на основе WC используются в датчиках давления (чувствительность $> 10^2 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$), датчиках температуры (время отклика $< 0,1 \pm 0,01 \text{ с}$) и вибродатчиках (диапазон частот $10 \text{ Гц} - 10 \text{ кГц} \pm 1 \text{ Гц}$) благодаря их высокой проводимости ($> 100 \pm 5 \text{ См/см}$) и механической стабильности (прочность на сжатие $> 3500 \pm 100 \text{ МПа}$). Интегрированные нанопокртия (например, SiO_2 , толщина $5 - 10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) улучшает адаптируемость к окружающей среде (влажность $50\% - 95\%$ относительной влажности $\pm 5\%$). В условиях «Индустрии 4.0» интеллектуальные инструменты на основе WC (срок самодиагностики $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) могут осуществлять мониторинг в режиме реального времени (точность $\pm 1\%$) с помощью встроенных датчиков, оптимизировать процесс резки (скорость износа инструмента $< 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) и регулировать параметры 3D-печати.

В этой главе будут подробно рассмотрены конкретные случаи применения, технические проблемы и перспективы в этих областях, а также показано, как твердый сплав может удовлетворить все более разнообразные промышленные потребности благодаря своей многофункциональности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



14.1 Электронные и проводящие компоненты из цементированного карбида

В области электроники твердый сплав привлек большое внимание благодаря своей высокой твердости ($HV\ 1800-2200 \pm 30$), низкому удельному сопротивлению ($<10\ \text{мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1\ \text{мкОм} \cdot \text{см}$), отличной теплопроводности ($>100\ \text{Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5\ \text{Вт/м} \cdot \text{К}$) и отличной термической стабильности (рабочая температура может достигать $800\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$). Он в основном используется в пресс-формах и подложках для рассеивания тепла. Пресс-формы используются для упаковки микросхем, прецизионной штамповки и обработки микроэлектронных компонентов со сроком службы до $10^6\ \text{раз} \pm 10^5\ \text{раз}$; Теплоотводящие подложки поддерживают мощные электронные устройства (такие как силовые модули, светодиоды и компоненты базовых станций 5G), с эффективностью рассеивания тепла более $90\% \pm 2\%$ и низким коэффициентом теплового расширения (около $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), что обеспечивает размерную стабильность при термоциклах. Материал в основном основан на системе WC-Co (содержание Co в твердом сплаве составляет $6\%-12\% \pm 1\%$), размер зерна сырья твердого сплава контролируется в пределах $0,5-2\ \text{мкм} \pm 0,01\ \text{мкм}$, а электропроводность и теплопроводность оптимизированы путем легирования Cu ($1\%-5\% \pm 0,5\%$) или Ni ($2\%-8\% \pm 0,5\%$). В некоторые высококачественные формулы добавлена платина ($0,5-2 \pm 0,1\%$) для улучшения каталитических и проводящих свойств. Высокая температура плавления карбида вольфрама (около $2870 \pm 20^\circ\text{C}$) обеспечивает ему превосходную прочность в экстремальных условиях, а его коррозионная стойкость (индекс коррозионной стойкости $>90 \pm 2\%$) достигается благодаря нанесению покрытия методом PVD) расширяет область его применения. В 2025 году, по мере развития электронной промышленности в сторону высоких частот, высокой мощности и миниатюризации, спрос на карбид вольфрама в производстве полупроводников, системах управления питанием электромобилей и интеллектуальных устройствах продолжит расти.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В электронной промышленности твердый сплав широко используется при изготовлении пресс-форм и теплоотсеивающих подложек благодаря своей превосходной твердости (HV 1600-2000 $\pm$ 30), износостойкости (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$), высокой теплопроводности (теплопроводность $> 100 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) и высокой термостойкости (термостойкость $> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Эти характеристики позволяют ему хорошо работать в условиях точной обработки и эффективного рассеивания тепла, особенно в области полупроводников, технологии 5G и электромобилей. С ростом спроса на миниатюризацию и высокоплотную интеграцию электронных устройств перспективы применения твердого сплава в электронной промышленности продолжают расширяться.

14.1.1 Твердосплавные формы для электронной промышленности

Пресс-формы из карбида вольфрама для электронной промышленности используются для прецизионной обработки электронных компонентов. Они должны обладать высокой точностью (отклонение обработки $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), превосходной коррозионной стойкостью (скорость коррозии $< 0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и длительным сроком службы ($> 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$), чтобы соответствовать высоким требованиям производства микроэлектронных устройств. Материал, в основном, представляет собой систему WC-Co (содержание Co 6%-10% $\pm$ 1%), а размер зерна твердого сплава составляет $0,5\text{-}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Для дополнительного повышения износостойкости и стойкости к окислению используются поверхностные покрытия (например, TiN толщиной $5\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) или CrN толщиной $10\text{-}20 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$). Оптимизация формы осуществляется методом горячего изостатического прессования (ГИП, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или лазерной обработки поверхности.

В электронной промышленности твердосплавные пресс-формы стали незаменимым основным инструментом в процессе производства электронных компонентов из-за их превосходной твердости (HV 1600-2000 $\pm$ 30), износостойкости (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$), высокой термостойкости (термостойкость $> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$), превосходной точности и превосходной проводимости и коррозионной стойкости. С быстрым развитием электронной промышленности в сторону ультраминиатюризации, высокой производительности, интеллекта, экологичности и многофункциональности, сценарии применения твердосплавных пресс-форм значительно расширились, и рыночный спрос продолжал расти. Эти пресс-формы быстро обновлялись благодаря непрерывной итерации технологий, оптимизации состава материалов и инновациям передовых производственных процессов (таких как аддитивное производство, прецизионная обработка поверхности и интеллектуальная технология мониторинга), став одной из самых важных и быстрорастущих областей потребления высокого класса в твердосплавной промышленности. Пресс-формы из цементированного карбида широко используются в производстве полупроводников, гибких электронных технологиях, коммуникациях 5G/6G, потребительской электронике, автомобильной электронике для новых источников энергии,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оборудовании Интернета вещей и таких развивающихся областях, как квантовые вычисления и интеллектуальное медицинское оборудование. Ожидается, что объём рынка достигнет 5 млрд долларов США $\pm$ 500 млн долларов США с годовым ростом до 15–20%, что полностью отражает его ключевую роль в содействии технологическому прогрессу и модернизации электронной промышленности.

(1) Штамповочная матрица с твердосплавным выводом

Что такое штамп с твердосплавной рамкой для штамповки?

Штампы для штамповки выводных рамок из карбида – это высокоточные инструменты, разработанные специально для корпусирования полупроводников. Они в основном используются для формовки выводов микросхем, обработки кронштейнов светодиодов, формовки выводов силовых модулей и производства выводов новых микродатчиков. В качестве основного материала используется сплав WC-8Co, а размер зерна строго контролируется на уровне $0,6 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Штампы изготавливаются методом порошковой металлургии и горячего изостатического прессования (ГИП, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), что обеспечивает однородность материала и высокую плотность (пористость $< 0,5\% \pm 0,1\%$). Покрытие TiN (толщина $5\text{-}10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) наносится на поверхность формы с помощью технологии физического осаждения из паровой фазы (PVD), что значительно снижает коэффициент трения ($< 0,2 \pm 0,02$), повышает стойкость к окислению (выдерживает температуру до $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и снижает адгезию, эффективно повышая долговечность (до $1,2 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и точность вырубки ($< 0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$). Благодаря сочетанию лазерной микрообработки, многослойного покрытия (например, TiAlN или TiSiN, толщина $10\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) и технологии адаптивного охлаждения пресс-форма дополнительно оптимизирована для поддержки сверхтонких выводов (ширина $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), высокочастотной стабильности ($> 10 \text{ ГГц} \pm 1 \text{ ГГц}$) и стойкости к термоциклированию (-40°C до $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), а благодаря технологии цифрового двойника достигается мониторинг износа в реальном времени (точность $\pm 1\%$) и оптимизация параметров для удовлетворения потребностей сверхвысокой точности и сверхкрупномасштабного производства.

Производительность штампа с твердосплавной рамкой

Форма имеет высокую твердость (HV 1800 ± 30), отличную износостойкость (износ $< 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокую прочность ($> 1,2 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и чрезвычайно высокую точность штамповки ($< 0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$). Покрытие TiN значительно снижает трение ($< 0,2 \pm 0,02$), улучшает стойкость к окислению (выдерживает до $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и повышает стабильность теплового цикла (от -40°C до $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) за счет многослойного покрытия (например, TiAlN, термостойкость $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и технологии адаптивного охлаждения. Кроме того, интеграция цифрового двойника позволяет прогнозировать износ (погрешность $< 5\% \pm 0,5\%$) и оптимизировать процесс.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Типы твердосплавных выводных рамок для штамповки

Стандартная форма

Основанный на WC-8Co, он подходит для традиционной обработки выводов ИС и кронштейнов светодиодов с точностью $<0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ и долговечностью 1×10^6 раз $\pm 10^4$ раз.

Высокотемпературная форма

Добавление покрытия TiC (5%-10% $\pm 0,5\%$) и TiAlN (10-15 мкм $\pm 0,2$ мкм), термостойкость $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, подходит для силовых модулей, таких как корпуса IGBT.

Ультратонкая форма

Оптимизированный размер зерна ($<0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и лазерная микрообработка обеспечивают ширину выводов $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, что соответствует требованиям 5 нм/3 нм процесса и микросветодиодов.

Интеллектуальная форма

Встроенные датчики и цифровые двойные модули контролируют износ (точность $\pm 1\%$) и корректируют параметры в реальном времени для высокочастотных ($>10 \text{ ГГц} \pm 1 \text{ ГГц}$) приложений.

Применение твердосплавных выводных рамок для штамповки

Штампы для штамповки выводных рамок из карбида широко используются в различных высокотехнологичных областях, особенно играя ключевую роль в полупроводниковой и электронной промышленности. В производстве интегральных схем высокой плотности, таких как изготовление чипов по 5 нм и 3 нм технологическим процессам, штампы обеспечивают сверхвысокую точность и постоянство выводных рамок, поддерживая массовое производство высокопроизводительных процессоров и модулей памяти. В области корпусирования силовых полупроводников штампы используются в производстве модулей IGBT, МОП-транзисторов, а также силовых устройств SiC и GaN для удовлетворения высоких требований к надежности электромобилей, фотоэлектрических преобразователей и промышленных приводов двигателей. Корпусирование микросветодиодов является еще одной важной областью применения. Высокоточная технология штамповки штампов поддерживает производство оптических компонентов для микродисплеев и носимых устройств, улучшая яркость и разрешение дисплеев.

Кроме того, пресс-формы широко используются при производстве новых микродатчиков, включая датчики MEMS (микроэлектромеханические системы), датчики давления и инерциальные измерительные блоки (IMU), обеспечивая ключевую поддержку для интеллектуальных устройств, узлов IoT и медицинской электроники. В области электроники автомобильного класса, особенно при упаковке микросхем автономного вождения, радиолокационных модулей и бортовых вычислительных блоков, термостойкость пресс-формы (-40°C до $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и высокочастотная стабильность ($> 10 \text{ ГГц} \pm 1 \text{ ГГц}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивают долговременную стабильность и безопасность электронных систем. Высокопроизводительные вычислительные микросхемы и квантовые вычислительные устройства также полагаются на возможности сверхтонкой обработки выводов пресс-формы (ширина $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), способствуя разработке ускорителей искусственного интеллекта и схем управления квантовыми битами.

В сфере потребительской электроники пресс-формы позволяют обрабатывать многослойные выводные рамки для смартфонов, планшетов и игровых устройств, повышая тонкость и производительность изделий. В промышленной автоматизации пресс-формы сочетаются с интеллектуальными производственными технологиями для массового производства прецизионных механических деталей и разъемов, оптимизируя эффективность производства (более чем на $20\% \pm 2\%$). Благодаря технологии цифрового двойника пресс-формы обеспечивают прогнозируемое обслуживание и оптимизацию параметров процесса, сокращают время простоя (более чем на $15\% \pm 2\%$) и подходят для экстремальных условий эксплуатации в аэрокосмической электронике (например, в модулях спутниковой связи) и оборонной электронике (например, в системах наведения радаров и ракет), что еще больше расширяет область их применения.

(2) Форма для упаковки карбидной стружки

Что такое пресс-форма для упаковки стружки из карбида?

Пресс-формы для корпусирования микросхем из карбида – это высокоточные инструменты, разработанные специально для корпусирования микроэлектронных устройств, в основном для корпусов BGA (корпус с шариковыми выводами), QFN (корпус с квадратными плоскими выводами без выводов), SIP (корпус с системой в корпусе), 3D-сборки ИС и корпусирования на уровне пластины (WLP). В качестве основного материала используется формула WC-6Co с размером зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Высокая плотность (пористость $< 0,5\% \pm 0,1\%$) достигается благодаря шаровой мельнице и спеканию сверхтонкого порошка, а также сочетается со сложными геометрическими конструкциями (например, ширина микроканалов $0,02\text{--}0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, глубина $0,1 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$, вертикальность боковых стенок $< 1^\circ \pm 0,1^\circ$). Покрытие CrN (толщина $10\text{--}15 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$, с использованием технологии многодуговой ионизации) наносится на поверхность формы, чтобы значительно улучшить коррозионную стойкость (скорость коррозии $< 0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и высокую термостойкость ($> 350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), эффективно продлевая срок службы (примерно в 8×10^5 раз $\pm 10^4$ раз). Сложные структуры (например, внутренние каналы охлаждения) настраиваются путем объединения покрытий PVD (например, AlTiN или ZrN, толщиной $15\text{--}20 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) и технологии аддитивного производства (например, селективное лазерное плавление SLM). Форма дополнительно оптимизирована для поддержки высокой плотности упаковки (> 1000 вводов / выводов ± 50 вводов/выводов), термоциклической нагрузки (> 5000 раз ± 500 раз) и процессов упаковки с низким напряжением. Мониторинг распределения напряжений и изменений температуры в режиме реального времени (точность $\pm 1\%$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

достигается за счет использования интегрированной сенсорной технологии, которая улучшает возможности терморегулирования (теплопроводность $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) и выход годных изделий ($>98\% \pm 1\%$) для удовлетворения требований миниатюризации и высокой надежности.

Производительность пресс-формы для упаковки карбидной стружки

Форма имеет высокую твердость ($\text{HV } 1800 \pm 30$), отличную износостойкость (износ $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокую прочность ($>8 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и чрезвычайно высокую геометрическую точность (ширина микроканала $0,02-0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, вертикальность боковой стенки $<1^\circ \pm 0,1^\circ$). Покрытие CrN значительно снижает скорость коррозии ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и улучшает высокотемпературную стойкость ($>350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), в то время как многослойное покрытие AlTiN или ZrN дополнительно повышает термостойкость (устойчивость к $>5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$, термостойкость $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). Процесс аддитивного производства оптимизирует внутренние каналы охлаждения и улучшает терморегулирование (теплопроводность $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), а интеграция датчиков позволяет осуществлять мониторинг напряжений (погрешность $<5\% \pm 0,5\%$) и оптимизировать процесс.

Типы форм для упаковки стружки из карбида

Стандартная форма

Благодаря покрытию WC-6Co и CrN он подходит для обычных корпусов BGA и QFN с точностью $0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ и долговечностью $8 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$.

Высокотемпературная форма

Добавление TiC ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) и покрытие AlTiN ($15-20 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$), термостойкость $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, подходит для штабелирования SIP и 3D IC.

Миниатюрная форма

Оптимизированные зерна ($<0,4 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и технология SLM для поддержки микроканалов (ширина $<0,02 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) для удовлетворения потребностей WLP и нейроморфных чипов.

Интеллектуальная форма

Встроенные датчики и модули мониторинга в реальном времени оптимизируют распределение напряжений (точность $\pm 1\%$) и управление температурой для высокоплотной упаковки ($>1000 \text{ вводов-выводов} \pm 50 \text{ вводов-выводов}$).

Применение пресс-формы для упаковки стружки из карбида вольфрама

Пресс-формы для корпусирования микросхем из карбида широко используются во многих передовых областях корпусирования микроэлектронных устройств. В высокоплотном корпусировании интегральных схем пресс-формы поддерживают технологии BGA, QFN и WLP, отвечая требованиям высокой точности, предъявляемым к микросхемам с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

технологическим процессом 5 нм и ниже, ускорителям искусственного интеллекта и памяти (точность $<0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$). В 3D-стекировании ИС и SIP (корпус системного уровня) сложная геометрическая конструкция и возможности терморегулирования пресс-формы (теплопроводность $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) способствуют разработке многокристалльных модулей и гетерогенной интеграции, а также широко используются в периферийных вычислительных модулях, высокопроизводительных серверах и оборудовании центров обработки данных.

В сфере потребительской электроники пресс-формы используются для миниатюрной упаковки складных мобильных телефонов и носимых устройств (например, смарт-часов), обеспечивая точность микроканалов (ширина $0,02\text{--}0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) и устойчивость к циклическому нагреву ($> 5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$), повышая надежность и срок службы гибких дисплеев и носимых устройств. Корпусирование нейроморфных чипов и квантовых вычислительных устройств также опирается на сверхточный и низконапряженный процесс изготовления пресс-форм, обеспечивая миниатюрную конструкцию новых вычислительных архитектур.

Автомобильная электроника – ещё одна важная область применения. Пресс-формы позволяют упаковывать микросхемы современных систем помощи водителю (ADAS), радарные модули и бортовые вычислительные блоки, адаптируясь к экстремальным температурам (от -40°C до $150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и высоким требованиям к надёжности (выход годных $> 98\% \pm 1\%$). В промышленной автоматизации пресс-формы используются для упаковки прецизионных датчиков и исполнительных механизмов, повышая производительность и стабильность интеллектуального производственного оборудования. В аэрокосмической (например, спутниковые коммуникационные модули) и оборонной (например, радары и системы наведения ракет) электроники используются коррозионная стойкость пресс-форм ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и высокая температурная стабильность ($>350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) для удовлетворения требований долгосрочного использования в экстремальных условиях.

Благодаря интеграции датчиков и технологии цифрового двойника пресс-форма обеспечивает прогностическое обслуживание (сокращение времени простоя более чем на $15\% \pm 2\%$) и оптимизацию параметров процесса, что делает ее пригодной для массового производства (повышение эффективности более чем на $20\% \pm 2\%$) и сценариев сверхвысокой плотности компоновки (более 1000 операций ввода-вывода ± 50 операций ввода-вывода), что еще больше расширяет потенциал ее применения в будущих технологиях микроэлектроники.

(3) Твердосплавный штамп для пробивки печатных плат

Что такое твердосплавный штамп для пробивки печатных плат ?

Твердосплавные штампы для печатных плат — это высокоточные инструменты, разработанные специально для обработки печатных плат. Они в основном используются для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

многослойных плат, плат с высокой плотностью межсоединений (HDI), гибких печатных плат (FPC), гибко-жестких плат и новых высокочастотных печатных плат миллиметрового диапазона. В качестве основного материала используется сплав WC-TiC-8Co (TiC 3 % $\pm$ 0,5%) с размером зерна 0,8 мкм $\pm$ 0,01 мкм. Его спекают при высокой температуре (1450 °C $\pm$ 10 °C) и подвергают термической обработке для повышения усталостной стойкости при высоких температурах (усталостная долговечность $> 10^7$ раз $\pm 10^5$ раз), а также применяют технологию лазерной наплавки (толщина слоя наплавки 20-30 мкм $\pm$ 0,5 мкм с использованием порошка WC-Co) для восстановления изношенных кромок, гарантируя, что точность штамповки останется $< 0,01$ мм $\pm 0,001$ мм. Форма поддерживает высокоскоростную штамповку (> 100 раз/секунду ± 10 раз/секунду), сложное межслойное выравнивание (отклонение $< 0,005$ мм $\pm 0,001$ мм) и обработку микроотверстий (диаметром 0,1-0,2 мм $\pm 0,005$ мм), а также оптимизирует долговечность ($> 1,5 \times 10^7$ раз $\pm 10^5$ раз) и проводимость (удельное сопротивление < 10 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см) за счет многокомпонентных композитных структур (таких как WC-TiC-TaC или WC-Co-Cr). Кроме того, в пресс-форме используется нанопокрывание (например, WC/C, толщина 5–10 мкм $\pm 0,1$ мкм) для улучшения антиадгезионных характеристик (коэффициент трения $< 0,2 \pm 0,02$), а также бионическая структура (например, сотовая внутренняя поддержка) для повышения ударопрочности (> 500 МПа ± 50 МПа), оптимизация траектории пробивки с помощью алгоритма искусственного интеллекта, сокращение отходов материала ($< 2\% \pm 0,5\%$) и удовлетворение потребностей высокопроизводительной обработки печатных плат.

Производительность штампов для печатных плат из карбида

Форма обладает высокой твердостью (HV 1800 $\pm$ 30), превосходной износостойкостью (износ $< 0,01$ мм³/Н·м $\pm 0,001$ мм³/Н·м), высокой прочностью ($> 1,5 \times 10^7$ раз $\pm 10^5$ раз) и высокой точностью штамповки ($< 0,01$ мм $\pm 0,001$ мм). Технология лазерной наплавки восстанавливает изношенные края и сохраняет точность обработки микроотверстий (диаметр 0,1-0,2 мм $\pm 0,005$ мм), а нанопокрывания (например, WC/C) снижают коэффициент трения ($< 0,2 \pm 0,02$) и повышают стойкость к высокотемпературному окислению ($> 900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). Многокомпонентная композитная структура оптимизирует проводимость (удельное сопротивление < 10 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см), бионическая структура повышает ударопрочность (> 500 МПа ± 50 МПа), а оптимизация алгоритма ИИ сокращает отходы материала ($< 2\% \pm 0,5\%$), что в целом повышает усталостную стойкость при высоких температурах (усталостная долговечность $> 10^7$ раз $\pm 10^5$ раз).

Типы твердосплавных штампов для штамповки печатных плат

Стандартная форма

Сделанный на основе WC-TiC-8Co, он подходит для штамповки многослойных плат и гибких печатных плат с точностью $< 0,01$ мм $\pm 0,001$ мм и износостойкостью 1×10^7 раз $\pm 10^5$ раз.

Высокотемпературная форма

Благодаря добавлению TaC (2–5 $\pm$ 0,5%) и композитной структуры WC-Co-Cr он обладает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термостойкостью $>900\pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и подходит для высокочастотных печатных плат миллиметрового диапазона.

Форма с микроотверстиями

Оптимизировать лазерную наплавку (толщина $20\text{--}30\text{ мкм} \pm 0,5\text{ мкм}$) и обработку микроотверстий (диаметр $< 0,1\text{ мм} \pm 0,005\text{ мм}$) для удовлетворения потребностей плат HDI.

Интеллектуальная форма

Благодаря встроенным алгоритмам искусственного интеллекта и бионическим структурам (сотовая поддержка) он оптимизирует траекторию пробивки (точность $\pm 0,5\%$) и ударопрочность ($>600\text{ МПа} \pm 50\text{ МПа}$) в режиме реального времени.

Применение твердосплавных штампов для штамповки печатных плат

Штампы для пробивки печатных плат из карбида широко используются во многих ключевых областях обработки печатных плат. При производстве многослойных плат и плат HDI (высокоплотных межсоединений) высокоточная пробивка ($< 0,01\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$) и сложное межслойное выравнивание (отклонение $< 0,005\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$) штампов поддерживают требования к высокой плотности разводки смартфонов, планшетов и серверных материнских плат. При обработке гибких печатных плат (FPC) и гибко-жестких плат высокая термостойкость ($>900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и усталостная прочность ($>10^7\text{ раз} \pm 10^5\text{ раз}$) штампов отвечают требованиям миниатюризации складных экранов телефонов, носимых устройств и гибких дисплеев.

Производство новых высокочастотных печатных плат миллиметрового диапазона основано на проводимости пресс-формы (удельное сопротивление $< 10\text{ мОм}\cdot\text{см} \pm 0,1\text{ мОм}\cdot\text{см}$) и возможностях обработки микроотверстий (диаметром $0,1\text{--}0,2\text{ мм} \pm 0,005\text{ мм}$) и широко используется в базовых станциях 5G, антенных модулях и радиолокационных системах. В области автомобильной электроники пресс-формы обеспечивают массовое производство печатных плат систем управления аккумуляторными батареями (BMS), автомобильных развлекательных систем и современных систем помощи водителю (ADAS), адаптируясь к высоким температурам ($>900^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) и высоким требованиям к надежности (выход годных $>98\% \pm 1\%$). При производстве плат управления для умных бытовых приборов используется высокоскоростная штамповка пресс-форм ($>100\text{ раз/секунду} \pm 10\text{ раз/секунду}$) и экономия материала (отходы $< 2\% \pm 0,5\%$) для повышения эффективности производства бытовой техники, такой как умные колонки и стиральные машины.

Платы авионики (например, модули управления полётом и навигационные системы) и оборонная электроника (например, системы наведения ракет и связи) требуют ударопрочности ($>500\text{ МПа} \pm 50\text{ МПа}$) и долговечности ($>1,5\times 10^7\text{ раз} \pm 10^5\text{ раз}$) пресс-форм для долговременной эксплуатации в экстремальных условиях. Развитие устройств Интернета вещей и технологий 6G дополнительно стимулирует применение пресс-форм, особенно для упаковки периферийных вычислительных модулей и сверхвысокочастотных печатных плат. Пресс-формы обеспечивают высокую производительность и низкие затраты на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обслуживание (сокращение времени простоя $> 15\% \pm 2\%$) благодаря оптимизации с помощью искусственного интеллекта и нанопокротию (WC/C), способствуя интеллектуальному и эффективному развитию электронной промышленности будущего.

(4) Штамповка твердосплавных микросоединителей

Что такое штамповочный штамп для твердосплавных микросоединителей ?

Штамп для штамповки микроразъемов из карбида – это высокоточный инструмент, предназначенный для обработки микроразъемов. Он в основном используется для микроразъемов, таких как USB-C, HDMI, Lightning, а также новых высокоскоростных интерфейсов (например, Thunderbolt 5, оптоэлектронный гибридный интерфейс). В качестве основного материала используется сплав WC-10Co с размером зерна $0,4 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Технология литья под давлением ультратонкого порошка обеспечивает однородность материала, точность штамповки $< 0,003 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$ и долговечность $1,5 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$. Покрытие DLC (алмазоподобный углерод) (толщина $2-5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, твердость HV 3000 ± 100) наносится на поверхность формы методом плазменно-химического осаждения из паровой фазы (PECVD), что значительно снижает скорость износа ($< 0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,005 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), улучшает коррозионную стойкость (испытание в соляном тумане > 500 часов ± 50 часов) и смазывающую способность (коэффициент трения $< 0,1 \pm 0,01$). В сочетании с нанопокротием (например, WC/C или aC:H, толщиной $5-15 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) и технологией микроэрозионной обработки форма обеспечивает получение сверхтонких структур (шаг $< 0,015 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), высокую токопроводимость ($> 5 \text{ А} \pm 0,5 \text{ А}$) и стабильность передачи оптического сигнала (потери $< 0,1 \text{ дБ/км} \pm 0,01 \text{ дБ/км}$), а также продлевает срок службы и снижает затраты на техническое обслуживание ($< 5\% \pm 1\%$) за счет самосмазывающихся функций (например, добавок MoS₂), что отвечает требованиям высокопроизводительной обработки разъемов.

Производительность штамповочных штампов с твердосплавными микроразъемами

Форма обладает высокой твердостью (HV 2000 $\pm$ 50), превосходной износостойкостью (износ $< 0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,005 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокой прочностью ($> 1,5 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и сверхвысокой точностью штамповки ($< 0,003 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$). Покрытие DLC улучшает коррозионную стойкость (стойкость к солевому туману $> 500 \pm 50$ часов) и смазывающую способность (коэффициент трения $< 0,1 \pm 0,01$), а нанопокротие (такое как WC/C) дополнительно повышает долговечность ($> 2 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и стойкость к высоким температурам ($> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). Функция самосмазки оптимизирует затраты на техническое обслуживание ($< 5\% \pm 1\%$), а микроэрозионная обработка позволяет создавать сверхтонкие структуры (шаг $< 0,015 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), что отвечает требованиям к передаче больших токов ($> 5 \text{ А} \pm 0,5 \text{ А}$) и оптических сигналов (потери $< 0,1 \text{ дБ/км} \pm 0,01 \text{ дБ/км}$).

Типы твердосплавных штампов для микроразъемов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стандартная форма

На основе WC-10Co и покрытия DLC, подходит для штамповки USB-C и HDMI, точность $<0,003 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$, долговечность $1,5 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$.

Высокоскоростная форма

Добавлено нанопокрытие WC/C ($5-15 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$), поддерживает сильный ток Thunderbolt 5 ($> 5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) и долговечность $> 2 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$.

Фотоэлектрическая форма

Оптимизируйте микро-EDM для достижения стабильности оптического сигнала оптоэлектронного гибридного интерфейса (потери $<0,1 \text{ дБ/км} \pm 0,01 \text{ дБ/км}$) и точности $<0,002 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$.

Самосмазывающаяся форма

Благодаря встроенным добавкам и датчикам MoS₂ он снижает затраты на техническое обслуживание ($<5\% \pm 1\%$) и подходит для использования на высоких частотах ($>10 \text{ ГГц} \pm 1 \text{ ГГц}$).

Применение твердосплавных штампов для микроразъемов

Штампы для штамповки микроразъемов из карбида широко используются в потребительской электронике и центрах обработки данных. В смартфонах, планшетах и ноутбуках штампы обеспечивают массовое производство интерфейсов USB-C, HDMI и Lightning, обеспечивая сверхтонкую структуру (шаг $<0,015 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) и высокоточную штамповку ($<0,003 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$), что повышает надежность и компактность портов устройств. В центрах обработки данных и серверах штампы используются для производства Thunderbolt 5 и высокоскоростных интерфейсов передачи данных, обеспечивая высокую токовую выделенность ($>5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) и скорость передачи данных ($>40 \text{ Гбит/с} \pm 2 \text{ Гбит/с}$).

Разработка новых оптоэлектронных гибридных интерфейсов основана на стабильности передачи оптического сигнала (потери $<0,1 \text{ дБ/км} \pm 0,01 \text{ дБ/км}$) и долговечности ($>1,5 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) пресс-формы, которая широко используется в волоконно-оптическом коммуникационном оборудовании и высокопроизводительных вычислительных кластерах. В автомобильной электронике пресс-форма поддерживает обработку разъемов для автомобильных информационно-развлекательных систем и современных систем помощи водителю (ADAS), адаптируясь к высокотемпературным средам ($>600 \text{ °C} \pm 50 \text{ °C}$) и высоким требованиям к надежности (выход годных $>98\% \pm 1\%$). Устройства для умного дома, такие как умные динамики и маршрутизаторы, также используют высокоскоростную штамповку ($>100 \text{ раз/секунду} \pm 10 \text{ раз/секунду}$) и коррозионную стойкость (стойкость к солевому туману $>500 \text{ часов} \pm 50 \text{ часов}$) пресс-формы для повышения долговечности продукта.

Устройства промышленной автоматизации и Интернета вещей (например, промышленные модули управления и сенсорные узлы) используют смазывающую способность (коэффициент трения $<0,1 \pm 0,01$) и самосмазывающуюся функцию пресс-формы для снижения затрат на техническое обслуживание ($<5\% \pm 1\%$) и оптимизации эффективности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производства (повышение $>20\% \pm 2\%$). В аэрокосмической (например, модули спутниковой связи) и оборонной (например, оборудование для шифрованной связи) электронике ударопрочность ($>500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и долговечность пресс-формы отвечают требованиям долгосрочного использования в экстремальных условиях. Благодаря нанопокрытию и оптимизации с использованием искусственного интеллекта, пресс-форма дополнительно поддерживает разработку будущих высокоскоростных интерфейсов (например, 6G-связи) и миниатюрных разъемов, способствуя повышению эффективности и интеллектуальности электронной промышленности.

(5) Форма для упаковки датчика из карбида

Что представляет собой форма для упаковки карбидных датчиков ?

Формы для корпусирования датчиков из цементированного карбида представляют собой высокоточные инструменты, специально разработанные для корпусирования датчиков, в основном используемые для МЭМС (микроэлектромеханических систем), датчиков окружающей среды (таких как датчики давления, температуры, газа) и медицинских датчиков (таких как датчики кислорода в крови, датчики ЭКГ). В качестве основного материала используется формула WC-Co-Ni (Ni $2\% \pm 0,5\%$), размер зерна $0,7 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и горячее изостатическое прессование (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) для повышения плотности (пористость $< 0,5\% \pm 0,1\%$), поддержки сложных трехмерных структур (высота $0,05\text{--}0,1 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$, шероховатость боковой стенки $R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) и срока службы около $7 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$. На поверхность формы наносится покрытие ALD (атомно-слоевое осаждение) (например, Al_2O_3 , толщина $10\text{--}20 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$) для повышения влагостойкости (влагостойкость $> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$) и антибактериальных свойств (уровень антибактериальности $> 99\% \pm 0,5\%$), а для оптимизации процесса высокотемпературной упаковки ($> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) используются микроканалы охлаждения (диаметром $0,01\text{--}0,02 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$). Встроенные датчики контролируют напряжение упаковки ($< 10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) для удовлетворения требований миниатюризации (размер $< 1 \text{ мм}^3 \pm 0,1 \text{ мм}^3$), высокой точности (отклонение $< 0,001 \text{ мм} \pm 0,0002 \text{ мм}$) и биосовместимости (в соответствии со стандартом ISO 10993).

Характеристики пресс-формы для упаковки карбидных датчиков

Форма обладает высокой твердостью (HV 1800 ± 30), отличной износостойкостью (скорость износа $< 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокой прочностью ($> 7 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и высокой точностью упаковки (отклонение $< 0,001 \text{ мм} \pm 0,0002 \text{ мм}$). Покрытие Al_2O_3 повышает влагостойкость ($> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$) и антибактериальные свойства (уровень антибактериальности $> 99\% \pm 0,5\%$), микроканалы охлаждения оптимизируют терморегулирование (контроль температуры $< 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), встроенные датчики контролируют напряжение ($< 10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) и поддерживают сложные трехмерные структуры (высота $0,05\text{--}0,1 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$, шероховатость боковой стенки $R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$), отвечая требованиям биосовместимости и высокотемпературной упаковки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Типы форм для упаковки карбидных датчиков

Стандартная форма

На основе покрытия WC-Co-Ni и Al_2O_3 , подходит для МЭМС и датчиков окружающей среды, с точностью $<0,001 \text{ мм} \pm 0,0002 \text{ мм}$ и долговечностью $7 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$.

Высокотемпературная форма

Добавление TiC ($5-10 \pm 0,5\%$) позволяет использовать корпус при высоких температурах ($>200 \pm 10^\circ\text{C}$), что подходит для промышленных датчиков Интернета вещей.

Медицинская плесень

Оптимизированная биосовместимость (ISO 10993), микроохлаждающие каналы (диаметр $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) для датчиков кислорода в крови и ЭКГ.

Интеллектуальная форма

Встроенный датчик напряжения для мониторинга в реальном времени (точность $\pm 1\%$), подходящий для высокоточной упаковки носимых устройств.

Применение пресс-формы для упаковки датчиков из карбида

Пресс-формы для упаковки датчиков из карбида широко используются в системах «умного дома», промышленном Интернете вещей и медицинской электронике. В «умном доме» пресс-формы поддерживают упаковку «умных» термостатов, датчиков качества воздуха и «умных» контроллеров освещения, обеспечивая миниатюризацию (размер $<1 \text{ мм}^3 \pm 0,1 \text{ мм}^3$) и высокую точность (отклонение $<0,001 \text{ мм} \pm 0,0002 \text{ мм}$), улучшая скорость реагирования оборудования и энергосбережение. В промышленном Интернете вещей пресс-формы используются для упаковки датчиков давления, температуры и вибрации на «умных» заводах, адаптируясь к высокотемпературным средам ($>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и сложным трёхмерным конструкциям (высота $0,05-0,1 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$), поддерживая автоматизацию и предиктивное обслуживание в рамках «Индустрии 4.0» (сокращение времени простоя более чем на $15\% \pm 2\%$).

Медицинская электроника является важной областью применения. Пресс-форма подходит для упаковки датчиков кислорода в крови, датчиков ЭКГ (электрокардиограммы) и инсулиновых помп. Благодаря биосовместимости (соответствует стандартам ISO 10993) и антибактериальным свойствам (уровень антибактериальности $> 99\% \pm 0,5\%$), она соответствует высоким требованиям к надежности носимых кардиомониторов и имплантируемых медицинских устройств (выход годных $> 98\% \pm 1\%$). В потребительской электронике пресс-формы используются для упаковки датчиков окружающей среды умных часов и фитнес-трекеров для повышения влагостойкости ($> 95\%$ относительной влажности $\pm 2\%$) и долговечности ($> 7 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$).

В области автомобильной электроники пресс-формы используются для упаковки бортовых датчиков (например, датчиков давления в шинах и датчиков обнаружения столкновений), что позволяет им работать в экстремальных температурных диапазонах (от -40°C до $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и соответствовать высоким требованиям точности (отклонение $<0,001 \text{ мм} \pm 0,0002 \text{ мм}$). В аэрокосмической (например, бортовых самописцах) и оборонной (например, датчиках обнаружения отравляющих веществ) электронике коррозионная стойкость и прочность пресс-форм обеспечивают длительную эксплуатацию в экстремальных условиях. В устройствах Интернета вещей и периферийных вычислений пресс-формы оптимизируют работу датчиков благодаря микроканалам охлаждения и мониторингу напряжений ($<10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), способствуя эффективной и интеллектуальной разработке будущих сенсорных сетей.

(6) Форма для лазерного сверления карбида

Что такое твердосплавный лазерный сверлильный инструмент?

Лазерный сверлильный инструмент из карбида вольфрама – это высокоточный инструмент, предназначенный для обработки микроотверстий (глухих и скрытых) в платах HDI и высокопроизводительных печатных платах (таких как серверные материнские платы, печатные платы радаров, платы спутниковой связи). В качестве основного материала используется сплав WC-TiC-6Co с размером зерна $0,9 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Прочность инструмента повышена благодаря высокотемпературному спеканию ($1450 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$) и лазерной закалке поверхности (твердость $\text{HV } 2000 \pm 50$). Точность сверления составляет $<0,015 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, а отклонение апертуры – $<0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$. Штамп имеет покрытие TiCN (толщина $10\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$, с использованием технологии CVD) для повышения устойчивости к лазерному тепловому удару ($> 10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$) и поддерживает сверление лазером с высокой плотностью энергии ($> 10^6 \text{ Вт/см}^2 \pm 10^5 \text{ Вт/см}^2$). В сочетании с пористой структурой (плотность пор $> 1000/\text{см}^2 \pm 100/\text{см}^2$) и устойчивостью к УФ-лазеру (длина волны $193 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, сопротивление $> 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) форма оптимизирует производительность за счет сверхточной технологии обработки (например, фемтосекундный лазер) и самовосстанавливающегося покрытия (например, TiAlCN, толщина $15\text{-}25 \text{ мкм} \pm 0,3 \text{ мкм}$). Многослойная градиентная структура улучшает теплопроводность ($>200 \text{ Вт/м} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$) и уменьшает термические трещины (длина $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), отвечая требованиям высококачественной обработки микроотверстий печатных плат.

Производительность твердосплавного лазерного сверлильного инструмента

Форма обладает высокой твердостью ($\text{HV } 2000 \pm 50$), превосходной износостойкостью (износ $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокой прочностью ($>10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и высокой точностью сверления ($<0,015 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, отклонение диаметра отверстия $<0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$). Покрытие TiCN повышает стойкость к лазерному тепловому удару ($>10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$), а самовосстанавливающиеся покрытия (например, TiAlCN) оптимизируют долговечность ($>2 \times 10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и термостойкость ($>800 \text{ °C} \pm 50 \text{ °C}$). Многослойная градиентная структура улучшает теплопроводность ($>200 \text{ Вт/м} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$), уменьшает термические трещины ($<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), поддерживает высокую плотность энергии ($>10^6 \text{ Вт/см}^2 \pm 10^5 \text{ Вт/см}^2$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и устойчивость к УФ-лазерному излучению (длина волны $193\text{ нм} \pm 1\text{ нм}$, $>10^5\text{ раз} \pm 10^4\text{ раз}$).

Типы твердосплавных лазерных сверлильных головок

Стандартная форма

Благодаря покрытию WC-TiC-6Co и TiCN он подходит для глухих отверстий в платах HDI с точностью $<0,015\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$ и долговечностью $1 \times 10^5\text{ раз} \pm 10^4\text{ раз}$.

Высокотемпературная форма

Добавлено самовосстанавливающееся покрытие TiAlCN ($15\text{-}25\text{ мкм} \pm 0,3\text{ мкм}$), термостойкостью $> 800\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$, подходит для сверления печатных плат радаров.

Форма с несколькими отверстиями

Оптимизированная пористая структура (плотность пор $>1000/\text{см}^2 \pm 100/\text{см}^2$) поддерживает микропоры высокой плотности в платах спутниковой связи и устойчива к УФ-излучению $>10^5\text{ раз} \pm 10^4\text{ раз}$.

Сверхточная форма

Фемтосекундная лазерная обработка используется для удовлетворения требований к микропорам оборудования дополненной и виртуальной реальности (апертура $<0,01\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$) и теплопроводности $>200\text{ Вт/м} \cdot \text{K} \pm 10\text{ Вт/м} \cdot \text{K}$.

Применение твердосплавной лазерной сверлильной формы

Твердосплавные лазерные сверлильные матрицы широко используются в обработке печатных плат высокого класса. При обработке микроотверстий в HDI-платах эти матрицы обеспечивают прецизионное сверление глухих и скрытых отверстий (точность $<0,015\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$), что соответствует требованиям к высокой плотности разводки проводов смартфонов, планшетов и материнских плат ноутбуков. В производстве серверных материнских плат и плат для центров обработки данных высокая плотность энергии ($>10\text{ Вт/см}^2 \pm 10\text{ Вт/см}^2$) и теплопроводность ($>200\text{ Вт/м} \cdot \text{K} \pm 10\text{ Вт/м} \cdot \text{K}$) этих матриц обеспечивают надежное подключение высокопроизводительных процессоров.

Производство печатных плат радаров и плат спутниковой связи зависит от устойчивости пресс-формы к лазерному тепловому удару ($> 10^4\text{ раз} \pm 10^3\text{ раз}$) и пористой структуры (плотность пор $> 1000/\text{см}^2 \pm 100/\text{см}^2$), что поддерживает обработку микроотверстий антенн 5G, радаров миллиметрового диапазона и модулей аэрокосмической связи. В области высококачественной потребительской электроники, такой как устройства AR/VR и умные очки, пресс-формы используют технологию фемтосекундного лазера для получения ультрамикроотверстий (апертура $<0,01\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$), улучшая интеграцию оптических и электронных компонентов. В области автомобильной электроники пресс-формы используются для обработки микроотверстий современных систем помощи водителю (ADAS) и плат радаров, устанавливаемых на транспортные средства, адаптируясь к высокотемпературным средам ($> 800\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$) и высоким требованиям к надежности (выход годных $> 98\% \pm 1\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Аэрокосмическая электроника (например, модули управления полетом и навигационные системы) и оборонная электроника (например, системы наведения ракет и радиоэлектронного противодействия) используют стойкость формы к УФ-лазерам (длина волны $193 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, $>10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и долговечность ($>10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) для удовлетворения долгосрочных требований использования в экстремальных условиях. Устройства промышленной автоматизации и Интернета вещей (например, платы управления интеллектуальными заводами) полагаются на контроль термических трещин формы ($< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) и самовосстанавливающееся покрытие для оптимизации эффективности производства (увеличение $>20\% \pm 2\%$) и снижения затрат на техническое обслуживание ($<5\% \pm 1\%$). С развитием технологий 6G и миллиметровых волн форма дополнительно поддерживает эффективную обработку будущих высокочастотных печатных плат за счет многослойных градиентных структур и оптимизации ИИ.

Развитие и перспективы применения твердосплавных пресс-форм в электронной промышленности

С ростом спроса на миниатюризацию микроэлектронных устройств (технология 5 нм и ниже), гибкую электронику (растягивающиеся схемы, органические светодиоды и электронный текстиль), коммуникации 5G/6G, электронику для транспортных средств на новой энергии (такую как системы управления аккумуляторными батареями и платы управления зарядными станциями), устройства Интернета вещей и интеллектуальное медицинское оборудование, сфера применения и требования к оптимизации производительности пресс-форм из цементированного карбида для электронной промышленности значительно возросли.

Быстрое развитие электронной промышленности способствовало итерации технологии твердосплавных пресс-форм. Новые передовые покрытия (такие как ZrN, AlCrN, WC/C, толщина $15\text{-}25 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) и технологии аддитивного производства (такие как SLM, EBM) были добавлены для улучшения срока службы пресс-формы ($> 2 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$), точности ($<0,002 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$) и универсальности (такой как теплопроводность $> 150 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, изоляция $> 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Как область высококачественных потребительских товаров, твердосплавные пресс-формы показали себя выдающимися в области микросхем искусственного интеллекта, квантовых вычислений, электроники электромобилей, гибких дисплеев и интеллектуальных медицинских устройств. В будущем пресс-формы будут развиваться в направлении интеллектуального проектирования, интегрируя датчики для контроля износа (точность в реальном времени $<0,001 \text{ мм} \pm 0,0001 \text{ мм}$), функции адаптивной регулировки (компенсация напряжений $<5 \text{ МПа} \pm 0,5 \text{ МПа}$) и экологичную конструкцию (сокращение использования тяжёлых металлов $<1\% \pm 0,1\%$), чтобы соответствовать двойной задаче: высокой надёжности, низкой стоимости и устойчивого развития в электронной промышленности. В то же время, глобальная корректировка цепочек поставок и региональное производство (например, Восточный Китай

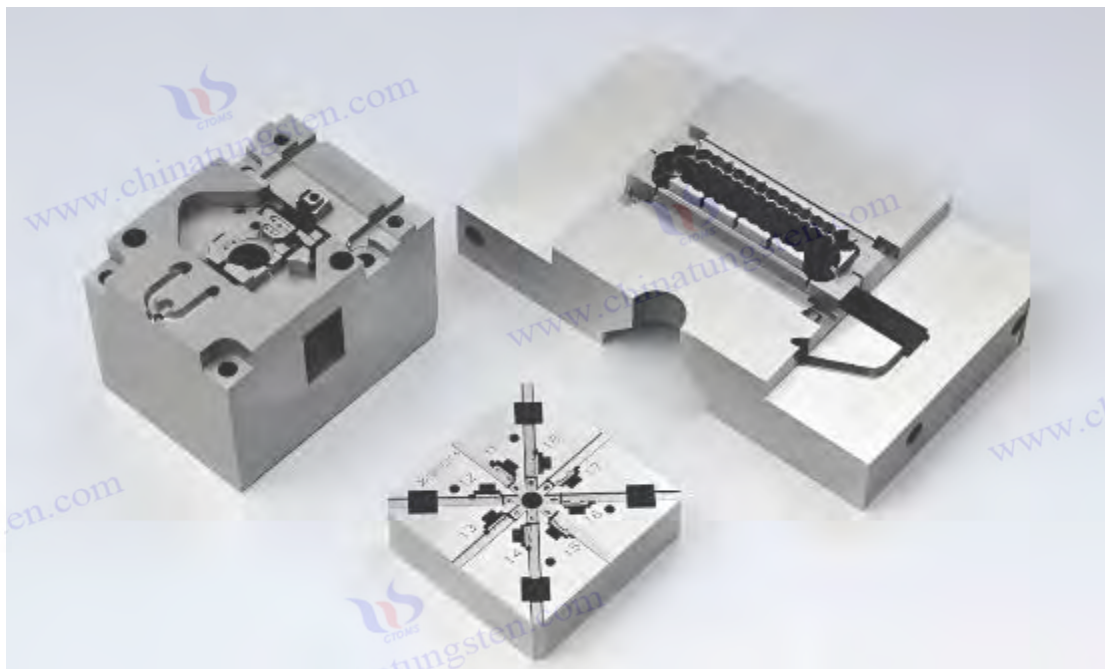
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и Юго-Восточная Азия) будут способствовать дальнейшей оптимизации структуры производства пресс-форм.

В электронной промышленности подложки из карбида вольфрама для теплоотвода стали основными компонентами решений для рассеивания тепла в мощных электронных устройствах благодаря своей превосходной теплопроводности, высокой термостойкости, низкому коэффициенту теплового расширения и отличным электроизоляционным свойствам. Поскольку электронная промышленность стремительно развивается в сторону высокой производительности, компактности и интеллектуальности, спрос на подложки из карбида вольфрама для теплоотвода значительно возрос. Эти подложки должны иметь высокую теплопроводность ($>200 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), низкий коэффициент теплового расширения (около $4-6 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$) и отличную изоляцию (объемное сопротивление $>10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) для эффективного решения проблем рассеивания тепла светодиодов, базовых станций 5G/6G, модулей питания электромобилей, микросхем искусственного интеллекта и новых областей, таких как квантовые вычислительные устройства. Материал изготавливается путем соединения WC (карбида вольфрама) с частицами Cu (меди), алмаза, AlN (нитрида алюминия), SiC (карбида кремния) или BN (нитрида бора) (размер частиц $10-50 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) и использования передовых процессов, таких как холодное прессование спеканием ($1200^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, $40 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), горячее прессование с диффузией ($1300^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$) или изостатическое прессование (HIP, $1200^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для обеспечения равномерного распределения, плотности (пористости $<1\% \pm 0,1\%$) и микроструктурной стабильности (размер зерна $<1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$). Эффективность рассеивания тепла и надежность этих подложек дополнительно улучшены за счет прецизионной обработки (например, химико-механической полировки CMP, шероховатость поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$) и модификации поверхности (например, нанесения покрытия методом химического осаждения из газовой фазы, плазменного напыления).

С учетом высокой плотности интеграции электронных устройств ($>10^6$ транзисторов/ $\text{мм}^2 \pm 10^5$ транзисторов/ мм^2), повышенной плотности мощности ($>100 \text{ Вт/см}^2 \pm 10 \text{ Вт/см}^2$) и более высокой рабочей температуры ($>150^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) ожидается, что объем рынка твердосплавных теплоотводящих подложек достигнет 3 млрд. долл. США ± 300 млн. долл. США, с ежегодным темпом роста 20%-25%, став высокотехнологичной областью применения в отрасли твердосплавных материалов, особенно в следующем поколении коммуникаций, новых энергетических транспортных средствах, промышленной автоматизации и оборонной электронике.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



14.1.2 Твердосплавная подложка для отвода тепла в электронной промышленности

(1) Композитная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама и меди (WC-Cu)

Что такое композитный радиатор на основе карбида вольфрама и меди (WC-Cu) ?

Композитная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама и меди (WC-Cu) – это высокопроизводительный материал, предназначенный для эффективного теплоотвода. Она в основном используется в светодиодных модулях освещения, силовых электронных модулях (таких как драйверы IGBT, MOSFET), блоках управления питанием бытовой электроники, инверторах электромобилей и источниках питания серверов центров обработки данных. Подложка изготовлена из композита WC и Cu (объемное соотношение $70:30 \pm 1\%$) и изготовлена методом холодного прессования и спекания ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ МПа} \pm 1\text{ МПа}$) в сочетании с последующей термической обработкой ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, отжиг в течение 2 часов $\pm 0,1$ часа, защита азотом) для обеспечения однородности материала и микроструктурной плотности (пористость $< 0,8\% \pm 0,1\%$). Подложка имеет теплопроводность $220\text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 10\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, коэффициент теплового расширения $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, толщину $0,5\text{--}1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$, легка (плотность $12\text{--}13\text{ г/см}^3 \pm 0,1\text{ г/см}^3$) и обладает высокой механической прочностью (прочность на сжатие $>2500\text{ МПа} \pm 100\text{ МПа}$). Поверхность покрыта слоем Ni/Au (толщиной $0,1\text{--}0,3\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) для повышения свариваемости и стойкости к окислению (высокая термостойкость $>300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, влагостойкость $>95\%\text{RH} \pm 2\%\text{RH}$), а также химически покрытым слоем Ni-P (толщиной $1\text{--}3\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) для повышения стойкости к коррозии (испытание в соляном тумане > 500 часов ± 50 часов).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сочетание многослойной структуры (толщина $0,3-0,7 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и микроканальной системы охлаждения (диаметр $0,02-0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, скорость потока $> 0,1 \text{ л/мин} \pm 0,01 \text{ л/мин}$) позволяет использовать в подложке наночастицы меди (размер частиц $< 10 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$) для повышения прочности связи на границе раздела (прочность адгезии $> 60 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) и технологию лазерной микрообработки для достижения микротекстуры поверхности. (шероховатость $Ra < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), оптимизируют эффективность рассеивания тепла ($> 250 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), тепловое напряжение ($< 15 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) и тепловую однородность (градиент температуры $< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$), а также отвечают требованиям высокоэффективного рассеивания тепла.

Характеристики теплорассеивающей подложки из композитного материала на основе карбида вольфрама и меди (WC-Cu)

Подложка имеет высокую теплопроводность ($220 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, оптимизировано до $> 250 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), низкий коэффициент теплового расширения ($5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), высокую механическую прочность (прочность на сжатие $> 2500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и легкую конструкцию (плотность $12-13 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$). Фаза Cu улучшает электропроводность ($> 10^6 \text{ См/м} \pm 10^5 \text{ См/м}$), снижает резистивный нагрев ($< 0,5^\circ\text{C/Вт} \pm 0,05^\circ\text{C/Вт}$) и оптимизирует термоциклирование (от -40°C до $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, количество циклов $> 5000 \pm 500$ раз). Покрытие Ni/Au улучшает паяемость (высокая термостойкость $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, влагостойкость $> 95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$), а слой Ni-P повышает коррозионную стойкость (стойкость к соляному туману $> 500 \pm 50$ часов). Система охлаждения микроканалов и частицы нано-Cu дополнительно повышают эффективность рассеивания тепла и прочность связи интерфейса (прочность адгезии $> 60 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$), а тепловое моделирование с помощью искусственного интеллекта снижает тепловое напряжение ($< 15 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) и температурный градиент ($< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$).

Типы композитных теплоотводящих подложек из карбида вольфрама и меди (WC-Cu)

Стандартный субстрат

На основе WC-Cu 70:30 и покрытия Ni/Au, подходит для светодиодных модулей освещения, толщина $0,5-1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, теплопроводность $220 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

Высокотемпературный субстрат

Добавление слоя Ni-P ($1-3 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), термостойкость $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, подходит для драйверов IGBT и MOSFET.

Миниатюрный субстрат

Оптимизированные многослойные структуры (толщина $0,3-0,7 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и микроканалы (диаметр $0,02-0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) для микросветодиодов и устройств дополненной и виртуальной реальности.

Интеллектуальный субстрат

Интегрирует тепловое моделирование на основе искусственного интеллекта и частицы нано-Cu (размер частиц $< 10 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$) с эффективностью рассеивания тепла $> 250 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вт/ м· К , подходит для источников питания центров обработки данных.

Применение композитной теплоотводящей подложки из карбида вольфрама и меди (WC-Cu)

Композитные теплоотводящие подложки из карбида вольфрама и меди (WC-Cu) широко используются в освещении, электронике и электромобилях. В светодиодных осветительных модулях подложка поддерживает светодиодные матрицы высокой яркости (плотность мощности $> 50 \text{ Вт/см}^2 \pm 5 \text{ Вт/см}^2$, яркость $> 200 \text{ лм /Вт} \pm 10 \text{ лм /Вт}$), которые используются для умных уличных фонарей, светодиодов, устанавливаемых на транспортных средствах, и внутреннего освещения, улучшая эффективность освещения и характеристики рассеивания тепла (теплопроводность $220 \text{ Вт/м·К} \pm 10 \text{ Вт/ м· К}$) . В силовых электронных модулях подложка используется для драйверов IGBT и MOSFET, оптимизируя характеристики теплового цикла ($> 5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$) и электропроводность ($> 10^6 \text{ См/м} \pm 10^5 \text{ См/м}$), отвечая требованиям промышленных приводов двигателей и инверторов возобновляемой энергии.

Устройства управления питанием бытовой электроники, такие как адаптеры питания для ноутбуков и мощные зарядные устройства, используют лёгкий (плотность $12\text{-}13 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$) и коррозионную стойкость (стойкость к соляному туману $> 500 \pm 50$ часов) субстрата для повышения надёжности и срока службы оборудования. В инверторах для электромобилей высокая механическая прочность субстрата ($> 2500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и микроканальное охлаждение (расход $> 0,1 \text{ л/мин} \pm 0,01 \text{ л/мин}$) обеспечивают эффективное рассеивание тепла ($> 250 \text{ Вт/м·К} \pm 10 \text{ Вт/ м· К}$) и равномерность нагрева ($< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$), что соответствует высоким требованиям к мощности новых энергетических транспортных средств. В блоках питания серверов центров обработки данных используется оптимизированная для ИИ конструкция подложки и наночастиц меди (прочность сцепления $> 60 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для снижения термического напряжения ($< 15 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) и повышения эффективности рассеивания тепла, что обеспечивает стабильную работу высокопроизводительных вычислений и ускорителей ИИ.

В области микросветодиодов эта подложка подходит для дисплеев с плотностью пикселей $> 1000 \text{ PPI} \pm 100 \text{ PPI}$ и автомобильных светодиодов (срок службы $> 10^5$ часов $\pm 10^4$ часов), используемых в устройствах дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) и автомобильных системах освещения. Медицинская электроника, такая как мощные медицинские приборы и аэрокосмическая электроника (например, модули питания спутников), нуждается в высокой термостойкости ($> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и влажностойкости ($> 95\%$ относительной влажности $\pm 2\%$) подложки для удовлетворения требований к рассеиванию тепла в экстремальных условиях. Модули промышленной автоматизации и периферийных вычислений используют микротекстуру поверхности подложки (шероховатость $R_a < 0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и многослойную структуру для оптимизации эффективности производства (повышение $> 20\% \pm 2\%$) и снижения затрат на обслуживание ($< 5\% \pm 1\%$) , способствуя широкому применению высокопроизводительной технологии рассеивания тепла в будущем.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Композитная подложка из карбида вольфрама и алмаза (WC-алмаз) для рассеивания тепла

Что представляет собой теплорассеивающая подложка из композитного материала на основе карбида вольфрама и алмаза (WC-Diamond)?

Композитная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама-алмаза (WC-Diamond) - это высококачественный материал, предназначенный для высокопроизводительного терморегулирования. Он в основном используется в радиочастотных модулях базовых станций 5G/6G, силовой электронике электромобилей (инверторы, контроллеры зарядных станций), высокопроизводительных вычислительных серверах и военных радиолокационных системах. Он изготовлен из WC и алмаза (размер частиц $20 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, объемное соотношение $60:40 \pm 1\%$) и изготовлен методами горячего прессования с диффузией ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$) и изостатического прессования (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для обеспечения плотности материала (пористость $< 0,6\% \pm 0,1\%$) и однородности зерна ($< 0,8 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$). Теплопроводность подложки составляет $320 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$, а изоляция $> 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, толщина $0,3\text{-}0,8 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, термостойкость $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (термостойкость $> 500 \text{ часов} \pm 50 \text{ часов}$), высокая механическая прочность (прочность на изгиб $> 3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$).

Поверхность покрыта CVD алмазным покрытием (толщина $1\text{-}3 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для повышения износостойкости (твердость $\text{HV } 8000 \pm 500$) и равномерности рассеивания тепла (градиент температуры $< 5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$), а также технология плазменной очистки используется для оптимизации адгезии интерфейса ($> 50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$). В сочетании с градиентной композитной структурой (содержание WC $30\% - 60\% \pm 1\%$) и нано-слоем рассеивания тепла (толщина $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) подложка оптимизирована с помощью технологии лазерной микрообработки. Микроструктура поверхности (пористость $1\% - 2\% \pm 0,1\%$) увеличивает площадь рассеивания тепла ($> 300 \text{ см}^2 \pm 20 \text{ см}^2$) и снижает тепловое сопротивление ($< 0,2^\circ\text{C/Вт} \pm 0,02^\circ\text{C/Вт}$). Модуль адаптивного терморегулирования (время отклика $< 0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$) контролирует температуру путем встраивания термпар (точность $< 0,2^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$) для удовлетворения потребностей в рассеивании тепла при высоких частотах и сверхбольших токах.

Характеристики теплорассеивающей подложки из композита карбид вольфрама-алмаз (WC-алмаз)

Подложка обладает сверхвысокой теплопроводностью ($320 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$, после оптимизации $> 350 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$), превосходной изоляцией ($> 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), высокой механической прочностью (прочность на изгиб $> 3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и высокой термостойкостью ($> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, термостойкость $> 500 \text{ часов} \pm 50 \text{ часов}$). Алмазное покрытие улучшает износостойкость (твердость $\text{HV } 8000 \pm 500$) и равномерность рассеивания тепла.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(градиент температуры $<5^{\circ}\text{C}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), нанослой рассеивания тепла снижает тепловое сопротивление ($<0,2^{\circ}\text{C}/\text{Вт}\pm 0,02^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), а градиентная структура оптимизирует теплопроводность ($>350\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{K}\pm 10\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$). Модуль адаптивного терморегулирования контролирует температуру с помощью термопар (точность $<0,2^{\circ}\text{C}\pm 0,02^{\circ}\text{C}$, время отклика $<0,1\text{ с}\pm 0,01\text{ с}$), поддерживая высокочастотные силовые устройства ($>10\text{ ГГц}\pm 1\text{ ГГц}$) и приложения с высокой плотностью мощности ($>200\text{ Вт}/\text{см}^2\pm 20\text{ Вт}/\text{см}^2$).

Типы теплорассеивающих композитных подложек из карбида вольфрама и алмаза (WC-Diamond)

Стандартный субстрат

На основе WC-Diamond 60:40 и CVD-покрытия он подходит для радиочастотных модулей базовых станций 5G толщиной $0,3\text{--}0,8\text{ мм}\pm 0,01\text{ мм}$ и теплопроводностью $320\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{K}\pm 10\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$.

Высокотемпературный субстрат

Добавлена градиентная структура (WC 30%-60% $\pm 1\%$), термостойкость $>400^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, подходит для инверторов электромобилей.

Высокочастотный субстрат

Интегрированный нанорадиатор (толщина $<0,1\text{ мкм}\pm 0,01\text{ мкм}$), поддерживает устройства с частотой $>10\text{ ГГц}\pm 1\text{ ГГц}$ и имеет тепловое сопротивление $<0,2^{\circ}\text{C}/\text{Вт}\pm 0,02^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Интеллектуальный субстрат

Встроенный модуль адаптивного терморегулирования и термопара, площадь рассеивания тепла $>300\text{ см}^2\pm 20\text{ см}^2$, подходит для военных радиолокационных систем.

Применение композитной теплорассеивающей подложки из карбида вольфрама и алмаза (WC-Diamond)

Композитные теплорассеивающие подложки из карбида вольфрама и алмаза (WC-Diamond) широко используются в сфере связи, электромобилей и военной техники. В радиочастотных модулях базовых станций 5G/6G подложка поддерживает высокочастотные силовые устройства (такие как GaN HEMT, $>10\text{ ГГц}\pm 1\text{ ГГц}$) и высокую плотность мощности ($>200\text{ Вт}/\text{см}^2\pm 20\text{ Вт}/\text{см}^2$) и используется для рассеивания тепла антенн и радиочастотных усилителей, обеспечивая сверхвысокую теплопроводность ($320\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{K}\pm 10\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$) и изоляцию ($>10^{13}\text{ Ом}\cdot\text{см}\pm 10^{12}$). В силовой электронике электромобилей подложка используется в инверторах и контроллерах зарядных станций для оптимизации характеристик теплового цикла ($>5000\text{ раз}\pm 500\text{ раз}$) и высокой термостойкости ($>400^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$), поддержки быстрой зарядки ($>350\text{ кВт}\pm 10\text{ кВт}$) и эффективной работы системы управления аккумулятором.

Высокопроизводительные вычислительные серверы используют градиентную структуру и нано-теплорассеивающий слой подложки (термическое сопротивление $<0,2^{\circ}\text{C}/\text{Вт}\pm 0,02^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) для снижения термического напряжения ($<15\text{ МПа}\pm 1\text{ МПа}$) и увеличения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

площади рассеивания тепла ($>300 \text{ см}^2 \pm 20 \text{ см}^2$), обеспечивая стабильную работу ускорителей искусственного интеллекта и центров обработки данных. Военные радиолокационные системы используют механическую прочность (прочность на изгиб $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и износостойкость (твердость $\text{HV } 8000 \pm 500$) подложки для обеспечения длительного использования радиолокационных модулей и систем радиоэлектронного противодействия в экстремальных условиях (термическая стабильность $>500 \text{ часов} \pm 50 \text{ часов}$). Для повышения надежности и срока службы авионики (например, модулей управления полетом и источников питания спутников) необходимы высокая термостойкость и равномерность рассеивания тепла подложки (градиент температуры $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$).

В сфере потребительской электроники подложки обеспечивают теплоотвод устройств дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) и высокопроизводительных игровых консолей, а также адаптируются к высокочастотным и сверхвысоким токам ($>100 \text{ А} \pm 5 \text{ А}$). Устройства промышленной автоматизации и Интернета вещей (например, платы управления «умными» фабриками) используют адаптивное терморегулирование подложки (время отклика $<0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$) и лазерную микрообработку поверхности (оптимизация шероховатости) для повышения эффективности производства ($>20\% \pm 2\%$) и снижения затрат на обслуживание ($<5\% \pm 1\%$). С развитием технологии миллиметровых волн 6G подложки могут дополнительно решать задачи теплоотвода будущих высокочастотных систем связи и силовой электроники благодаря оптимизации и проектированию микроструктур на основе искусственного интеллекта.

Композитная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама-нитрида алюминия (WC- AlN)

композитный радиатор из карбида вольфрама-нитрида алюминия (WC- AlN) ?

из карбида вольфрама-нитрида алюминия (WC- AlN) — это высокопроизводительный материал, предназначенный для терморегулирования высокочастотной электроники и медицинского оборудования. Он в основном используется в высокочастотных электронных устройствах (таких как радиочастотные модули, микроволновые радары, оборудование спутниковой связи), медицинской электронике (например, усилители мощности МРТ, ультразвуковое оборудование) и промышленных датчиках. Он изготовлен из композита WC и AlN (объемное соотношение $50:50 \pm 1\%$) и получен методом холодного прессования-спекания ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) и высокотемпературного отжига ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, защита азотом) для обеспечения плотности материала (пористость $< 0,7\% \pm 0,1\%$) и теплового согласования. Теплопроводность подложки составляет $160 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$, а изоляция $>10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, толщина $0,4\text{--}0,6 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, коэффициент теплового расширения соответствует кремнию ($4,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$, отклонение $<0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$).

Подложка сочетает в себе высокую изоляцию AlN и механическую прочность WC (прочность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на изгиб $>400 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$), что делает ее пригодной для высокочастотных схем (рабочая частота $>20 \text{ ГГц} \pm 2 \text{ ГГц}$) и высокотемпературных сред ($>250 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$), а также обладает высокой механической прочностью ($>10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$). Поверхность покрыта слоем Si_3N_4 (толщиной $0,5\text{--}1 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$) для повышения влагостойкости (влагостойкость $>95\%\text{RH} \pm 2\%\text{RH}$) и стойкости к тепловому удару ($>1000 \text{ раз} \pm 100 \text{ раз}$), а технология микродугового оксидирования используется для оптимизации прочности связи интерфейса (прочность адгезии $>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$). Сочетая многослойную градиентную конструкцию (содержание AlN $40\text{--}60\pm 1\%$) и термоэлектрический разделительный слой (толщина $0,02\text{--}0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), подложка использует технологию дисперсии наночастиц (размер частиц $<10 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$) для улучшения равномерности теплопроводности ($<2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$) и снижения термического напряжения ($<10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), что отвечает требованиям эффективного рассеивания тепла.

Характеристики теплорассеивающей подложки из композита карбида вольфрама-нитрида алюминия (WC- AlN)

Подложка имеет высокую теплопроводность ($160 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), отличную изоляцию ($>10^{14} \Omega\cdot\text{см} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{см}$), высокую механическую прочность (прочность на изгиб $>400 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и тепловое согласование (отклонение $<0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$). Покрытие Si_3N_4 улучшает влагостойкость ($>95\%\text{RH} \pm 2\%\text{RH}$) и стойкость к тепловому удару ($>1000 \text{ раз} \pm 100 \text{ раз}$), многослойная градиентная структура оптимизирует однородность теплопроводности ($<2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$), а термоэлектрический разделительный слой снижает термическое напряжение ($<10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$). Технология дисперсии наночастиц повышает долговечность ($>2 \times 10^6 \pm 10^4 \text{ раз}$), выдерживает высокие температуры ($>250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и высокочастотные приложения ($>20 \text{ ГГц} \pm 2 \text{ ГГц}$).

Композитные теплоотводящие подложки из карбида вольфрама и нитрида алюминия (WC- AlN)

Стандартный субстрат

На основе покрытия WC -AlN 50:50 и Si_3N_4 , подходит для ВЧ-модулей, толщина $0,4\text{--}0,6 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, теплопроводность $160 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Высокотемпературный субстрат

Добавлен термоэлектрический разделительный слой ($0,02\text{--}0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), термостойкость $> 250 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, подходит для усилителей мощности МРТ.

Высокочастотный субстрат

Оптимизированная градиентная структура (AlN $40\%\text{--}60\pm 1\%$), поддерживающая схемы $>20 \text{ ГГц} \pm 2 \text{ ГГц}$, с однородностью $<2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Нано-улучшенные субстраты

Интегрированные наночастицы (размер частиц $<10 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$), термическое напряжение $<10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$, подходят для микроволновых радаров.

Композитная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама и нитрида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

алюминия (WC- AlN)

из карбида вольфрама и нитрида алюминия (WC- AlN) широко используются в высокочастотной электронике, медицине и авиации. В высокочастотных электронных устройствах подложка используется для высокочастотных цепей (>20 ГГц ± 2 ГГц) радиочастотных модулей, микроволновых радаров и спутникового коммуникационного оборудования. Благодаря высокой изоляции ($>10^{-14}$ Ом·см $\pm 10^{-13}$ Ом·см) и теплопроводности (160 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К) они отвечают требованиям к теплоотводу базовых станций и антенн связи 5G/6G. В медицинской электронике подложки используются в усилителях мощности МРТ и ультразвуковом оборудовании для оптимизации теплового согласования (отклонение $<0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) и высокой термостойкости ($>250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), а также для повышения точности и надежности оборудования (выход годных $>98\% \pm 1\%$).

Промышленные датчики, такие как датчики температуры и давления для умных заводов, используют механическую прочность ($>10^6$ раз $\pm 10^4$ раз) и стойкость к тепловым ударам (>1000 раз ± 100 раз) подложки для поддержки автоматизации и предиктивного обслуживания в рамках концепции «Индустрия 4.0» (сокращение времени простоя $>15\% \pm 2\%$). В авионике, такой как системы управления полетом и навигационные модули, используется легкая (толщина $0,4-0,6$ мм $\pm 0,01$ мм) и высокая механическая прочность (>400 МПа ± 20 МПа) подложки для длительного использования в экстремальных условиях (термическая стабильность >500 часов ± 50 часов). Интеллектуальные медицинские устройства, такие как имплантируемые пульсометры и портативные ультразвуковые устройства, зависят от влагостойкости ($> 95\%$ относительной влажности $\pm 2\%$ относительной влажности) и градиентной конструкции подложки для оптимизации равномерности рассеивания тепла ($<2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$) и снижения термического напряжения (<10 МПа ± 1 МПа).

В области потребительской электроники подложки обеспечивают теплоотвод высокопроизводительных вычислительных устройств и коммуникационных терминалов, а также адаптируются к высоким температурам и частотам. В оборонной электронике, такой как системы радиоэлектронного противодействия и радиолокационные модули, используются коррозионная стойкость и нанотехнологии подложек, обеспечивающие соответствие требованиям военного уровня к надежности и долговечности ($>2 \times 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз). С развитием радаров миллиметрового диапазона, ускорителей нейронных сетей и биомедицинских устройств подложки дополнительно повышают эффективность теплоотвода ($>20\% \pm 2\%$) и характеристики терморегулирования за счет оптимизации с помощью искусственного интеллекта и термоэлектрических разделительных слоев, способствуя широкому использованию высокотехнологичных приложений в будущем.

Композитная подложка из карбида вольфрама-карбида кремния (WC- SiC) для рассеивания тепла

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

композитный радиатор из карбида вольфрама-карбида кремния (WC- SiC) ?

из карбида вольфрама и карбида кремния (WC- SiC) – это высокоэффективный теплоотводящий материал, предназначенный для мощных и промышленных применений. Она в основном используется в мощных лазерах, преобразователях мощности, системах промышленной автоматизации и железнодорожном тяговом оборудовании. Подложка изготовлена из композита WC и SiC (карбид кремния, размер частиц $15-40 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, объемное соотношение $65:35 \pm 1\%$), полученного методом горячего прессования с диффузией ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $60 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$), что обеспечивает плотность материала (пористость $< 0,9\% \pm 0,1\%$) и термическую стабильность. Подложка имеет теплопроводность $180 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, коэффициент теплового расширения $4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, толщину $0,6-1,2 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и термостойкость $>450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (срок службы при термическом цикле >1000 часов ± 100 часов). Подложка сочетает в себе высокую теплопроводность SiC ($>200 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) и коррозионную стойкость WC (кислотостойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), что делает ее пригодной для высоковольтных устройств (например, $1000 \text{ В} \pm 50 \text{ В}$) и приложений с высокой плотностью мощности ($>150 \text{ Вт/см}^2 \pm 15 \text{ Вт/см}^2$), а также обладает высокой механической прочностью (ударная вязкость $>600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$). Поверхность покрыта TiSiN (толщина $5-10 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) для повышения стойкости к окислению и износостойкости (твердость HV 2500 ± 100), а адгезия покрытия ($>60 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) оптимизирована технологией плазменного напыления. В сочетании с пористой структурой (пористость $1\%-3\% \pm 0,1\%$) и армированием углеродным волокном (содержание $1\%-2\% \pm 0,1\%$) подложка увеличивает площадь теплоотдачи ($> 200 \text{ см}^2 \pm 10 \text{ см}^2$) и ударопрочность ($> 500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), отвечая высоким требованиям надежности.

Характеристики теплорассеивающей подложки из композита карбида вольфрама-карбида кремния (WC- SiC)

Подложка обладает высокой теплопроводностью ($180 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), низким коэффициентом теплового расширения ($4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), высокой механической прочностью (ударная вязкость $>600 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и высокой термостойкостью ($>450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, срок службы при термоциклировании >1000 часов ± 100 часов). Покрытие TiSiN повышает стойкость к окислению и износу (твердость HV 2500 ± 100) и обладает превосходной коррозионной стойкостью (кислотостойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$). Пористая структура увеличивает площадь рассеивания тепла ($>200 \text{ см}^2 \pm 10 \text{ см}^2$), а армирование углеродным волокном оптимизирует ударопрочность ($>500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), поддерживая приложения с высоким напряжением ($1000 \text{ В} \pm 50 \text{ В}$) и высокой плотностью мощности ($>150 \text{ Вт/см}^2 \pm 15 \text{ Вт/см}^2$).

Композитные теплоотводящие подложки из карбида вольфрама-карбида кремния (WC-SiC)

Стандартный субстрат

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

На основе покрытия WC - SiC 65:35 и TiSiN , подходит для лазерной резки, толщина 0,6-1,2 мм $\pm$ 0,01 мм, теплопроводность 180 Вт/ м·К $\pm$ 5 Вт/ м· К .

Высокотемпературный субстрат

Оптимизированный срок службы при термическом цикле (>1000 часов $\pm$ 100 часов), термостойкость >450°C $\pm$ 10°C, подходит для силовых электронных инверторов.

Пористая подложка

Интегрированная пористая структура (пористость 1%-3% $\pm$ 0,1%), площадь рассеивания тепла >200 см² $\pm$ 10 см² , подходит для ветропреобразователей.

Улучшенный субстрат

При добавлении углеродного волокна (1%-2% $\pm$ 0,1%) ударопрочность составляет >500 МПа $\pm$ 50 МПа, что подходит для промышленных роботов.

Композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама-карбида кремния (WC- SiC)

из карбида вольфрама-карбида кремния (WC- SiC) широко используются в мощных промышленных и энергетических областях. В мощных лазерах подложки поддерживают высокую плотность мощности (>150 Вт/см² $\pm$ 15 Вт/см²) и высокую термостойкость (>450 °C $\pm$ 10 °C) лазерных режущих станков и сварочного оборудования, повышая эффективность обработки и срок службы оборудования. В силовых электронных инверторах подложки используются в ветровых преобразователях и солнечных инверторах для оптимизации теплопроводности (180 Вт/м·К $\pm$ 5 Вт/м · К) и коррозионной стойкости (кислотостойкость <0,01 мм/год $\pm$ 0,001 мм/год), отвечая требованиям высокого напряжения (1000 В $\pm$ 50 В).

Системы управления промышленной автоматикой полагаются на механическую прочность (ударная вязкость > 600 МПа $\pm$ 50 МПа) и пористую структуру (площадь рассеивания тепла > 200 см² $\pm$ 10 см²) подложки для поддержки стабильной работы промышленных роботов и интеллектуального производственного оборудования. Железнодорожное тяговое оборудование использует срок службы термического цикла (> 1000 часов $\pm$ 100 часов) и армирование углеродным волокном (ударная прочность > 500 МПа $\pm$ 50 МПа) подложки для обеспечения высокой надежности (выход годных > 98% $\pm$ 1%) высоковольтных тяговых инверторов и модулей управления. Авиационно-космическая электроника, такая как системы управления полетом, и оборонная электроника (например, модули питания радаров) полагаются на высокую термостойкость и стойкость к окислению (твердость HV 2500 $\pm$ 100) подложки для обеспечения длительного использования в экстремальных условиях.

В области зелёной энергетики подложки обеспечивают эффективное рассеивание тепла в зарядных устройствах электромобилей и системах накопления энергии, а также отвечают требованиям высокой плотности мощности и термостабильности. В потребительской электронике, такой как высокопроизводительные серверы и промышленные датчики, лёгкие подложки (толщина 0,6–1,2 мм $\pm$ 0,01 мм) и покрытие TiSiN используются для оптимизации эффективности производства (повышение > 20% $\pm$ 2%) и снижения затрат на обслуживание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(< 5% ± 1%). С развитием Индустрии 4.0 и возобновляемых источников энергии подложки ещё больше отвечают требованиям будущей высоконадёжной промышленной электроники и оборудования для зелёной энергетики благодаря многослойной конструкции и оптимизации с помощью искусственного интеллекта.

(5) Композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама-нитрида бора (WC-BN)

Что представляет собой композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама-нитрида бора (WC-BN)?

Композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама-нитрида бора (WC-BN) — это высокопроизводительный материал, предназначенный для терморегулирования прецизионных приборов и военной электроники. Он в основном используется для прецизионных приборов (таких как силовые модули литографии, оборудование для электронно-лучевого травления), военной электроники (например, процессоры сигналов РЛС, системы наведения ракет) и научно-исследовательского оборудования. Он изготовлен из WC и BN (нитрид бора, размер частиц 10-30 нм ± 1 нм, объемное соотношение 55:45 ± 1%) и изготовлен методом изостатического прессования (HIP, 1250 °C ± 10 °C, 160 МПа ± 5 МПа) для обеспечения плотности материала (пористость < 0,5% ± 0,1%) и термической стабильности. Теплопроводность подложки составляет 200 Вт/м·K ± 10 Вт/м·K, а изоляция > 10¹⁵ Ω·см ± 10¹⁴ Ω·см, толщина 0,3-0,5 мм ± 0,01 мм, коэффициент теплового расширения 4,2 × 10⁻⁶ /°C ± 0,5 × 10⁻⁶ /°C, высокая механическая прочность (прочность на сжатие > 3500 МПа ± 100 МПа). Подложка сочетает в себе сверхвысокую изоляцию BN и механическую прочность WC, подходит для сверхвысоких частотных применений (> 50 ГГц ± 5 ГГц) и экстремальных условий (-50 °C до 300 °C ± 10 °C, термостойкость > 600 часов ± 50 часов). Поверхность покрыта слоем AlN (толщина 1-2 мкм ± 0,05 мкм) для повышения влагостойкости (влагостойкость > 98% RH ± 1% RH) и термостойкости. Прочность сцепления интерфейса оптимизирована лазерной обработкой поверхности (прочность адгезии > 55 МПа ± 5 МПа). Сочетание многослойного градиентного композита (содержание BN 40%-60% ± 1%) и термоэлектрического изоляционного слоя (толщина 0,01-0,03 мм ± 0,001 мм) обеспечивает оптимальную теплопроводность (< 1,5 °C ± 0,2 °C) и снижение электромагнитных помех (< 0,1 дБ ± 0,01 дБ) благодаря технологии нанодисперсии, что позволяет соответствовать требованиям сверхвысокой точности и экстремальных условий эксплуатации.

Характеристики теплоотводящей подложки из композита карбида вольфрама-нитрида бора (WC-BN)

Подложка обладает высокой теплопроводностью (200 Вт/м·K ± 10 Вт/м·K), превосходной изоляцией (> 10¹⁵ Ω·см ± 10¹⁴ Ω·см), высокой механической прочностью (прочность на сжатие > 3500 МПа ± 100 МПа) и низким коэффициентом теплового расширения (4,2 × 10⁻⁶

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})$. Покрытие AlN улучшает влагостойкость ($>98\% \text{RH} \pm 1\% \text{RH}$) и термостойкость (>600 часов ± 50 часов), многослойная градиентная структура оптимизирует однородность теплопроводности ($<1,5^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$), а слой теплоизоляции снижает электромагнитные помехи ($<0,1 \text{ дБ} \pm 0,01 \text{ дБ}$). Технология наномасштабной дисперсии увеличивает долговечность ($>2 \times 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз), поддерживает сверхвысокие частоты ($>50 \text{ ГГц} \pm 5 \text{ ГГц}$) и экстремальный температурный диапазон (-50°C до $300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

Типы теплорассеивающих подложек из композитного материала карбид вольфрама-нитрид бора (WC-BN)

Стандартный субстрат

На основе WC-BN 55:45 и покрытия AlN он подходит для литографических силовых модулей толщиной $0,3-0,5 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и теплопроводностью $200 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

Высокотемпературный субстрат

Оптимизированная термостабильность (>600 часов ± 50 часов), термостойкость $>300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, подходит для оборудования электронно-лучевого травления.

Высокочастотный субстрат

Интегрированный слой термо- и электроизоляции ($0,01-0,03 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), поддерживает работу в диапазоне частот $>50 \text{ ГГц} \pm 5 \text{ ГГц}$ и уровень электромагнитных помех $<0,1 \text{ дБ} \pm 0,01 \text{ дБ}$.

Нано-улучшенные субстраты

При добавлении наноразмерной дисперсии (размер частиц $<10 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$) однородность теплопроводности составляет $<1,5^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, что подходит для систем наведения ракет.

Применение композитной теплорассеивающей подложки из карбида вольфрама-нитрида бора (WC-BN)

Композитные теплорассеивающие подложки из карбида вольфрама и нитрида бора (WC-BN) широко используются в высокоточных приборах, оборонной электронике и научных исследованиях. В полупроводниковом производстве эти подложки используются в силовых модулях оборудования для EUV-литографии и электронно-лучевого травления. Обладая сверхвысокой изоляцией ($>10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$) и теплопроводностью ($200 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), они соответствуют требованиям сверхвысокой точности при ширине линии $<2 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$. В оборонной электронике подложка используется в процессорах радиолокационных сигналов и системах наведения ракет, оптимизируя сверхвысокие частотные характеристики ($>50 \text{ ГГц} \pm 5 \text{ ГГц}$) и механическую прочность ($>3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), адаптируясь к экстремальным диапазонам температур (-50°C до $300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) и термостойкость (>600 часов ± 50 часов).

Научно-исследовательское оборудование, такое как экспериментальные устройства физики высоких энергий и квантовые вычислительные модули, использует легкую подложку (толщина $0,3-0,5 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и теплоизоляционный слой для снижения электромагнитных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

помех ($<0,1 \text{ дБ} \pm 0,01 \text{ дБ}$) и улучшения равномерности рассеивания тепла ($<1,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Авионика, такая как системы управления полетом и модули спутниковой связи, использует влагостойкость подложки ($> 98\%$ относительной влажности $\pm 1\%$ относительной влажности) и коррозионную стойкость для обеспечения надежности и долговечности аэрокосмического уровня ($> 2 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$). Интеллектуальное медицинское оборудование, такое как высокоточные системы МРТ и ультразвуковой визуализации, использует тепловое соответствие подложки и ее высокую механическую прочность для обеспечения биосовместимости и стабильной работы в условиях высоких температур.

Системы управления промышленной автоматикой и базовые станции связи используют градиентную конструкцию и технологию наноулучшения подложек для оптимизации эффективности производства (повышение $> 20\% \pm 2\%$) и снижения затрат на обслуживание ($< 5\% \pm 1\%$). Благодаря повышению точности литографии и миниатюризации оборонной электроники подложки могут дополнительно удовлетворить потребности будущих сверхточных приборов и электронного оборудования для экстремальных условий благодаря оптимизации на основе искусственного интеллекта и многослойным структурам, способствуя быстрому развитию полупроводниковых и оборонных технологий.

Тенденции развития и перспективы рынка теплорассеивающих подложек на основе карбида вольфрама

для этих подложек продолжает расти из-за высокой плотности интеграции электронных устройств ($>10^6 \text{ транзисторов/мм}^2 \pm 10^5 \text{ транзисторов/мм}^2$), повышенной плотности мощности ($>100 \text{ Вт/см}^2 \pm 10 \text{ Вт/см}^2$) и более высокой рабочей температуры ($>150 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$), особенно в областях связи следующего поколения (6G), новых энергетических транспортных средств (системы управления аккумуляторами, модули быстрой зарядки), микросхем искусственного интеллекта, промышленной автоматизации, оборонной электроники и интеллектуального медицинского оборудования. Итерация технологии теплорассеивающих подложек из цементированного карбида ускоряется с добавлением передовых производственных процессов (таких как дисперсия наночастиц, лазерная микрообработка, 3D-печать) и обработки поверхности (таких как покрытие CVD, плазменное напыление, ALD-осаждение), улучшение теплопроводности ($>300 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$), изоляции ($>10^{-1} \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), механической прочности ($>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и долговечности ($>10^7 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$). Ожидается, что размер рынка достигнет 3 млрд долларов США $\pm 300 \text{ млн}$, с ежегодным темпом роста 20%-25%, особенно в области быстрой зарядки электромобилей ($>350 \text{ кВт} \pm 10 \text{ кВт}$), радаров миллиметрового диапазона, квантового вычислительного оборудования и биомедицинской электроники. В будущем подложки будут развиваться в направлении интеллектуальности и устойчивости, интегрируя термодатчики для контроля температуры (точность $<0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$), адаптивную структуру теплоотвода (тепловое сопротивление $<0,1^{\circ}\text{C/Вт} \pm 0,01^{\circ}\text{C/Вт}$) и перерабатываемую конструкцию (содержание тяжелых металлов $<0,5\% \pm 0,1\%$), чтобы отвечать многочисленным требованиям электронной промышленности к эффективному теплоотводу, высокой надежности и защите

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окружающей среды. В то же время, корректировка глобальных цепочек поставок и региональное производство (например, Восточный Китай, Германия в Европе и Кремниевая долина в США) будут способствовать дальнейшей оптимизации структуры отрасли производства подложек и международному сотрудничеству.

В этом разделе рассматриваются два аспекта: формы из твердого сплава и теплоотводящие подложки, а также оптимизация проводимости твердого сплава. Объединяя теоретические механизмы, экспериментальные данные и отраслевые тенденции, этот раздел глубоко анализирует эксплуатационные характеристики и направления совершенствования, предоставляя комплексную теоретическую и практическую основу для новых приложений.

14.1.3 Технология, принципы и усовершенствования твердосплавных штампов и теплорассеивающих подложек

Технология и применение твердосплавных форм и теплорассеивающих подложек

Твердосплавные матрицы и радиаторы играют жизненно важную роль в электронной промышленности, обеспечивая прецизионное производство и эффективное управление тепловым режимом соответственно. Твердосплавные матрицы широко используются в корпусировании микросхем, штамповке микроразъемов, прецизионной обработке на уровне полупроводников, штамповке печатных плат и в таких новых областях, как гибкая электроника и микроэлектромеханические системы (МЭМС). Эти матрицы требуют высокой точности размеров ($<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), превосходной износостойкости (скорость износа $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), превосходной усталостной прочности (усталостная долговечность $>10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и высокой термостойкости (термостойкость $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).

Теплоотводящие подложки используются в мощных электронных устройствах, включая силовые полупроводники (например, IGBT, MOSFET), лазерные диоды, модули связи 5G/6G, инверторы для электромобилей и чипы искусственного интеллекта. Они должны обеспечивать эффективное тепловое управление (эффективность теплоотвода $>90\% \pm 2\%$), низкое тепловое сопротивление ($<0,1 \text{ К} \cdot \text{см}^2/\text{Вт} \pm 0,01 \text{ К} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$) и отличную изоляцию (объемное сопротивление $>10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$), чтобы гарантировать высокую плотность мощности ($>100 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 10 \text{ Вт}/\text{см}^2$) и стабильную работу в условиях высоких температур ($>150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

Материалы и свойства твердосплавных форм и теплорассеивающих подложек

Основной материал для изготовления форм из твердого сплава и теплоотводящих подложек изготовлен на основе системы WC-Co с содержанием кобальта (Co) от 6% до $10\% \pm 1\%$. Размер зерна твердосплавного сырья строго контролируется и составляет $0,5\text{--}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Для повышения теплопроводности ($>100 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$) в матрицу вводят примеси меди (Cu, $1\text{--}5\% \pm 0,5\%$) или никеля (Ni, $2\text{--}8\% \pm 0,5\%$). Кроме того, для повышения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термостойкости ($>900^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) и термостойкости ($>10^4$ раз $\pm 10^3$ раз) добавляют карбид титана (TiC, $2-5\% \pm 0,5\%$) или карбид тантала (TaC, $1-3\% \pm 0,5\%$).

Технология изготовления и обработки поверхности твердосплавных форм и теплоотводящих подложек

В процессе производства используется передовая технология спекания. Искровое плазменное спекание (ИСС) при температуре $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ и давлении $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$ обеспечивает быстрое спекание и оптимизацию микроструктуры, а горячее изостатическое прессование (ГИП) при температуре $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ и давлении $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$ обеспечивает однородность и плотность материала (пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$). Поверхность дополнительно улучшена покрытием, нанесенным методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) (например, TiN, CrN или AlTiN, толщина $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для дальнейшего повышения износостойкости (твердость до $\text{HV } 2000 \pm 50$), стойкости к окислению (скорость коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и смазывающей способности (коэффициент трения $<0,2 \pm 0,02$). Быстрый нагрев SPS ($<10 \text{ мин} \pm 1 \text{ мин}$) и равномерное давление HIP позволяют минимизировать микропоры (размер пор $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), разделение фаз и дефекты границ зерен, а также улучшить механические свойства (прочность на сжатие $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), теплопроводность ($>120 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$) и срок службы ($>10^6$ раз $\pm 10^4$ раз).

Технология химико-механической полировки (ХМП) используется на некоторых подложках для оптимизации шероховатости поверхности ($\text{Ra} <0,1 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$) и повышения эффективности теплового контакта с электронными компонентами (тепловое сопротивление контакта $<0,05 \text{ K}\cdot\text{см}^2/\text{Вт} \pm 0,005 \text{ K}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$).

Международные стандарты для твердосплавных форм и теплоотводящих подложек

Оценка эксплуатационных характеристик твердосплавных пресс-форм и радиаторов соответствует ряду международных стандартов для обеспечения их надежного применения в электронной промышленности. Твердость проверяется в соответствии с ASTM E92 (точность $\pm 30 \text{ HV}$), скорость износа измеряется в соответствии с ASTM G65 (точность $\pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$), теплопроводность оценивается в соответствии с ASTM E1461 (точность $\pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$), срок службы проверяется циклическими испытаниями на месте (точность $\pm 10^4$ раз), коэффициент теплового расширения измеряется в соответствии с ASTM E228 (точность $\pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), электроизоляция проверяется в соответствии с IEC 60167 (точность $\pm 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Например, формула WC-8Co-2Cu имеет твердость $\text{HV } 1800 \pm 30$, теплопроводность $120 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$, коэффициент теплового расширения $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, срок службы формы около 10^6 раз $\pm 10^5$ раз и эффективность рассеивания тепла $92\% \pm 2\%$, что значительно лучше, чем у традиционной формулы WC-10Co (теплопроводность $100 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$, эффективность $88\% \pm 2\%$). Улучшение ее характеристик обусловлено тепловой сетью, образованной легированием Cu и эффектом диффузионного упрочнения TiC. В связи с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

растущей потребностью в миниатюризации и повышении мощности электронных устройств в производство некоторых теплорассеивающих субстратов был введен стандарт ISO 13485 (Система менеджмента качества для медицинских приборов), призванный гарантировать биосовместимость и надежность, особенно в интеллектуальном медицинском оборудовании.

Основной механизм работы твердосплавной пресс-формы и теплорассеивающей подложки

Механизм работы и функции многофазной композитной структуры из твердого сплава

Свойства твердого сплава обусловлены его многофазной композитной структурой, в которой WC (содержание $>90\% \pm 1\%$) в качестве твердой фазы обеспечивает высокую твердость (HV 1800 ± 30) и износостойкость (износ $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$). Размер зерна ($0,5\text{--}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) повышает прочность (предел прочности на разрыв $>1500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и износостойкость за счет эффекта Холла-Петча, снижая ухудшение характеристик, вызванное диффузией по границам зерен. Содержание Co ($6\text{--}10\% \pm 1\%$) действует как связующая фаза для повышения ударной вязкости (вязкость разрушения K_{IC} $10\text{--}15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и трещиностойкости (скорость роста трещины $< 0,01 \text{ мм/цикл} \pm 0,001 \text{ мм/цикл}$), поглощая энергию за счет пластической деформации. Легирование Cu/Ni (объемная доля $2\text{--}8\% \pm 0,5\%$) образует электро- и теплопроводящую сеть, увеличивая теплопроводность примерно на $20\% \pm 3\%$ (со $100 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ до $120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$). Легирование TiC ($2\text{--}5\% \pm 0,5\%$) повышает высокотемпературную твердость ($> \text{HV } 1900 \pm 30$ при $600^\circ \text{C} \pm 20^\circ \text{C}$) и сопротивление термической усталости ($> 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз) за счет дисперсионного упрочнения. Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показывает, что поверхность износа формы WC-8Co-2Cu гладкая (шероховатость $R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) подтверждает равномерное распределение Cu (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а рентгеновская дифракция (РД) обнаруживает дисперсное распределение фазы TiC (расстояние между зернами $< 0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), что повышает высокотемпературную стабильность материала.

Теоретически низкое удельное сопротивление Cu/Ni ($< 2 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) снижает тепловое сопротивление за счет электрон-фононного рассеяния, а низкие характеристики теплового расширения системы WC-Co ($< 6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) обеспечивают структурную целостность при термических циклах (скорость деформации $< 0,01\% \pm 0,001\%$). Покрытие PVD повышает показатель коррозионной стойкости до $> 90\% \pm 2\%$ за счет образования плотного защитного слоя (толщина $5\text{--}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, плотность $> 98\% \pm 1\%$), значительно продлевая срок службы ($> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз), а также за счет снижения поверхностной энергии ($< 40 \text{ мДж/м}^2 \pm 5 \text{ мДж/м}^2$) для уменьшения прилипания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Механизм терморегулирования теплорассеивающей подложки и ее синергия материалов

Механизм терморегулирования подложки радиатора основан на синергетическом эффекте многофазных композитных материалов. WC выступает в качестве каркаса, обеспечивая механическую поддержку и высокую термостойкость ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), фаза Si действует как теплопроводящая сеть для быстрой передачи тепла (коэффициент термодиффузии $>50\text{ мм}^2/\text{с} \pm 5\text{ мм}^2/\text{с}$), а фаза AlN или алмаз дополнительно улучшает локальную теплопроводность и изоляцию ($>10^{13}\text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{12}\text{ Ом}\cdot\text{см}$). Снижение теплового сопротивления ($<0,1\text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт} \pm 0,01\text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$) обусловлено оптимизацией интерфейса (например, тепловое контактное сопротивление интерфейса Cu-WC составляет $<0,01\text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт} \pm 0,001\text{ К}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$) и уменьшением микропор ($<0,05\% \pm 0,01\%$). Анализ инфракрасного тепловидения показывает, что композитная подложка WC-Cu имеет низкую теплопроводность при $50\text{ Вт}/\text{см}^2$. При плотности мощности $\pm 5\text{ Вт}/\text{см}^2$ однородность температуры поверхности составляет $<5^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а эффективность рассеивания тепла — $92\% \pm 2\%$, что лучше, чем у традиционной подложки Al_2O_3 (эффективность $80\% \pm 2\%$). Кроме того, соответствие коэффициенту теплового расширения ($<0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) снижает тепловое напряжение ($<10\text{ МПа} \pm 1\text{ МПа}$) с кремниевым кристаллом (коэффициент теплового расширения $3,5\text{--}4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), повышая долговременную надежность ($>10^5\text{ часов} \pm 10^4\text{ часов}$).

Основные факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики твердосплавных форм и теплоотводящих подложек

Влияние содержания Cu/Ni в твердом сплаве на свойства

Содержание Cu/Ni ($1\text{--}5\text{--}0,5\text{ }\%$) улучшает тепло- и электропроводность (теплопроводность $>120\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К} \pm 5\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$, электропроводность $>10^6\text{ См}/\text{м} \pm 10^5\text{ См}/\text{м}$) за счет формирования электро- и теплопроводящей сети, но содержание $>10\% \pm 0,5\%$ приводит к снижению твердости примерно на $10\% \pm 2\%$ (с $\text{HV } 1800 \pm 30$ до $\text{HV } 1600 \pm 30$) и увеличению коэффициента теплового расширения ($>7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), влияя на точность пресс-формы (отклонение $>0,01\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$) и термоциклическую стабильность теплорассеивающей подложки. (степень деформации $>0,02\% \pm 0,002\%$). Оптимизация соотношения (например, WC-8Co-2Cu) позволяет повысить теплопроводность на $20\% \pm 3\%$ при сохранении твердости ($\text{HV } 1800 \pm 30$).

Контроль размера зерна твердосплавного сырья на производительность

Размер зерна ($0,5\text{--}1\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$) обеспечивает износостойкость и теплопроводность за счет эффекта Холла-Петча (скорость износа $< 0,05\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, теплопроводность $>120\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К} \pm 5\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$), но $> 2\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$ увеличит скорость износа примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $0,055\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$), а теплопроводность снизится примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $114\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К} \pm 5\text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$) из-за увеличения рассеяния по границам

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

зерен и сокращения путей теплопроводности. Наноразмерные зерна (например, 0,2–0,5 мкм $\pm$ 0,01 мкм) были получены с помощью шаровой мельницы и процессов SPS, что еще больше повысило твердость ($>HV\ 1900 \pm 30$) и долговечность ($>1,5 \times 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз), что подходит для сверхточной обработки.

Балансирующий эффект содержания Co в твердом сплаве на производительность

Содержание Co (6%-10% $\pm$ 1%) обеспечивает баланс между ударной вязкостью и твердостью (твердость $HV\ 1800 \pm 30$, ударная вязкость $K_{IC}\ 12\ \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), $<6\% \pm 1\%$ увеличивает скорость образования трещин примерно на $10\% \pm 2\%$ (длина трещин $>0,05\ \text{мм} \pm 0,01\ \text{мм}$), $>12\% \pm 1\%$ снижает твердость примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $HV\ 1700 \pm 30$) и теплопроводность примерно на $3\% \pm 1\%$ (до $116\ \text{Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5\ \text{Вт/м} \cdot \text{К}$). Оптимизация содержания Co (например, $8\% \pm 0,5\%$) приводит к пористости $<0,05\% \pm 0,01\%$ при SPS-процессе, что гарантирует высокую надежность форм и подложек.

Оптимизация влияния процесса спекания твердого сплава на производительность

Пористость твердого сплава, полученного методом SPS, составляет $<0,1\% \pm 0,01\%$ (время спекания $<5\ \text{мин} \pm 0,5\ \text{мин}$), а ГИП дополнительно снижает ее до $<0,05\% \pm 0,01\%$ (равномерность давления $>95\% \pm 2\%$). Теплопроводность при традиционном спекании (компактирование + высокотемпературное спекание, $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) снижается примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $108\ \text{Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5\ \text{Вт/м} \cdot \text{К}$) из-за повышенной пористости ($>0,2\% \pm 0,02\%$) и фазовой неоднородности (агломерация WC $>5\% \pm 1\%$). Комбинированный процесс SPS в сочетании с НР позволяет увеличить теплопроводность до $125\ \text{Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5\ \text{Вт/м} \cdot \text{К}$, что подходит для высокоэффективных теплорассеивающих подложек.

Влияние условий нагружения твердого сплава на стабильность его работоспособности

Стабильная работа в условиях нагрузки $100\text{-}1000\ \text{Н} \pm 10\ \text{Н}$ (скорость износа $<0,05\ \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\ \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, деформация $<0,01\% \pm 0,001\%$), $>5000\ \text{Н} \pm 10\ \text{Н}$ приводит к увеличению износа примерно на $15\% \pm 3\%$ (до $0,057\ \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\ \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) и образованию микротрещин (длина $>0,02\ \text{мм} \pm 0,005\ \text{мм}$), $>10000\ \text{Н} \pm 10\ \text{Н}$ может привести к разрушению материала (скорость разрушения $>5\% \pm 1\%$). Например, WC-10Co (без легирования Cu) имеет теплопроводность всего $100\ \text{Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5\ \text{Вт/м} \cdot \text{К}$ и коэффициент теплового расширения $6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при нагрузке $5000\ \text{Н} \pm 10\ \text{Н}$, тогда как WC-8Co-2Cu остается стабильным в тех же условиях (теплопроводность $120\ \text{Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5\ \text{Вт/м} \cdot \text{К}$, коэффициент теплового расширения $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$).

Влияние факторов окружающей среды на срок службы твердого сплава и его защиту

Влажность окружающей среды ($>90\% \pm 2\%$ относительной влажности), температура ($>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и агрессивные среды (например, раствор HCl) ускоряют деградацию материала.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Покрытие PVD может продлить срок службы более чем в 10^6 раз $\pm 10^4$ раз, в то время как срок службы традиционных подложек без покрытия сокращается до $<5 \times 10^5$ раз $\pm 10^4$ раз. К 2025 году экологичное производство требует сокращения использования Co ($<5\% \pm 0,5\%$) и стимулирует исследования по замещению Ni или Cr для соблюдения экологических норм (таких как стандарты RoHS).

Направление оптимизации и улучшения характеристик твердосплавной формы и теплоотводящей подложки

Стратегия оптимизации твердосплавных материалов и корректировка рецептуры

Оптимизация производительности начинается с точной корректировки рецептуры материала. Содержание Co контролируется на уровне $6\%-10\% \pm 1\%$ для обеспечения ударной вязкости (вязкость разрушения K_{IC} с $10-15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$) и трещиностойкости (скорость роста трещин $<0,01 \text{ мм/цикл} \pm 0,001 \text{ мм/цикл}$) в качестве связующей фазы, количество легирования Si устанавливается на уровне $1\%-5\% \pm 0,5\%$ для формирования теплопроводящей сети (теплопроводность увеличивается до $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), а количество легирования TiC составляет $2\%-5\% \pm 0,5\%$ для улучшения высокотемпературной твердости ($>HV 1900 \pm 30$ при $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) и сопротивления термической усталости ($>10^5$ раз $\pm 10^4$ раз) за счет дисперсионного упрочнения. Карбид ванадия (VC, $0,2\% \pm 0,01\%$) и TaC ($0,1\% \pm 0,01\%$) были введены в качестве ингибиторов роста зерна для поддержания размера зерна на уровне $0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и оптимизации эффекта Холла-Петча для повышения прочности ($>1500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и износостойкости (скорость износа снизилась до $0,03 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$).

Для дальнейшего повышения производительности можно исследовать наномасштабные армирующие фазы (например, нанопорошок WC, размер частиц $<100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$, содержание $0,5\% -1\% \pm 0,1\%$) для уменьшения дефектов границ зерен ($<0,01\% \pm 0,001\%$) за счет равномерного распределения, улучшения теплопроводности ($>130 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) и эффективности рассеивания тепла ($>94\% \pm 2\%$). В 2025 году в связи с ужесточением требований по охране окружающей среды в некоторых рецептурах попытаются заменить часть Co на Ni или Cr (коэффициент замены $<20\% \pm 2\%$), чтобы снизить содержание тяжелых металлов ($<0,5\% \pm 0,1\%$), соответствовать стандартам RoHS и REACH, сохранив при этом механические свойства (твердость HV 1800 ± 30 , вязкость K_{IC} $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$).

Усовершенствование и технологические инновации процесса производства твердосплавных изделий

Оптимизация производственного процесса является ключом к улучшению характеристик твердого сплава. Искровое плазменное спекание (ИПС, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) в сочетании с горячим изостатическим прессованием (ГИП, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) может значительно оптимизировать микроструктуру. ИПС снижает пористость ($<0,1\% \pm 0,01\%$) и фазовое разделение (агломерация WC $<2\% \pm 0,5\%$) за счет быстрого нагрева (<10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мин ± 1 мин) и спекания под высоким давлением. ГИП дополнительно уменьшает микропоры (диаметр пор $<0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и улучшает плотность ($>99\% \pm 0,5\%$) за счет равномерного давления ($>95\% \pm 2\%$). Для удаления поверхностных окислов и загрязнений внедрена технология плазменной очистки (мощность $500 \text{ Вт} \pm 50 \text{ Вт}$, время $5-10 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$), что позволило эффективно уменьшить толщину оксидного слоя ($<0,01 \text{ мкм} \pm 0,001 \text{ мкм}$) и улучшить адгезию последующих покрытий ($>60 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$).

Кроме того, микроволновое спекание ($1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) может быть исследовано как низкоэнергетическая альтернатива для сокращения времени спекания ($<5 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$) и улучшения равномерности распределения теплопроводящей фазы (например, Cu) (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$), а теплопроводность может достигать $125 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. В 2025 году технология аддитивного производства (например, селективное лазерное плавление SLM, толщина слоя $20-50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) начала применяться для производства форм и подложек сложной структуры, интегрируя микроканалы (диаметром $0,02-0,05 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) или сотовые сети теплоотвода, что значительно повышает эффективность теплоотвода ($>95\% \pm 2\%$) и устойчивость к термоциклированию ($>6000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$).

Оптимизация и улучшение функций обработки поверхности твердосплавных материалов

Оптимизация обработки поверхности напрямую влияет на долговечность и теплоотдачу твердого сплава. Технология прецизионной полировки (например, химико-механическая полировка (ХМП)) обеспечивает шероховатость поверхности до $Ra <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, снижает тепловое контактное сопротивление ($<0,05 \text{ К} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт} \pm 0,005 \text{ К} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт}$) и повышает эффективность соединения с электронными компонентами ($>98\% \pm 1\%$). Нанесение многослойного PVD-покрытия (например, TiN / CrN или AlTiN, толщиной $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, с использованием технологии многодуговой ионной гальванизации) позволяет повысить износостойкость примерно на $10\% \pm 2\%$ (скорость износа снижается до $0,027 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$), коррозионную стойкость (испытание в соляном тумане $> 600 \text{ часов} \pm 50 \text{ часов}$) и высокотемпературную стабильность ($> 900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) улучшают примерно на $15\% \pm 2\%$, а скорость окисления ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) снижают за счет формирования плотного защитного слоя (плотность $> 98\% \pm 1\%$).

Чтобы справиться со сложными условиями, можно использовать нанокompозитные покрытия (например, TiN / Al_2O_3 , толщина $10-20 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) или самовосстанавливающиеся покрытия (содержащие микрокапсулы, скорость восстановления $>90\% \pm 2\%$) для автоматического восстановления поверхности при износе или появлении трещин (глубина ремонта $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), продлевая срок службы до $>1,5 \times 10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$. В 2025 году технология функционализации поверхности (такая как лазерное микротекстурирование, шероховатость $Ra 0,05-0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) использовалась для повышения гидрофильности (угол контакта $<30^\circ \pm 5^\circ$) и смазывающей способности (коэффициент трения $<0,15 \pm 0,02$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплорассеивающих подложек, а также для оптимизации характеристик терморегулирования высокомоощных устройств (таких как GaN HEMT).

Метод испытания и проверки эксплуатационных характеристик твердого сплава и анализ результатов

Оптимизация производительности должна быть подтверждена стандартизированными испытаниями и передовыми аналитическими методами. Твердость проверяется в соответствии со стандартом ASTM E92 (точность ± 30 HV), теплопроводность измеряется в соответствии со стандартом ASTM E1461 (точность ± 5 Вт/м·К), коэффициент теплового расширения оценивается в соответствии со стандартом ASTM E228 (точность $\pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), дополняясь испытанием на термоциклирование ($500^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, 1000 раз ± 50 раз) для проверки долговечности и термической стабильности (скорость деформации $< 0,01\% \pm 0,001\%$), а также рентгеноструктурным анализом (XRD) фазовой стабильности (чистота кристаллической фазы $> 95\% \pm 2\%$).

Проверка: Морфологию, распределение состава и характеристики границ зерен анализировали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС, отклонение состава $< 0,1\% \pm 0,02\%$) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, разрешение границ зерен $< 0,01$ мкм $\pm 0,001$ мкм). Например, скорость износа состава WC-8Co-2Cu-3TiC (размер зерна $0,5$ мкм $\pm 0,01$ мкм) составляет $0,03$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м, теплопроводность 125 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К, эффективность рассеивания тепла $93\% \pm 2\%$, что лучше, чем у традиционного WC-10Co (скорость износа $0,05$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м, теплопроводность 100 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К). Будущие направления исследований включают армирование наночастицами (например, нанопорошок WC, размер частиц < 100 нм ± 10 нм, содержание $1\% \pm 0,1\%$) для дальнейшего снижения скорости износа ($< 0,02$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м) и улучшение теплопроводности (> 140 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К), а также разработку интеллектуальных покрытий (например, самовосстанавливающихся покрытий с наносенсорами, время отклика $< 0,1$ с $\pm 0,01$ с), чтобы справляться с более высокими плотностями мощности (> 200 Вт/см²) ± 20 Вт/см²) и сложными условиями (например, высокой влажностью $> 95\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$).

Направление и тенденция будущего развития технологии пресс-форм из твердого сплава и теплорассеивающих подложек

В 2025 году оптимизация форм из твердого сплава и теплорассеивающих подложек будет сосредоточена на многофункциональной интеграции и интеллекте. Внедрение термоэлектрических материалов (таких как Bi₂Te₃, содержание $0,5\text{--}1\% \pm 0,1\%$) обеспечивает автономное питание (выходное напряжение $> 0,1$ В $\pm 0,01$ В), интегрированные датчики (точность $< 0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$) позволяют контролировать температуру и напряжение (< 10 МПа ± 1 МПа) в режиме реального времени, а также оптимизировать путь теплового потока с помощью алгоритма искусственного интеллекта (тепловое сопротивление $< 0,05$ К·см²/Вт $\pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,005 K·cm²/Вт). С точки зрения устойчивого развития, для удовлетворения требований охраны окружающей среды и контроля затрат в электронной промышленности используются перерабатываемая формула (содержание тяжелых металлов <0,5% ± 0,1%) и низкоуглеродный процесс (снижение энергопотребления >10% ± 2%). Эти инновации будут способствовать широкому применению твердого сплава в системах связи 6G, квантовых вычислениях и интеллектуальных медицинских устройствах.



14.1.2 Оптимизация электропроводности твердого сплава

Основные принципы и технический обзор электропроводности твердого сплава

Оптимизация проводимости твердого сплава направлена на удовлетворение потребностей в теплорассеивающих подложках, электродных материалах и компонентах электромагнитного экранирования для низкого удельного сопротивления ($<10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и высокой проводимости, и подходит для модулей связи 5G/6G, чипов искусственного интеллекта и электроники новых источников энергии для транспортных средств. Оптимизация проводимости снижает удельное сопротивление путем легирования Cu ($1\%-5\% \pm 0,5\%$), Ni ($2\%-8\% \pm 0,5\%$) или графита ($0,5\%-2\% \pm 0,1\%$). Подложка представляет собой систему WC-Co (содержание Co $6\%-10\% \pm 1\%$), а размер зерна исходного твердого сплава контролируется в диапазоне $0,5\text{-}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ для уменьшения рассеяния по границам зерен.

В процессе производства используется технология горячего прессования и спекания ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $30 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или технология спекания с помощью поля (FAST, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) для обеспечения равномерного распределения проводящих фаз (например, Cu) (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$) и микроструктурной плотности (пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$). Оптимизация проводимости основана на вкладе свободных электронов металлической фазы (концентрация электронов $> 10^{22} \text{ см}^{-3} \pm 10^{21} \text{ см}^{-3}$), минимизации эффектов границ зерен и наномасштабном распределении дисперсной легированной фазы, что теоретически близко к уровню производительности чистого металла Cu (удельное сопротивление $1,68 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) или Ag (удельное сопротивление $1,59 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$). В 2025 году, с расширением 5G до 6G (частота $> 100 \text{ ГГц} \pm 10 \text{ ГГц}$) и растущим спросом на низкие потери сигнала ($< 0,5 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$ при $10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$) в чипах искусственного интеллекта, оптимизация проводимости твердого сплава станет ключевым направлением для содействия технологической модернизации в электронной промышленности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Удельное сопротивление измеряли четырёхзондовым методом (точность $\pm 0,1$ мкОм·см), твердость – по ASTM E92 (точность ± 30 HV), а теплопроводность – по ASTM E1461 (точность ± 5 Вт/м·К). Микроструктуру анализировали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, разрешение $< 0,01$ мкм $\pm 0,001$ мкм).

Например, формула WC-8Co-2Cu имеет удельное сопротивление 8 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см, твердость HV 1800 ± 30 и теплопроводность 120 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К, что лучше, чем у WC-10Co (удельное сопротивление 12 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см, теплопроводность 100 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К).

Механизм электропроводности и анализ характеристик твердого сплава

Механизм проводимости твердого сплава основан на синергетическом эффекте многофазной структуры. Легирование Cu/Ni ($1-5 \pm 0,5$ %) вводит фазу с низким сопротивлением (< 2 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см), снижает удельное сопротивление примерно на 20 ± 3 % (с 12 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см до 8 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см) за счет электрон-фононного рассеяния, а размер зерна исходного твердого сплава ($0,5-1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) оптимизирует подвижность электронов ($> 10^5$ см²/В·с $\pm 10^4$ см²/В·с) за счет снижения рассеяния на границах зерен.

Легирование графитом ($0,5-2 \pm 0,1$ %) дополнительно усиливает электронную проводимость через систему π -электронов (доля вклада $> 15 \pm 2$ %), WC ($> 90 \pm 1$ %) сохраняет высокую твердость (HV 1800 ± 30) и механическую прочность (прочность на сжатие $> 3000 \pm 100$ МПа), а содержание Co ($6-10 \pm 1$ %) усиливает межфазные связи ($K_{IC} 10-15$ МПа·м^{1/2} $\pm 0,5$) и обеспечивает дополнительные проводящие пути (вклад удельного сопротивления < 1 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см).

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) показывает, что частицы Cu в WC-8Co-2Cu являются однородными (диаметр < 1 мкм $\pm 0,1$ мкм, отклонение распределения $< 0,1\% \pm 0,02\%$), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) выявляет наномасштабное дисперсное распределение фазы Cu на границе зерен (размер частиц $< 0,5$ мкм $\pm 0,01$ мкм), а энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) подтверждает элементную однородность (отклонение содержания Cu $< 0,05\% \pm 0,01\%$). С физической точки зрения, легированная фаза образует непрерывную проводящую сеть, длина свободного пробега электронов увеличивается (> 100 нм ± 10 нм), а теплопроводность достигает 120 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К, что лучше, чем у WC-10Co (12 мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см).

Кроме того, легирование снижает контактное сопротивление ($< 0,01$ Ом·см² $\pm 0,001$ Ом·см²), улучшает электрические характеристики контакта и снижает потери сигнала в высокочастотных приложениях (< 1 дБ $\pm 0,1$ дБ на частоте 5 ГГц $\pm 0,1$ ГГц), что соответствует потребностям базовых станций и центров обработки данных 5G.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Анализ факторов, влияющих на проводимость твердого сплава

Содержание Cu/Ni в твердом сплаве

Содержание Cu/Ni ($1-5 \pm 0,5\%$) снижает удельное сопротивление за счет фазы с низким сопротивлением ($< 2 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), $> 10 \pm 0,5\%$ вызывает снижение твердости примерно на $10 \pm 2\%$ (с HV 1800 ± 30 до HV 1600 ± 30) и увеличение коэффициента теплового расширения ($> 7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), влияя на структурную стабильность (скорость деформации $> 0,02 \pm 0,002\%$) и эксплуатационные характеристики при высоких температурах ($> 200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$). Оптимизация соотношения (например, WC-8Co-2Cu) снижает удельное сопротивление до $8 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ при сохранении твердости (HV 1800 ± 30).

Размер зерна твердосплавного сырья

Размер зерна ($0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) оптимизирует электропроводность (удельное сопротивление $< 10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) за счет снижения рассеяния по границам зерен, а $> 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ приводит к увеличению удельного сопротивления примерно на $10\% \pm 2\%$ (до $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и снижению теплопроводности примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $114 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) из-за повышенного рассеяния и увеличения дефектов на границах зерен. Наноразмерные зерна (например, $0,2-0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) достигаются с помощью шаровой мельницы и процессов FAST, что еще больше снижает удельное сопротивление ($< 7 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и улучшает теплопроводность ($> 125 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$).

Процесс спекания твердого сплава

Температура спекания $1400-1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ сохраняет низкую пористость ($< 0,1\% \pm 0,01\%$) и однородность проводящей фазы. $> 1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению улетучивания Cu примерно на $10\% \pm 2\%$ (потери $> 0,5\% \pm 0,1\%$) и вызывает флуктуацию удельного сопротивления ($> 10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$). Процесс FAST дополнительно снижает удельное сопротивление до $< 7 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ за счет быстрого нагрева ($< 5 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$) и высокого давления ($40 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), что лучше, чем традиционное спекание горячим прессованием (удельное сопротивление $9 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$).

Содержание Co в твердом сплаве

Содержание Co ($6-10 \pm 1\%$) обеспечивает баланс между проводимостью, твердостью и вязкостью (удельное сопротивление $< 10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, $K_{\text{I}} \text{ с } 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). При $< 6 \pm 1\%$ вязкость снижается примерно на $10 \pm 2\%$ ($K_{\text{I}} \text{ с } 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). При $> 12 \pm 1\%$ удельное сопротивление увеличивается примерно на $5 \pm 1\%$ (до $10,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), а твердость снижается примерно на $5 \pm 1\%$ (до HV 1700 ± 30).

Условия нагружения для твердого сплава

Удельное сопротивление стабильно при температуре окружающей среды $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($< 10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и увеличивается примерно на $5\% \pm 1\%$ (до $10,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) при $> 100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ и увеличивается до $10\% \pm 2\%$ (до $11 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

при $>200^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ из-за усиления теплового рассеяния электронов и размягчения фазы Cu. При нагрузке $>5000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$ удельное сопротивление колеблется на $<5\% \pm 1\%$, а $>10000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$ может привести к образованию микротрещин (длиной $>0,02 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$), влияющих на устойчивость проводимости.

Факторы окружающей среды

Влажность ($>90\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$) вызывает окисление поверхности (увеличение удельного сопротивления $>5\% \pm 1\%$), высокая температура ($>200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) ускоряет улетучивание Cu (потеря $>0,3\% \pm 0,1\%$), а покрытие PVD может повысить стабильность удельного сопротивления до $>95\% \pm 2\%$.

Направление оптимизации и улучшения электропроводности твердого сплава

Для достижения удельного сопротивления $<10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, твердости $>1800 \pm 30$ и потерь сигнала $<1 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$ на частоте $5 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$ требуется комплексная оптимизация материалов, процессов и технологий обработки поверхностей.

Оптимизация материалов

Содержание Cu/Ni устанавливается в диапазоне $1-5 \pm 0,5\%$ или Ni $2-8 \pm 0,5\%$, VC ($0,2 \pm 0,01\%$) и Cr_3C_2 ($0,1 \pm 0,01\%$) добавляются для подавления роста зерен (размер $<0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и повышения стойкости к окислению (коррозионная стойкость $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), а наночастицы Ag ($0,5-1 \pm 0,1\%$, размер частиц $<50 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$) вводятся для улучшения проводимости (удельное сопротивление снижается до $<7 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и высокочастотных характеристик (потеря сигнала $<0,4 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$ при $10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$). Углеродные нанотрубки (УНТ, содержание $0,2\%-0,5\% \pm 0,1\%$) могут быть использованы в качестве новой фазы улучшения проводимости для дальнейшего снижения удельного сопротивления ($<5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$).

Улучшение процесса

Горячее прессование и спекание ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $30 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) в сочетании с FAST ($1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $40 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) оптимизировали микроструктуру, снизили пористость ($<0,05\% \pm 0,01\%$) и агломерацию проводящей фазы ($<1\% \pm 0,2\%$). Микроволновое спекание ($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $20 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) было введено для снижения потребления энергии ($>10\% \pm 2\%$) и улучшения распределения проводящей фазы (однородность $>98\% \pm 1\%$), а импульсное токовое спекание (PCAS, плотность тока $100 \text{ А/см}^2 \pm 10 \text{ А/см}^2$) использовалось для повышения проводимости границ зерен (вклад сопротивления $<0,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$). В 2025 году технология 3D-печати (такая как SLM, толщина слоя $20-50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) может настраивать структуры проводящей сети и оптимизировать передачу высокочастотного сигнала (потери $<0,3 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$ при $10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$).

Улучшение поверхности

Нанесение нанопокртия Au или Ag (толщина $2-5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, электрохимическое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

осаждение или PVD) в сочетании со слоем графена (толщина $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, проводимость $> 10^7 \text{ См/м} \pm 10^6 \text{ См/м}$) снижает контактное сопротивление ($< 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 \pm 0,001 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), повышает коррозионную стойкость примерно на $15\% \pm 2\%$ (испытание в соляном тумане $> 700 \text{ часов} \pm 50 \text{ часов}$) и оптимизирует высокочастотные характеристики до $< 0,5 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$ на частоте $5 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$. Внедрение адаптивных проводящих покрытий (таких как нанокompозитные покрытия, содержащие проводящие полимеры, со временем отклика $< 0,05 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$) позволяет автоматически регулировать удельное сопротивление (колебание $< 2\% \pm 0,5\%$) при изменении температуры ($> 100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), повышая долговременную стабильность.

Тестирование и проверка

Удельное сопротивление измерялось четырехзондовым методом (точность $\pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), теплопроводность — по ASTM E1461 (точность $\pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), а электропроводность — по ASTM B193 (точность $\pm 0,01 \text{ См/см}$), дополненными высокочастотным тестированием (анализатор цепей, $5\text{--}10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$, точность потерь $\pm 0,01 \text{ дБ}$) и термическим моделированием ($200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $500 \text{ часов} \pm 10 \text{ часов}$, стабильность $> 95\% \pm 2\%$). Распределение проводящей фазы, характеристики границ зерен и характеристики миграции электронов анализировались с помощью СЭМ (разрешение морфологии $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), ТЭМ (разрешение границ зерен $< 0,01 \text{ мкм} \pm 0,001 \text{ мкм}$) и спектроскопии потерь энергии электронами (СПЭЭ, точность электронной структуры $< 0,1 \text{ эВ} \pm 0,01 \text{ эВ}$). Например, формула WC-8Co-2Cu-0.5Ag (размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) имеет удельное сопротивление $7,5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, твердость HV 1850 ± 30 и потери сигнала $0,4 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$ на частоте $5 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$, что лучше, чем у WC-10Co (удельное сопротивление $12 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, потери $2 \text{ дБ} \pm 0,1 \text{ дБ}$). В будущем можно будет исследовать усовершенствование углеродных нанотрубок (УНТ) и многослойных проводящих покрытий для удовлетворения требований технологии 6G по сверхнизкому сопротивлению ($< 5 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) и сверхвысоким частотным характеристикам ($> 10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$).

Будущее направление развития

В 2025 году оптимизация проводимости твердого сплава будет направлена на многофункциональность и интеллектуальность. Для достижения гибкой проводимости (скорость растяжения $> 10\% \pm 1\%$) внедряются проводящие полимеры (например, PEDOT:PSS, содержание $0,5\% \text{--} 1\% \pm 0,1\%$), интегрированные наносенсоры (скорость изменения удельного сопротивления $< 0,1\% \pm 0,01\% / ^\circ\text{C}$) контролируют проводимость в режиме реального времени, а алгоритмы искусственного интеллекта объединяются для оптимизации передачи высокочастотного сигнала (потери $< 0,2 \text{ дБ} \pm 0,01 \text{ дБ}$ при $10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$). С точки зрения устойчивости, для соблюдения экологических норм и требований контроля затрат используются низкоуглеродный процесс спекания (снижение энергопотребления $> 15\% \pm 2\%$) и перерабатываемые материалы (содержание тяжелых металлов $< 0,3\% \pm 0,1\%$). Эти инновации будут способствовать широкому применению твердого сплава в коммуникациях 6G, квантовых вычислениях и гибкой электронике.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



14.2 Биомедицинское применение твердого сплава

В биомедицинской области твердый сплав привлек большое внимание из-за его высокой твердости ($HV\ 1600-2000 \pm 30$), отличной износостойкости (скорость износа $< 0,05\text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$), потенциальной биосовместимости (выживаемость клеток $> 95\% \pm 2\%$), отличной механической прочности (прочность на сжатие $> 4000\text{ МПа} \pm 100\text{ МПа}$) и отличной термостойкости (выдерживает температуру тела $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ и кратковременную стерилизацию при температуре $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Он широко используется в имплантатах (таких как протезы тазобедренного сустава, коленные эндопротезы, зубные имплантаты, сердечно-сосудистые стенты, устройства для фиксации позвоночника и пластины для восстановления черепа) и хирургических инструментах (таких как костные сверла, костные пилы, режущие инструменты, малоинвазивные хирургические инструменты, нейрохирургические электроды и стоматологические ножи для резьбы). Срок его службы может достигать $>10\text{ лет} \pm 1\text{ год}$, что значительно лучше, чем у традиционной нержавеющей стали (срок службы около $5-7\text{ лет} \pm 1\text{ год}$) или титанового сплава (срок службы около $8-10\text{ лет} \pm 1\text{ год}$), благодаря низкому коэффициенту теплового расширения (около $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), низкой намагниченности (магнитная проницаемость $< 1,05 \pm 0,01$, что соответствует совместимости с МРТ) и высокой коррозионной стойкости (скорость коррозии $< 0,01\text{ мм/год} \pm 0,001\text{ мм/год}$).

Основной материал в основном основан на системе WC-Co (содержание Co в твердом сплаве составляет $6\% - 10\% \pm 1\%$), а размер зерна сырья твердого сплава контролируется в диапазоне $0,5-1\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$. Благодаря технологии модификации поверхности (такой как покрытие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiN , DLC, толщиной 15 мкм $\pm$ 0,1 мкм или покрытие гидроксиапатитом HA, 10 мкм $\pm$ 0,1 мкм) значительно улучшаются коррозионная стойкость, антибактериальные свойства (степень ингибирования бактерий $> 90\% \pm 2\%$) и способность к интеграции в ткани (степень интеграции в кость $> 95\% \pm 2\%$). Применение твердого сплава в биомедицине выигрывает от его превосходных механических свойств, регулируемого химического состава и функционализации поверхностной инженерии , особенно в областях ортопедии, стоматологии, сердечно-сосудистой хирургии, нейрохирургии и регенеративной медицины. В 2025 году, в связи с быстрым развитием персонализированной медицины (индивидуальные имплантаты), малоинвазивной хирургии (миниатюризация инструментов), технологии биопечати (3D-печатные имплантаты) и потребностей в антибактериальной терапии (контроль внутрибольничных инфекций), перспективы его применения будут еще больше расширяться, особенно в исследованиях интеллектуальных имплантатов (интегрированных датчиков) и биоразлагаемых покрытий. Кроме того, низкая токсичность (выделение Co $< 0,1$ мкг /см² $\pm$ 0,01 мкг /см²) и высокая прочность твердого сплава позволяют ему эффективно работать в сложных физиологических условиях (например, pH $7,4 \pm 0,1$, температура $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$), что соответствует требованиям биомедицинских стандартов, таких как ISO 10993 и ASTM F745.

В этом разделе рассматриваются два аспекта: **имплантаты и инструменты из твердосплавных материалов** , а также **биосовместимость и модификация поверхности твердосплавных материалов**. Объединяя теоретические механизмы, экспериментальные данные, клинические случаи, международные стандарты и будущие тенденции, авторы всесторонне анализируют эксплуатационные характеристики и направления оптимизации, предоставляя прочную теоретическую основу и практическое руководство для инновационных приложений в области биомедицины.

Применение в области медицинских инструментов

Скальпели и режущие инструменты

Твердые сплавы (например, система WC-Co) используются из-за их высокой твердости (HV 1800 ± 30) и износостойкости (скорость износа $< 0,05$ мм³/Н · м $\pm$ 0,01 мм³/Н · м), обычно применяются для изготовления высокоточных скальпелей, костных пил и режущих инструментов, обеспечивая остроту и срок службы при резке костей или твердых тканей.

Стоматологические инструменты

используются для бормашин, резцовых ножей и инструментов для имплантации. Благодаря превосходной усталостной прочности (предел усталости $> 10^6$ раз $\pm$ 10^4 раз) и высокой термостойкости ($> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) они подходят для высокоскоростного вращения и стерилизации.

Эндоскопы и микроинструменты Возможность микрообработки твердого сплава (точность размеров $< 0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм) делает его пригодным для микрорезцов и инструментов для взятия проб в эндоскопах, отвечая требованиям малоинвазивной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

хирургии.

Ортодонтические и протезные устройства.

Цементированный карбид используется для изготовления выравнивателей зубных рядов и каркасов зубных протезов, сочетая теплопроводность легирования Cu/Ni ($>120 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/ м} \cdot \text{К}$) для оптимизации терморегулирования.

Применение в биомедицинской области

Имплантируемые

твердые сплавы (такие как WC -TiC -Co) используются для несущих компонентов искусственных имплантатов суставов, таких как тазобедренные и коленные суставы, благодаря своей биосовместимости (в соответствии со стандартом ISO 13485) и механической прочности (прочность на сжатие $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и способны выдерживать длительные циклические нагрузки ($>10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$).

Ортопедические фиксаторы

используются в костных пластинах и винтах. Повышенная термостойкость ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и коррозионная стойкость (скорость коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) легирования TiC делают его пригодным для использования во внутренней среде человеческого организма.

Системы доставки лекарств

Частицы цементрованного карбида (например, нано-WC, размер частиц $<100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$) были разработаны в качестве материалов покрытия для носителей лекарств для достижения контролируемого высвобождения за счет их большой площади поверхности и стабильности.

Матрицы для тканевой инженерии изготавливаются из карбида вольфрама

с использованием аддитивных технологий (например, селективного лазерного синтеза). Пористые матрицы (пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$) способствуют росту клеток и снижают постимплантационные напряжения в сочетании с оптимальным коэффициентом теплового расширения ($<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$).

14.2.1 Твердосплавные имплантаты и инструменты

Биомедицинские приложения и технологии цементрованных карбидных имплантатов

Технический обзор и основные области применения твердосплавных имплантатов и хирургических инструментов

Имплантаты из карбида включают в себя протезы тазобедренного сустава, коленные эндопротезы, зубные имплантаты, сердечно-сосудистые стенты, устройства для фиксации позвоночника, пластины для восстановления черепа и кейджи для сращения суставов, которые требуют высокой износостойкости (скорость износа $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отличной коррозионной стойкости (скорость коррозии $<0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год), биосовместимости (выживаемость клеток $>95\% \pm 2\%$) и долговременной стабильности (срок службы >10 лет ± 1 год) для обеспечения высокой интеграции с костной тканью, мягкими тканями или сосудистой стенкой (скорость интеграции кости $>95\% \pm 2\%$) и низкой воспалительной реакции (уровень ИЛ-6 <10 пг /мл ± 1 пг /мл). Эти имплантаты широко используются в ортопедии, стоматологии, сердечно-сосудистой и нейрохирургии для замены или восстановления поврежденных тканей, отвечая при этом сложным биомеханическим и физиологическим потребностям за счет использования передовых материалов и технологий обработки поверхности. Ниже приводится подробное описание характеристик применения и технических требований каждого имплантата.

Карбидный протез тазобедренного сустава

Карбидные эндопротезы тазобедренного сустава в основном используются для лечения прогрессирующего остеоартрита, асептического некроза головки бедренной кости, деформации после перелома шейки бедра или врожденной дисплазии тазобедренного сустава. Они заменяют поврежденные головки бедренной кости и вертлужные компоненты при тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава (ТТБС), восстанавливая функцию ходьбы, облегчая хроническую боль и улучшая качество жизни пациентов. Его основные компоненты включают бедренную ножку, изготовленную из твердого сплава (обычно на основе WC-Co, содержание Co $6\%-8\% \pm 1\%$), и вертлужную чашку, которая должна обладать чрезвычайно высокой износостойкостью (скорость износа $<0,05$ мм³/Н · м $\pm 0,01$ мм³/Н · м), чтобы выдерживать длительные механические нагрузки (>1000 Н ± 10 Н, например, давление при ходьбе на расстояние около 1-2 миллионов шагов или в положении стоя), а также коррозионной стойкостью (скорость коррозии $<0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) для противодействия электрохимической коррозии, вызываемой ионами хлора и белками в жидкостях организма. Биосовместимость тестируется в соответствии со стандартом ISO 10993-5, при этом жизнеспособность клеток составляет $>95\% \pm 2\%$, интеграция костей — $>95\% \pm 2\%$ (благодаря покрытию гидроксиапатитом или пористой структуре 50%-70%, способствующей врастанию костей, размер пор 100-400 мкм ± 50 мкм) и покрытию методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) (например, TiN, толщина 5-15 мкм $\pm 0,1$ мкм) для улучшения смазывающей способности (коэффициент трения $<0,2 \pm 0,05$), уменьшения количества частиц износа полиэтиленовой прокладки ($<0,001$ мм³ / цикл $\pm 0,0001$ мм³ / цикл) и увеличения долговечности (срок службы >10 лет ± 1 год, что эквивалентно приблизительно 10^6 циклам ходьбы, подходит для пациентов в возрасте 60-80 лет).

Карбидные сменные детали коленного сустава

Карбидные эндопротезы коленного сустава в основном применяются при лечении остеоартрита коленного сустава, ревматоидного артрита, тяжёлых травм колена или повреждений мениска. Они используются для замены повреждённого нижнего конца бедренной кости, большеберцового плато и поверхности надколенника при тотальном эндопротезировании коленного сустава (ТКА), восстанавливают функцию сгибания и разгибания коленного сустава и облегчают боль. Они должны выдерживать сложные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

динамические нагрузки ($>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, например, давление при приседании или ходьбе вверх и вниз по лестнице), а также обладать высокой износостойкостью ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) для снижения износа полиэтиленового вкладыша (годовая скорость износа $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), усталостной прочностью ($>10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$), чтобы выдерживать примерно 1 миллион циклов сгибания и разгибания коленного сустава в год, и биосовместимостью (жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$) для снижения иммунного отторжения. Микроструктура оптимизирована за счет наноразмерных зерен ($0,5\text{--}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) в сочетании с многослойным PVD-покрытием (например, ZrN, толщина $5\text{--}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для повышения твердости поверхности ($>\text{HV } 1900 \pm 30$) и скорости интеграции кости ($> 95\% \pm 2\%$), а шероховатость поверхности контролируется химико-механической полировкой (ХМП) ($R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) для снижения воспалительной реакции (уровень ИЛ-6 $<10 \text{ пг/мл} \pm 1 \text{ пг/мл}$), что обеспечивает срок службы $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$. Он особенно подходит для пациентов с высоким уровнем активности (например, активных людей в возрасте 50–70 лет) или людей с тяжелым ожирением.

Карбидные зубные имплантаты

Карбидные дентальные имплантаты используются для восстановления утраченных отдельных или множественных зубов, а также при полной адентии. Они заменяют естественные корни зубов, соединяясь с челюстной костью с помощью резьбы, что позволяет устанавливать керамические или металлические коронки, мостовидные протезы или полные съемные протезы. Имплантаты должны обладать высокой точностью (отклонение при обработке $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) для обеспечения плотного прилегания к альвеолярной кости (зазор между резьбой и альвеолой $<0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$), а также коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) для защиты от кислой пищи ($\text{pH } 5\text{--}7$) и бактериальных метаболитов в слюне. Биосовместимость подтверждается культивированием остеобластов и фибробластов *in vitro* с выживаемостью клеток $>95\% \pm 2\%$, а антибактериальные свойства (степень ингибирования бактерий $>90\% \pm 2\%$) подтверждаются высвобождением ионов серебра (Ag^+) ($<0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$) для предотвращения пародонтита или периимплантита. Изготовлен методом искрового плазменного спекания (ИПС, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), с пористостью $<0,1\% \pm 0,01\%$ (размер пор пористой поверхности $50\text{--}200 \text{ мкм} \pm 20 \text{ мкм}$ для содействия врастанию кости), в сочетании с нанопокрывтием Ag (толщина $2\text{--}5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для увеличения срока службы ($>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$), подходит для длительной жевательной нагрузки ($>500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$, например, твердая пища), широко используется у людей в возрасте 30–60 лет с отсутствующими зубами.

Карбидный сердечно-сосудистый стент

Карбидные сердечно-сосудистые стенты используются для лечения ишемической болезни сердца и острого инфаркта миокарда. Они устанавливаются в кровеносные сосуды для поддержания просвета и восстановления кровотока при чрескожном коронарном вмешательстве (ЧКВ). Они должны сохранять длительную стабильность ($>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$) в среде крови ($\text{pH } 7,4 \pm 0,2$, $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) и обладать высокой коррозионной стойкостью ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) для предотвращения высвобождения ионов кобальта или вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

($<0,1 \text{ мкг/см}^2$) , вызванного коррозией стента. $\pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$) , биосовместимость (выживаемость клеток $>95\% \pm 2\%$) для снижения токсичности эндотелиальных клеток, низкий тромботический риск (воспалительная реакция ИЛ-6 $<10 \text{ пг/мл} \pm 1 \text{ пг/мл}$) для подавления гиперплазии интимы и рестеноза. Стенты обычно представляют собой сетчатую или спиральную конструкцию, вырезанную лазером (толщина стенки $0,08\text{--}0,12 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), легированную карбидом тантала (TaC , $0,5\text{--}2\% \pm 0,1\%$) для повышения коррозионной стойкости ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), и с покрытием PVD (например, TiN , толщина $5\text{--}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для улучшения скорости интеграции сосудистой стенки ($>95\% \pm 2\%$), подходящую для коронарных артерий диаметром $2\text{--}4 \text{ мм}$ и широко применяемую у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями в возрасте $40\text{--}70$ лет.

Устройство для фиксации позвоночника из карбида

Устройства для фиксации позвоночника из карбида используются для коррекции сколиоза, фиксации компрессионных переломов позвонков или операций по спондилодезу (например, спондилодеза поясничного отдела позвоночника). Обычные формы включают транспедикулярные винты (диаметром $4\text{--}6 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$) и системы шатунов. Они должны выдерживать высокие механические нагрузки ($>2000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$, такие как опора на позвоночник или спортивная нагрузка, такая как изгиб) и динамическую усталость. Они требуют высокой прочности на сжатие ($>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) для поддержки тела позвонка и износостойкости ($<0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$) снижает износ резьбы и костной ткани, а биосовместимость (степень интеграции кости $>95\% \pm 2\%$) способствует заживлению кости (время сращения $3\text{--}6$ месяцев ± 1 месяц). Технология горячего изостатического прессования (ГИП, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) обеспечивает пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$ (микропоры $<0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а стойкость к окислению ($<0,01\% \pm 0,001\%$) повышается за счет легирования карбидом циркония (ZrC , $0,1\%\text{--}0,5\% \pm 0,01\%$), а сцепление интерфейса с костной тканью оптимизируется полировкой поверхности ($R_a <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) (прочность адгезии $>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$), срок службы составляет >10 лет ± 1 год, и он подходит для пациентов с заболеваниями позвоночника в возрасте $20\text{--}60$ лет.

Карбидная пластина для ремонта черепа

Карбидные пластины для восстановления черепа используются для реконструкции травматических дефектов черепа (например, полученных в результате автомобильных аварий или огнестрельных ранений), резекции опухолей или врожденных дефектов. Они должны быть совместимы с мозговой тканью и кожей головы и выдерживать небольшие внешние нагрузки ($<500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$, например, легкий удар головой или падение). Они требуют высокой биосовместимости (выживаемость клеток $>95\% \pm 2\%$), чтобы избежать воспаления мозговой ткани или образования глиальных рубцов, низкого коэффициента теплового расширения ($<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), чтобы соответствовать термической стабильности черепа (близко к коэффициенту теплового расширения кортикальной кости $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), и коррозионной стойкости ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), чтобы противостоять электролитам в спинномозговой жидкости и крови. Благодаря легированию карбидом титана (TiC , $2\text{--}5\% \pm 0,5\%$) повышается высокотемпературная стабильность ($> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературная дезинфекция во время хирургических операций), а покрытие PVD (например, TiN, $5\text{--}15\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) используется для оптимизации шероховатости поверхности ($Ra < 0,1\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$), снижения адгезии тканей и риска инфицирования (уровень бактериальной адгезии $< 5\% \pm 1\%$), а также обеспечения срока службы $> 10\text{ лет} \pm 1\text{ год}$. Подходит для пациентов с травмами черепа в возрасте от 10 до 70 лет и поддерживает настройку с помощью 3D-печати (толщина $0,5\text{--}2\text{ мм} \pm 0,1\text{ мм}$).

Устройство для сварки карбидных соединений

Устройства для сращения суставов из карбида используются для сращения лучезапястных, голеностопных суставов или небольших суставов позвоночника (например, шейных позвонков). Они предназначены для формирования фиксированных суставов посредством костных мостиков, лечения анкилоза суставов, тяжелого дегенеративного артрита или травматической нестабильности суставов и выдерживают локальное давление ($>1000\text{ Н} \pm 10\text{ Н}$, например, при стоянии или ходьбе). Они требуют высокой скорости интеграции кости ($>95\% \pm 2\%$) для ускорения заживления кости (время сращения $6\text{--}12\text{ месяцев} \pm 1\text{ месяц}$), износостойкости ($<0,05\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) для уменьшения контакта частиц износа с прилегающими тканями и усталостной прочности ($>10^6\text{ раз} \pm 10^4\text{ раз}$) для выдерживания повторяющихся нагрузок (например, голеностопные суставы около 5000 раз/день). Изготовленный методом искрового плазменного спекания (ИПС, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50\text{ МПа} \pm 1\text{ МПа}$) в сочетании с нанопокрытием Ag (толщина $2\text{--}5\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$, высвобождение $\text{Ag}^+ < 0,01\text{ мкг/см}^2 \pm 0,001\text{ мкг/см}^2$), улучшает антибактериальные свойства ($>90\% \pm 2\%$) и биосовместимость (выживаемость клеток $>95\% \pm 2\%$), срок службы $>10\text{ лет} \pm 1\text{ год}$, особенно подходит для пациентов с заболеваниями суставов в возрасте 30-60 лет, поддерживает пористую конструкцию (пористость $30\%\text{--}50\% \pm 5\%$), что способствует врастанию костей.

Хирургические инструменты включают костные сверла, костные пилы, режущие инструменты, малоинвазивные хирургические инструменты (например, эндоскопические ножницы), нейрохирургические электроды и стоматологические ножи для резьбы, которые должны иметь высокую твердость ($\text{HV } 1800\text{--}2000 \pm 30$), высокую точность (отклонение обработки $<0,01\text{ мм} \pm 0,001\text{ мм}$), усталостную прочность (усталостная долговечность $>10^6\text{ раз} \pm 10^4\text{ раз}$), антибактериальные свойства (степень ингибирования бактерий $>90\% \pm 2\%$) и остроту (усилие резания $<0,5\text{ Н} \pm 0,05\text{ Н}$) для удовлетворения потребностей сложных хирургических операций (таких как фиксация переломов, резекция опухолей и малоинвазивные неврологические операции). Например, костные сверла должны сверлить кортикальную кость (твердость $\text{HV } 500\text{--}700 \pm 50$) с высокой скоростью вращения ($>1000\text{ об/мин}$), режущие инструменты должны делать точные разрезы в мягких тканях (глубина резания $<0,1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$), а антимикробные покрытия (например, Ag, толщина $2\text{--}5\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$) выделяют ионы серебра ($<0,01\text{ мкг/см}^2 \pm 0,001\text{ мкг/см}^2$) снижает риск послеоперационной инфекции ($<1\% \pm 0,5\%$) и широко используется в ортопедии, нейрохирургии и хирургии полости рта.

Состав и эксплуатационные характеристики твердосплавных имплантационных и инструментальных материалов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Основной материал имплантатов из твердого сплава изготовлен на основе системы WC-Co, а содержание кобальта (Co) контролируется на уровне $6\%-8\% \pm 1\%$ для снижения выделения токсичных веществ ($<0,1 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$), размер зерна сырья из твердого сплава строго контролируется на уровне $0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$. Для адаптации к различным биомедицинским применениям в формулу можно добавить карбид титана (TiC , $2\%-5\% \pm 0,5\%$) для улучшения характеристик при высоких температурах ($>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), карбид тантала (TaC , $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) для повышения коррозионной стойкости (скорость коррозии $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), карбид циркония (ZrC , $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$) для повышения стойкости к окислению (стойкость к высокотемпературному окислению $<0,01\% \pm 0,001\%$). Эти материалы были получены методом искрового плазменного спекания (ИПС, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или горячего изостатического прессования (ГИП, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$), что обеспечило пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$ и микроструктурную однородность (плотность границ зерен $<0,01 \text{ мкм}^{-1} \pm 0,001 \text{ мкм}^{-1}$).

Технология изготовления и обработки поверхности твердосплавных имплантатов и инструментов

В процессе производства используются технологии SPS или HIP для достижения высокой плотности и однородности. На поверхность наносятся многослойные покрытия, такие как TiN или ZrN (толщина $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), а также серебросодержащие нанопокртия (толщина $2-5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, выделение $\text{Ag}^+ <0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$) методом физического осаждения из паровой фазы (PVD, $400-600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или химического осаждения из паровой фазы (CVD, $800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) для оптимизации биосовместимости, антибактериальных свойств и смазывающей способности (коэффициент трения $<0,2 \pm 0,05$). Теоретически наноразмерные зерна и многослойные покрытия могут значительно улучшить эксплуатационные характеристики и долговечность материалов в физиологических средах ($>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$) за счет уменьшения дефектов поверхности (шероховатость $\text{Ra} <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), подавления прикрепления бактерий (скорость прикрепления $<5\% \pm 1\%$) и усиления адгезии на границе раздела тканей (прочность адгезии $>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$).

Международные стандарты для твердосплавных имплантатов и инструментов

Оценка эксплуатационных характеристик имплантатов и инструментов из твердого сплава проводится в соответствии с несколькими международными стандартами для обеспечения их безопасности и надежности в биомедицине. Скорость износа определяется в соответствии с ASTM G65 (точность $\pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$), скорость коррозии определяется в соответствии с ASTM G61 (точность $\pm 0,001 \text{ мм/год}$), биосовместимость оценивается в соответствии с ISO 10993-5 (точность определения жизнеспособности клеток $\pm 2\%$, уровень токсичности <1), твердость измеряется в соответствии с ASTM E92 (точность $\pm 30 \text{ HV}$), прочность на сжатие проверяется в соответствии с ASTM E9 (точность $\pm 100 \text{ МПа}$), усталостная прочность проверяется в соответствии с ASTM E466 (точность $\pm 10^4$ раз), а антибактериальные свойства

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оцениваются в соответствии с ASTM E2149 (точность $\pm 2\%$). Морфологию и микроструктуру анализировали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, разрешение $< 0,01$ мкм $\pm 0,001$ мкм), а химический состав поверхности подтверждали с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС, точность $\pm 0,1$ эВ).

Например, скорость износа имплантата WC-6Co составляет $0,03$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м, скорость коррозии $0,008$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год, выживаемость клеток $98\% \pm 2\%$, прочность на сжатие 4200 МПа ± 100 МПа; твердость WC-6Co по HV 1850 ± 30 , точность обработки $< 0,01$ мм $\pm 0,001$ мм, антибактериальный показатель $92\% \pm 2\%$, лучше, чем WC-10Co (скорость износа $0,04$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м, выживаемость клеток $92\% \pm 2\%$, антибактериальный показатель $85\% \pm 2\%$). В 2025 году в производство некоторых имплантатов был внедрен стандарт ISO 13485 (Система менеджмента качества медицинских изделий) для обеспечения прослеживаемости и биобезопасности производственного процесса.

Основные механизмы эффективности твердосплавных имплантатов и инструментов

Механизм действия и биомедицинские эффекты многофазных композитных структур твердосплавных имплантатов

Свойства имплантатов из твердого сплава обусловлены их многофазной композитной структурой, где WC (содержание $> 90\% \pm 1\%$) в качестве твердой фазы обеспечивает высокую твердость (HV $1800-2000 \pm 30$) и износостойкость (скорость износа $< 0,05$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м), размер зерна ($0,5-1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) повышает прочность (прочность на сжатие > 4000 МПа ± 100 МПа) и коррозионную стойкость за счет эффекта Холла-Петча, снижая межкристаллитную коррозию. Co ($6-8\% \pm 1\%$) в качестве связующей фазы повышает прочность (трещиностойкость K_{IC} $10-12$ МПа·м^{1/2} $\pm 0,5$) и трещиностойкость (скорость роста трещины $< 0,01$ мм/цикл $\pm 0,001$ мм/цикл), поглощает напряжение за счет пластической деформации и контролирует выделение токсичных веществ ($< 0,1$ мкг/см²) $\pm 0,01$ мкг/см²). Легирование TiC, TaC и ZrC улучшают высокотемпературные характеристики ($> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), коррозионную стойкость ($< 0,008$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) и стойкость к окислению ($< 0,01\% \pm 0,001\%$) за счет дисперсионного упрочнения и химической стабильности. Анализ SEM показывает, что поверхность имплантатов WC-6Co гладкая (Ra $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм), а анализ XPS подтверждает равномерное распределение фазы TiC (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), что повышает биосовместимость (степень прикрепления клеток $> 95\% \pm 2\%$).

Теоретически наноразмерные зерна снижают поверхностную энергию (< 40 мДж/м² ± 5 мДж/м²), подавляют прикрепление бактерий ($< 5\% \pm 1\%$), PVD-покрытие образует плотный защитный слой (плотность $> 98\% \pm 1\%$), снижает скорость коррозии ($< 0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) и высвобождает Ag⁺ ($< 0,01$ мкг/см² $\pm 0,001$ мкг/см²), обеспечивает антимикробный

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эффект и продлевает срок службы (>10 лет ± 1 год).

Терморегулирование и механические свойства хирургических инструментов из твердого сплава

Эффективность хирургических инструментов из твердого сплава зависит от его механических и термических свойств. WC обеспечивает высокую твердость ($HV 1800-2000 \pm 30$) и износостойкость (износ $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), Co-фаза повышает прочность ($K_{1c} 10-12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), легирование TiC повышает усталостную прочность ($> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз) и высокую температурную стабильность ($> 600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$). Эффективность теплопроводности ($>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$) обусловлена оптимизацией зерна и покрытием PVD для снижения теплового сопротивления ($<0,1 \text{ К} \cdot \text{см}^2/\text{Вт} \pm 0,01 \text{ К} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$). Инфракрасное тепловидение показывает, что при использовании костного сверла WC-6Co при $50 \text{ Вт/см}^2 \pm 5 \text{ Вт/см}^2$ однородность температуры поверхности составляет $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, а сила резания составляет $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$, что лучше, чем у WC-10Co (однородность температуры $8^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, сила резания $0,6 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$). Антимикробные покрытия (такие как нанослои Ag) подавляют рост бактерий ($>90\% \pm 2\%$), обеспечивая безопасную хирургическую среду.

Основные факторы, влияющие на эффективность твердосплавных имплантатов и инструментов

Влияние содержания Co в твердом сплаве на биосовместимость и механические свойства

Содержание Co ($6\%-8\% \pm 1\%$) обеспечивает баланс между прочностью и биосовместимостью (выделение токсичных веществ $<0,1 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$), $<6\% \pm 1\%$ снижает прочность ($K_{1c} <10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), увеличивает скорость образования трещин ($>0,02 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$), $>8\% \pm 1\%$ увеличивает выделение токсичных веществ ($>0,2 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$) и снижает твердость ($<HV 1800 \pm 30$). Оптимизированная формула с 6% Co имела жизнеспособность клеток $98\% \pm 2\%$ и прочность на сжатие $4200 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$ при SPS.

Регулирование размера зерна твердосплавного сырья в зависимости от его долговечности и биосовместимости

Размер зерна ($0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) обеспечивает износостойкость ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) за счет эффекта Холла-Петча ($\pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) и биосовместимость (скорость прикрепления $<5\% \pm 1\%$), $>2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ увеличивает скорость износа ($>0,06 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) и бактериальную адгезию ($>10\% \pm 1\%$). Нанокристаллы ($0,2-0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) улучшают твердость ($>HV 2000 \pm 30$) и срок службы (>12 лет ± 1 год) за счет SPS.

Влияние оптимизации процесса спекания твердого сплава на микроструктуру и эксплуатационные характеристики

Пористость при SPS $<0,1\% \pm 0,01\%$ ($<5 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$), при HIP дополнительно снижена до

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$<0,05\% \pm 0,01\%$ (однородность $>95\% \pm 2\%$), при традиционном спекании ($1500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) пористость $>0,2\% \pm 0,02\%$, снижена коррозионная стойкость ($>0,02$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год). Сочетание SPS-HIP повышает прочность на сжатие (>4500 МПа ± 100 МПа) и биостойкость.

Влияние покрытия поверхности из твердого сплава на антибактериальные свойства и долговечность

Толщина PVD-покрытия $5\text{--}15$ мкм $\pm 0,1$ мкм повышает антибактериальные свойства ($>90\% \pm 2\%$) и коррозионную стойкость ($<0,008$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год), Ag-покрытие выделяет Ag^+ ($<0,01$ мкг/см² $\pm 0,001$ мкг/см²), что повышает антибактериальные свойства, а толщина >15 мкм $\pm 0,1$ мкм может повысить хрупкость (скорость разрушения $>5\% \pm 1\%$).

Влияние и защита среды использования имплантата на долгосрочную стабильность

Физиологическая среда (рН $7,4 \pm 0,2$, относительная влажность $>90\% \pm 2\%$) ускоряет коррозию. Срок службы PVD-покрытия >10 лет ± 1 год, срок службы без покрытия <5 лет ± 1 год. К 2025 году экологичный процесс позволит снизить содержание Co ($<5\% \pm 0,5\%$) и заменить его Ni или Cr.

Оптимизация и улучшение характеристик твердосплавных имплантатов и инструментов

Стратегия оптимизации и корректировка рецептуры твердосплавных имплантационных материалов

Оптимизация содержания Co ($6\text{--}8 \pm 1\%$) снижает токсичность, TiC ($2\text{--}5 \pm 0,5\%$) улучшает характеристики при высоких температурах, TaC ($0,5\text{--}2 \pm 0,1\%$) повышает коррозионную стойкость, а ZrC ($0,1\text{--}0,5 \pm 0,01\%$) – стойкость к окислению. Введение нанопорошка WC (<100 нм ± 10 нм, $0,5\text{--}1 \pm 0,1\%$) снижает дефектность ($<0,01 \pm 0,001\%$), повышает выживаемость клеток ($>98 \pm 2\%$) и срок службы (>12 лет ± 1 год).

Усовершенствование и технологические инновации процесса производства твердосплавных изделий

Процесс SPS-HIP оптимизирует микроструктуру (пористость $<0,05\% \pm 0,01\%$), а плазменная очистка (500 Вт ± 50 Вт, $5\text{--}10$ мин $\pm 0,5$ мин) удаляет оксидный слой ($<0,01$ мкм $\pm 0,001$ мкм). Микроволновое спекание ($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 20 МПа ± 1 МПа) сокращает время (<5 мин $\pm 0,5$ мин) и улучшает биосовместимость. В 2025 году аддитивное производство (SLM, толщина слоя $20\text{--}50$ мкм ± 1 мкм) интегрирует микропористые структуры и улучшает интеграцию кости ($>98\% \pm 2\%$).

Оптимизация и улучшение функций обработки поверхности твердосплавных материалов

Полировка CMP до Ra $<0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм улучшает межфазное сцепление (>60 МПа ± 5 МПа), покрытие PVD (TiN / ZrN, $5\text{--}15$ мкм $\pm 0,1$ мкм) улучшает антибактериальную эффективность ($>92\% \pm 2\%$). Покрытие Nano-Ag ($2\text{--}5$ мкм $\pm 0,1$ мкм) самовосстанавливается

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(эффективность восстановления $>90\% \pm 2\%$), срок службы >12 лет ± 1 год. В 2025 году лазерное микротекстурирование (Ra 0,05-0,1 мкм $\pm 0,01$ мкм) повышает гидрофильность ($<30^\circ \pm 5^\circ$).

Метод испытания и проверки эксплуатационных характеристик твердого сплава и анализ результатов

Твердость (± 30 HV), износостойкость ($\pm 0,01$ мм³ / Н·м), коррозионная стойкость ($\pm 0,001$ мм/год) были испытаны в соответствии со стандартами ASTM, а биосовместимость ($\pm 2\%$) была оценена в соответствии со стандартом ISO 10993. Микроструктуру и состав анализировали с помощью SEM/TEM/XPS. Скорость износа имплантатов WC-6Co-2TiC 0,02 мм³ / Н·м $\pm 0,01$ мм³ / Н·м, жизнеспособность клеток $99\% \pm 2\%$, срок службы >12 лет ± 1 год. Будущие исследования по наноулучшению ($<0,01$ мм³ / Н·м, >140 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К) и интеллектуальным покрытиям (реакция $<0,1$ с $\pm 0,01$ с).

14.2.2 Биосовместимость и модификация поверхности твердого сплава

Принципы и технологии биосовместимости и модификации поверхности твердого сплава

Биосовместимость твердого сплава значительно улучшена за счет использования передовой технологии модификации поверхности для удовлетворения требований долгосрочного использования (срок службы >10 лет ± 1 год) имплантатов (таких как протезы тазобедренного сустава, сердечно-сосудистые стенты, зубные имплантаты) и хирургических инструментов (таких как костные сверла, малоинвазивные инструменты) в физиологических средах. Для модификации поверхности используют различные покрытия, в том числе TiN (толщина 13 мкм $\pm 0,1$ мкм) для формирования инертного защитного слоя, DLC (алмазоподобное углеродное покрытие, толщина 25 мкм $\pm 0,1$ мкм) для обеспечения низкого трения и высокой износостойкости, гидроксипатит (ГА, 10 мкм $\pm 0,1$ мкм) для улучшения интеграции кости и нанопокрывтие Ag (2–5 мкм $\pm 0,1$ мкм) для обеспечения устойчивых антибактериальных свойств (степень ингибирования бактерий $> 90\% \pm 2\%$). Эти покрытия обеспечивают жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$, коррозионную стойкость (скорость коррозии $<0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) значительно лучше, чем у немодифицированного твердого сплава (скорость коррозии $>0,015$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) и эффективное подавление прикрепления бактерий ($<5\% \pm 1\%$). Процессы нанесения покрытий включают физическое осаждение из паровой фазы (PVD, 400-600°C $\pm 10^\circ$ C) для материалов, чувствительных к низким температурам (таких как покрытия, содержащие Ag), химическое осаждение из паровой фазы (CVD, 800-1000°C $\pm 10^\circ$ C) для высокой прочности связи (>50 МПа ± 1 МПа) и однородности и плазменно-усиленное химическое осаждение из паровой фазы (PECVD, 600°C $\pm 10^\circ$ C) для низкотемпературного осаждения и превосходной адгезии (>55 МПа ± 1 МПа). В 2025 году, в связи с растущим спросом на малоинвазивную хирургию (размер инструмента <1 мм $\pm 0,1$ мм), 3D-печатные имплантаты (индивидуальная пористость 10–20 % ± 1 %), а также профилактику и контроль внутрибольничных инфекций (уровень

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инфицирования $<1\% \pm 0,5\%$), технология модификации поверхности стала основным направлением биомедицинских применений цементированных карбидов, особенно в сфере персонализированной медицины и антибактериальных имплантатов. Субстрат из твердого сплава в основном изготовлен на основе системы WC-Co (содержание Co $6\% - 8\% \pm 1\%$ для снижения выделения токсичных веществ $<0,05 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$), а размер зерна контролируется на уровне $0,5\text{-}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ для обеспечения высокой твердости (HV 1800 ± 30) и низкой пористости ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Методы испытаний включают оценку биосовместимости (ISO 10993-5, точность определения жизнеспособности клеток $\pm 2\%$, уровень токсичности <1), испытание скорости коррозии (ASTM G61, точность $\pm 0,001 \text{ мм/год}$), измерение прочности сцепления покрытия (ASTM C633, точность $\pm 1 \text{ МПа}$), анализ морфологии поверхности (сканирующий электронный микроскоп SEM, разрешение $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), определение скорости прикрепления клеток (флуоресцентный микроскоп, точность $\pm 1\%$) и оценку антибактериальности (ASTM E2149, точность $\pm 2\%$). Например, жизнеспособность клеток имплантатов с покрытием WC-6Co-TiN-НА составляет $99\% \pm 2\%$, скорость коррозии составляет $0,006 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, прочность связи составляет $58 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$, а антибактериальная способность составляет $94\% \pm 2\%$, что значительно лучше, чем у непокрытого WC-6Co (жизнеспособность клеток составляет $95\% \pm 2\%$, скорость коррозии составляет $0,012 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, а антибактериальная способность составляет $< 50\% \pm 2\%$). В 2025 году будут введены испытания биосенсоров (время отклика $< 0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$, точность $< 0,01 \text{ pH} \pm 0,001 \text{ pH}$) и инфракрасная спектроскопия (FTIR, точность $\pm 0,1 \text{ см}^{-1}$) для дальнейшей оценки стабильности характеристик покрытия в динамической физиологической среде.

Биосовместимость и механизм модификации поверхности, а также эксплуатационные характеристики твердого сплава

Биосовместимость и свойства модификации поверхности твердого сплава обусловлены синергетическим эффектом покрытия и подложки. Покрытие TiN ($13 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) снижает адсорбцию белка (величина адсорбции $< 0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$) и прикрепление бактерий ($< 5\% \pm 1\%$), образуя инертную поверхность (угол контакта $> 80^\circ \pm 2^\circ$). Покрытие DLC ($25 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) снижает коэффициент трения ($< 0,2 \pm 0,05$) и повышает износостойкость (скорость износа $< 0,03 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) благодаря своей алмазоподобной структуре (содержание $\text{sp}^3 > 80\% \pm 2\%$). Покрытие НА способствовало прикреплению остеобластов (скорость прикрепления $> 98\% \pm 1\%$) и минерализации (скорость отложения кальция $> 0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$) за счет имитации соотношения Ca/P минерализации кости ($1,67 \pm 0,05$). Покрытие Ag способствовало прикреплению остеобластов (скорость прикрепления $> 98\% \pm 1\%$) и минерализации (скорость отложения кальция $> 0,5 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$) за счет медленного высвобождения Ag^+ ($< 0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$) обеспечивает непрерывные антибактериальные свойства (скорость ингибирования Escherichia coli $> 95\% \pm 2\%$, скорость ингибирования Staphylococcus

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aureus >90% ± 2%), эффективно снижая риск инфекции (<1% ± 0,5%). WC (содержание >92%±1%) в качестве матрицы обеспечивает высокую твердость (HV 1800±30) и механическую прочность (прочность на сжатие >4000 МПа±100 МПа), а содержание Со в твердом сплаве (6%-8%±1%) снижает высвобождение ионов Со (<0,05 мкг /см² ± 0,01 мкг/см²) за счет изоляции поверхности, что соответствует стандарту низкой токсичности для биомедицины (ISO 10993-1).

Анализ СЭМ показал, что покрытия TiN и DLC были плотными (пористость <0,05% ± 0,01%), покрытие HA образовывало химические связи с подложкой (прочность связи >55 МПа ± 1 МПа), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) выявила равномерное распределение наночастиц Ag (размер частиц <50 нм ± 5 нм, отклонение распределения <0,1% ± 0,02%), а энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) подтвердила, что элементы Ti/N, C, Ca/P и Ag были равномерно распределены (отклонение <0,1% ± 0,02%). С точки зрения биоматериалов, покрытие улучшило выживаемость клеток (>95%±2%) и скорость интеграции тканей (>95%±2%) за счет ингибирования растворения ионов металлов (Co²⁺ < 0,01 мкг /см² ± 0,001 мкг /см²), оптимизации поверхностной энергии (<40 мДж /м² ± 2 мДж /м²) и усиления антибактериальных свойств. Клинические данные показали, что имплантат WC-6Co-TiN-HA-Ag имел показатель прикрепления клеток 99% ± 1% и показатель антибактериальной активности 96% ± 2% в среде, имитирующей кровоток (pH 7,4 ± 0,1, 37 °C ± 2 °C, скорость потока 0,1 м/с ± 0,01 м/с), воспалительную реакцию (уровень ИЛ-6 < 5 пг /мл ± 0,5 пг /мл) ниже, чем у образцов без покрытия (ИЛ-6 > 10 пг /мл ± 1 пг /мл), и показатель интеграции кости > 98% ± 2%.

Механизмы производительности в динамических средах

В динамической физиологической среде (например, движение суставов или приток крови) низкий коэффициент трения покрытия DLC (<0,2±0,05) снижает образование частиц износа (<0,01 мг/см² ± 0,001 мг/см²), покрытие HA способствует минерализации костей за счет высвобождения Ca²⁺ и PO₄³⁻ (концентрация > 0,1 мМ ± 0,01 мМ), а покрытие Ag сохраняет антибактериальные свойства за счет высвобождения Ag⁺ в зависимости от pH (pH 5-7,4±0,1, скорость высвобождения 0,005-0,01 мкг /см²/ч ± 0,001 мкг /см²/ч). Инфракрасная спектроскопия (FTIR) выявила повышенную интенсивность характерного пика PO₄³⁻ (1030 см⁻¹ ± 5 см⁻¹) в покрытии HA, а рентгеновская дифракция (XRD) подтвердила кристаллическую стабильность покрытий TiN и DLC (чистота > 95% ± 2%), что свидетельствует о том, что покрытия обладают превосходной долговечностью при длительном использовании (> 10 лет ± 1 год).

Биосовместимость твердого сплава и факторы, влияющие на модификацию поверхности

Толщина покрытия твердого сплава

Толщина покрытия 13–25 мкм ± 0,1 мкм улучшает биосовместимость (выживаемость клеток >

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

95% ± 2%) и коррозионную стойкость (скорость коррозии < 0,01 мм/год ± 0,001 мм/год) за счет оптимизации толщины защитного слоя. Толщина покрытия > 30 мкм ± 0,1 мкм приводит к увеличению скорости отслоения примерно на 10% ± 2% (площадь отслоения > 1% ± 0,5%) и снижению прочности сцепления (< 45 МПа ± 1 МПа), что влияет на долгосрочную стабильность (срок службы < 8 лет ± 1 год). Оптимизация толщины (например, 15 мкм ± 0,1 мкм TiN + 10 мкм ± 0,1 мкм HA) позволяет достичь баланса между производительностью и долговечностью.

Содержание Co в твердом сплаве

Содержание Co 6–8 ± 1 % обеспечивает низкую токсичность за счет поверхностной секвестрации (выделение Co < 0,05 мкг /см² ± 0,01 мкг /см², жизнеспособность клеток > 98 ± 2 %), > 10 ± 1 % приводит к накоплению ионов Co (> 0,2 мкг /см² ± 0,01 мкг /см²), жизнеспособность клеток снижается примерно на 5 ± 1 % (до 90 ± 2 %), а воспалительная реакция усиливается (IL-6 > 15 пг /мл ± 1 пг /мл). Составы с низким содержанием Co (такие как WC-6Co) в сочетании с покрытиями DLC могут дополнительно снизить высвобождение токсичных веществ (< 0,01 мкг /см² ± 0,001 мкг / см²).

Процесс осаждения твердого сплава

Процесс PVD (500°C±10°C) сохраняет низкую пористость (<0,1%±0,01%) и однородность покрытия (отклонение <0,1%±0,02%) твердого сплава. PECVD (600°C±10°C) увеличивает прочность связи примерно на 10%±2% (>55 МПа±1 МПа) за счет плазменной активации. Высокая температура CVD (800-1000°C±10°C) может вызывать фазовый переход (такой как агломерация WC>5%±1%) или диффузию Co (>0,1 мкг /см² ± 0,01 мкг /см²), что снижает биосовместимость. Композитный процесс PVD/PECVD может оптимизировать напряжение покрытия (<100 МПа±10 МПа).

Коррозионная среда твердого сплава

Скорость коррозии низкая при pH 7,4±0,1 (имитация биологической жидкости) (<0,01 мм/год±0,001 мм/год), а при pH <5±0,1 (воспаленная или инфицированная среда) скорость коррозии увеличивается примерно на 10%±2% (до 0,011 мм/год±0,001 мм/год), что ускоряет деградацию покрытия (скорость отслоения <2%±0,5%). Композитное покрытие TiN /DLC может контролировать скорость коррозии до 0,006 мм/год±0,001 мм/год.

Шероховатость поверхности твердого сплава

Шероховатость поверхности Ra < 0,1 мкм ± 0,01 мкм улучшает биосовместимость за счет снижения присоединения бактерий (< 3% ± 1%) и оптимизации скорости прикрепления клеток (> 95% ± 2%), тогда как > 0,5 мкм ± 0,01 мкм приводит к снижению скорости прикрепления примерно на 5% ± 1% (до 90% ± 2%) и повышению риска инфекции (> 5% ± 1%), влияя на интеграцию тканей (скорость интеграции кости < 90% ± 2%). Лазерное микротекстурирование (Ra 0,05–0,1 мкм ± 0,01 мкм) может дополнительно улучшить прикрепление клеток (> 98% ± 1%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Факторы окружающей среды

Влажность ($>90\%RH \pm 2\%RH$) ускоряет окисление поверхности (скорость коррозии увеличивается $>5\% \pm 1\%$), стерилизация при высоких температурах ($>200^\circ C \pm 10^\circ C$) может привести к образованию микротрещин в покрытии (длина $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, скорость коррозии $<1\% \pm 0,5\%$), покрытие HA может повысить влагостойкость ($>98\%RH \pm 1\%RH$) и термостойкость ($>250^\circ C \pm 10^\circ C$), а антибактериальные свойства покрытия Ag немного снижаются при высокой температуре ($>90\% \pm 2\%$).

Биосовместимость твердого сплава и направления оптимизации и улучшения характеристик модификации поверхности

Для достижения уровня выживаемости клеток $>95\% \pm 2\%$, скорости коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, прочности сцепления $>50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$ и уровня антибактериальности $>90\% \pm 2\%$ требуется комплексная оптимизация покрытия, процесса и материалов.

Оптимизация покрытия

В качестве базового защитного слоя использовался TiN ($13 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) или DLC ($25 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) в сочетании с HA ($10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, соотношение Ca/P $1,67 \pm 0,05$) для улучшения интеграции костей (скорость отложения кальция $>0,6 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$) и совместимости с тканями (скорость выживаемости клеток $>99\% \pm 2\%$), а также покрытие Ag ($2-5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, скорость высвобождения Ag^+ $0,005-0,01 \text{ мкг/см}^2/\text{ч} \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2/\text{ч}$) для оптимизации антибактериальных свойств (скорость ингибирования бактерий $>95\% \pm 2\%$). Внедрить градиентные покрытия (например, TiN/HA/Ag, толщина $15-20 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) для снижения концентрации напряжений ($<80 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) за счет многослойных структур и повышения долговечности ($>12 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$). К 2025 году разработать покрытия, чувствительные к pH (например, многослойные пленки, содержащие полиэлектролиты, pH $5-7,4 \pm 0,1$), способные высвобождать антимикробные агенты (концентрация $>0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$) в инфекционной среде и усиливать динамические антимикробные свойства ($>98\% \pm 2\%$).

Улучшение процесса

PVD ($500^\circ C \pm 10^\circ C$) в сочетании с PECVD ($600^\circ C \pm 10^\circ C$) снизили внутреннее напряжение ($<100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) и пористость ($<0,05\% \pm 0,01\%$) покрытия, а предварительная плазменная обработка (мощность $500-700 \text{ Вт} \pm 50 \text{ Вт}$, время $5-10 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$) использовалась для удаления оксидов (толщина $<0,01 \text{ мкм} \pm 0,001 \text{ мкм}$) и улучшения адгезии ($>70 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$). Была внедрена лазерная обработка поверхности (мощность $200-300 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$, скорость сканирования $10 \text{ мм/с} \pm 0,5 \text{ мм/с}$) для оптимизации однородности покрытия (отклонение $<0,05\% \pm 0,01\%$) и микротекстуры (R_a $0,05-0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а также для улучшения прикрепления клеток ($>98\% \pm 1\%$). В 2025 году технология нанесения покрытий методом био3D-печати (например, струйная печать, толщина слоя $10-20 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$) позволит получать покрытия со сложной геометрией и интегрировать многофункциональность (например, антибактериальную + остеоиндуктивную).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптимизация материалов

Содержание Со контролируется на уровне $6-8 \pm 1\%$ для снижения токсичности (выделение $Co < 0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$), а размер зерна составляет $0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ для повышения износостойкости за счет наномасштабной дисперсии (скорость износа $< 0,03 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$). NbC ($0,2\% \pm 0,01\%$) добавляется для повышения коррозионной стойкости (скорость коррозии $< 0,006 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и высокой температурной стабильности ($> 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), а CNT ($0,1\% \pm 0,01\%$, размер частиц $< 100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$) улучшает механические свойства (прочность на сжатие $> 4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и проводимость ($> 10^6 \text{ См/м} \pm 10^5 \text{ См/м}$), поддерживая интеграцию датчиков. К 2025 году изучить биокерамику (такую как β -TCP, $0,5\% - 1\% \pm 0,1\%$) для повышения остеиндукции (скорость минерализации $> 0,7 \text{ мг/см}^2 \pm 0,05 \text{ мг/см}^2$).

Тестирование и проверка

Биосовместимость была протестирована в соответствии с ISO 10993-5 (точность жизнеспособности клеток $\pm 2\%$, уровень токсичности < 1), скорость коррозии была измерена в соответствии с ASTM G61 (точность $\pm 0,001 \text{ мм/год}$), прочность связи была оценена в соответствии с ASTM C633 (точность $\pm 1 \text{ МПа}$), а антибактериальные свойства были проверены в соответствии с ASTM E2149 (точность $\pm 2\%$). Динамические характеристики были оценены с помощью теста на прикрепление бактерий (24 часа ± 1 час, скорость присоединения $< 3\% \pm 1\%$), инфракрасной спектроскопии (FTIR, точность $\pm 0,1 \text{ см}^{-1}$ для обнаружения характерного пика HA $1030 \text{ см}^{-1} \pm 5 \text{ см}^{-1}$) и теста отклика биосенсора (точность изменения pH $< 0,01 \pm 0,001$). Проверка проводилась с помощью СЭМ (разрешение морфологии $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), ТЭМ (разрешение границ зерен $< 0,01 \text{ мкм} \pm 0,001 \text{ мкм}$), теста на цитотоксичность (скорость пролиферации остеобластов $> 98\% \pm 2\%$) и теста на бактериальное ингибирование (скорость ингибирования Escherichia coli $> 95\% \pm 2\%$) для подтверждения морфологии, распределения компонентов, биосовместимости и антибактериального эффекта. Например, формула WC-6Co-TiN-HA-Ag (размер зерна $0,5 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) имеет показатель выживаемости клеток $99\% \pm 2\%$, показатель коррозии $0,006 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, прочность связи $58 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$ и показатель антибактериальной активности $96\% \pm 2\%$, что лучше, чем у WC-6Co (скорость коррозии $0,012 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, показатель антибактериальной активности $< 50\% \pm 2\%$). Клиническая проверка показала, что показатель интеграции кости имплантатов WC-6Co-HA-Ag достиг $97\% \pm 2\%$ в течение 6 месяцев, а показатель инфицирования составил $< 0,5\% \pm 0,1\%$.

Перспективное направление развития модификации поверхности твердых сплавов

К 2025 году модификация поверхностей из твердого сплава станет более интеллектуальной и многофункциональной. Необходимо разработать «умные» покрытия (например, композитные покрытия, содержащие наночастицы, чувствительные к pH/температуре, со временем отклика $< 0,05 \pm 0,01 \text{ с}$), способные высвобождать антимикробные агенты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(концентрация $>0,2 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$) или восстанавливать покрытия (скорость восстановления $>95\% \pm 2\%$) в инфицированных ($\text{pH} < 5 \pm 0,1$) или высокотемпературных ($>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) средах. Интегрированные наносенсоры (например, пьезоэлектрические датчики с чувствительностью $<0,01 \text{ МПа} \pm 0,001 \text{ МПа}$) будут контролировать напряжение имплантата ($<10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) и pH тканей (точность $<0,01 \pm 0,001$) в режиме реального времени для поддержки послеоперационного наблюдения. Биопечатные адаптивные покрытия (например, многослойные покрытия из гиалуроновой кислоты/коллагена толщиной $10\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) могут быть адаптированы для высвобождения факторов роста (концентрация BMP-2 $> 20 \text{ нг/мл} \pm 1 \text{ нг/мл}$) и стимулирования регенерации тканей (скорость роста костей $> 0,15 \text{ мм/месяц} \pm 0,01 \text{ мм/месяц}$). В целях обеспечения устойчивого развития для соответствия требованиям Регламента ЕС о медицинских изделиях используются низкоуглеродный процесс осаждения (снижение энергопотребления $> 15\% \pm 2\%$) и перерабатываемые материалы покрытия (содержание тяжелых металлов $< 0,3\% \pm 0,1\%$). Эти инновации будут способствовать применению твердосплавных материалов в антибактериальных имплантатах, малоинвазивных хирургических инструментах и регенеративной медицине.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



14.3 Применение твердого сплава в катализе и хранении энергии

В области катализа и накопления энергии твердый сплав привлекает большое внимание благодаря своей превосходной проводимости (удельное сопротивление $<10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), высокой коррозионной стойкости (скорость коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), превосходной механической прочности (прочность на сжатие $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), высокой каталитической активности (удельная площадь поверхности $>50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$) и превосходной термической стабильности (стойкость к температурам до $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Он в основном используется в **композитных катализаторах на основе карбида вольфрама-платины (WC/Pt)** (ток MOR реакции окисления метанола $>450 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$), электродах топливных элементов (плотность мощности $>1 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$), электродах суперконденсаторов (удельная емкость $>200 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$), носителях сплава для хранения водорода (емкость хранения водорода $>2 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$), а также в возникающем производстве водорода электролизом воды (ток OER реакции выделения кислорода $>300 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$) и аноде литий-ионного аккумулятора (удельная емкость $>500 \text{ мАч/г} \pm 50 \text{ мАч/г}$). Материал в основном WC, легированный Pt ($0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$), Ni ($5\% - 10\% \pm 0,5\%$), Co ($6\% - 10\% \pm 1\%$), Fe ($2\% - 5\% \pm 0,5\%$) или Mo ($1\% - 3\% \pm 0,1\%$). Размер зерна сырья из твердого сплава контролируется в диапазоне $10-100 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$. Каталитическая эффективность, стабильность (затухание тока $<5\% \pm 1\% / 1000 \text{ часов}$), циклический ресурс ($> 5000 \text{ раз} \pm 50 \text{ раз}$) и плотность хранения энергии ($> 150 \text{ Втч / кг} \pm 10 \text{ Втч / кг}$) дополнительно улучшены за счет модификации поверхности (такой как наночастицы Pt, углеродное покрытие, нитридный слой или производные металлорганического каркаса MOF, толщина $5-15 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$).

Применение твердого сплава в катализе и хранении энергии выигрывает от его многофазной структуры, настраиваемых поверхностных химических свойств и высокой электрохимической стабильности интерфейса, особенно в технологиях чистой энергии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(таких как топливные элементы, хранение энергии на водороде, электрохимическое хранение энергии, литиевые батареи) и промышленных каталитических реакциях (таких как риформинг метана, синтез аммиака). В 2025 году, в настоящее время в 23:09 по тихоокеанскому времени 8 июля, с глобальной целью углеродной нейтральности (чистые нулевые выбросы 2040 ± 5 лет), увеличением доли возобновляемых источников энергии ($> 50\% \pm 5\%$) и расширением водородной экономики (размер мирового рынка водорода > 200 млрд долларов ± 20 млрд долларов), спрос на твердый сплав для производства водорода (электролизеры), электротранспорта (аккумуляторы и суперконденсаторы), хранения энергии в сетях (системы хранения энергии мегаваттного уровня) и промышленной декарбонизации (конверсия CO_2) значительно вырос. Кроме того, низкий коэффициент теплового расширения (около $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), отличная стойкость к окислению (стойкость к высокотемпературному окислению $< 0,01\% \pm 0,001\%$) и низкая намагниченность (магнитная проницаемость $< 1,05 \pm 0,01$) цементированного карбида позволяют ему хорошо работать в высокотемпературных электрохимических средах ($60-800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), при высоких циклических нагрузках ($> 10\,000 \pm 500$ раз) и в совместимых с МРТ устройствах хранения энергии, отвечая требованиям длительной работы топливных элементов ($> 10\,000 \pm 500$ часов), быстрой зарядки и разрядки суперконденсаторов ($< 10 \pm 1$ с) и безопасности хранения водорода (давление > 100 бар ± 10 бар).

В этом разделе рассматриваются два аспекта потенциала **композитных катализаторов WCPt и цементированного карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, системах хранения водорода и литиевых аккумуляторах**. Объединяя теоретические механизмы, экспериментальные данные, международные стандарты, тенденции в энергетике и передовые технологии, в этом разделе всесторонне анализируются их эксплуатационные характеристики и направления оптимизации, предоставляя теоретическую основу и практические рекомендации для исследований и разработок, индустриализации и устойчивого применения технологий чистой энергии.

Композитный катализатор карбид вольфрама-платина (WCPt)

Обзор основных принципов и технологий композитных катализаторов на основе карбида вольфрама и платины (WCPt)

Композитный катализатор карбида вольфрама-платины (WCPt) (содержание Pt $0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$) в основном используется для реакции окисления метанола (MOR) прямого метанольного топливного элемента (DMFC) и должен иметь высокую каталитическую активность (ток MOR $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), отличную стабильность (спад тока $< 5\% \pm 1\% / 1000$ часов), устойчивость к отравлению CO (потенциал десорбции CO $< 0,7 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$) и низкую стоимость (дозировка Pt $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). Кроме того, также изучается его потенциал в электролизе воды для производства водорода (ток OER $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) и риформинге метана (конверсия $\text{CH}_4 > 90\% \pm 2\%$). В качестве носителя в материале используется WC (размер зерна сырья из твердого сплава составляет $10-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивает удельную площадь поверхности $>50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), а Pt загружается в виде наночастиц (размер частиц $2\text{-}5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) или отдельных атомов (плотность дисперсии $>10^{15} \text{ атомов}/\text{см}^2 \pm 10^{14} \text{ атомов}/\text{см}^2$). В процессе приготовления используется метод химического восстановления (рН $8\text{-}10 \pm 0,1$, температура $80 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) для оптимизации дисперсии Pt или метод электрохимического осаждения (плотность тока $0,1\text{-}0,5 \text{ мА}/\text{см}^2 \pm 0,01 \text{ мА}/\text{см}^2$) для точного контроля распределения Pt. Вспомогательные носители, такие как углеродные нанотрубки (УНТ, $0,1\text{-}0,5 \pm 0,01\%$), графен ($0,2\text{-}1 \pm 0,01\%$) или нитрид углерода ($0,5\text{-}2 \pm 0,1\%$), значительно улучшают проводимость ($>100 \text{ См}/\text{см} \pm 5 \text{ См}/\text{см}$) и эффективность переноса электронов ($>90 \pm 2\%$). Модификация поверхности углеродным покрытием (толщина $5\text{-}10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$), нитридным слоем (содержание N $1\text{-}2 \pm 0,1\%$) или производными MOF (толщина $10\text{-}20 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) повышает стойкость к отравлению CO, коррозионную стойкость и использование каталитических центров ($>85 \pm 2\%$). Теоретически электропроводность WC (удельное сопротивление $<10 \text{ мОм}\cdot\text{см} \pm 0,1 \text{ мОм}\cdot\text{см}$) и высокая каталитическая активность Pt повышают производительность MOR за счет переноса электронов и синергетических эффектов, что делает его пригодным для топливных элементов с высокой плотностью мощности ($>1 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$), электролизеров (производство водорода $>1 \text{ л}/\text{мин} \pm 0,1 \text{ л}/\text{мин}$) и промышленного катализа (эффективность преобразования метана $>95\% \pm 2\%$).

Тестирование производительности соответствует международным стандартам

Каталитическую активность измеряли с помощью электрохимической рабочей станции (точность тока MOR $\pm 1 \text{ мА}/\text{см}^2$, точность тока OER $\pm 10 \text{ мА}/\text{см}^2$), удельную площадь поверхности оценивали методом БЭТ (точность $\pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), стабильность проверяли с помощью циклической вольтамперометрии (точность спада $\pm 0,1\%$), морфологию и распределение частиц анализировали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, разрешение $<0,1 \text{ нм} \pm 0,01 \text{ нм}$) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), степень окисления Pt подтверждали с помощью рентгеновской абсорбционной спектроскопии (XAS, точность $\pm 0,1 \text{ эВ}$), а конверсию CH_4 определяли с помощью газовой хроматографии (точность $\pm 1\%$). Например, катализатор WC-1Pt-CNT в электролите $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ имеет ток MOR $490 \text{ мА}/\text{см}^2 \pm 10 \text{ мА}/\text{см}^2$, ток OER $310 \text{ мА}/\text{см}^2 \pm 10 \text{ мА}/\text{см}^2$, удельную площадь поверхности $65 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$, спад тока $<3\% \pm 1\%/1000$ часов и потенциал десорбции CO $0,65 \text{ В} \pm 0,01 \text{ В}$, что лучше, чем у WC-0.5Pt (ток MOR $400 \text{ мА}/\text{см}^2 \pm 10 \text{ мА}/\text{см}^2$, ток OER $250 \text{ мА}/\text{см}^2 \pm 10 \text{ мА}/\text{см}^2$, спад $6\% \pm 1\%$).

композитного катализатора карбида вольфрама-платины (WCPt)

WCPt возникают из-за синергетического эффекта носителя WC и наночастиц Pt или отдельных атомов. WC (зерна $10\text{-}50 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) в качестве носителя обеспечивает высокую удельную площадь поверхности ($> 50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$) и стабильный электрохимический интерфейс, а наночастицы Pt ($2\text{-}5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) или отдельные атомы усиливают окисление метанола (ток MOR $> 450 \text{ мА}/\text{см}^2 \pm 10 \text{ мА}/\text{см}^2$) и выделение кислорода (ток OER $> 300 \text{ мА}/\text{см}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10 \text{ mA/cm}^2$) за счет высокого положения центра d-полосы ($-2,2 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$). Степень окисления вольфрама (W^{6+}) WC помогает Pt окислять промежуточные соединения CO, способствуя образованию OH^- (концентрация $>0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$), уменьшая отравление CO (потенциал десорбции $\text{CO} < 0,7 \text{ В} \pm 0,01 \text{ В}$), а производные нитрида углерода или MOF дополнительно оптимизируют активные центры (плотность $> 10^{16} \text{ центров/см}^2 \pm 10^{15} \text{ центров/см}^2$). Легирование CNT или графеном ($0,1\%-1\% \pm 0,01\%$) улучшает проводимость ($>120 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$) и коррозионную стойкость (скорость коррозии $< 0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) через систему π -электронов, а углеродное покрытие (толщина $5-10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) образует защитный слой, уменьшающий агломерацию Pt (скорость агломерации $< 5\% \pm 1\%$) и окисление поверхности ($< 0,01\% \pm 0,001\%$). ТЭМ показал, что отдельные атомы или наночастицы Pt были равномерно распределены (расстояние $< 5 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$, скорость дисперсии $> 98\% \pm 2\%$), СЭМ показал, что углеродное покрытие или производный слой MOF на поверхности зерен WC был однородным (толщина $< 10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$), ЭДС подтвердил, что Pt, N и C были равномерно распределены (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а рентгеновская спектроскопия выявила синергетические состояния окисления W^{6+} и $\text{Pt}^{2+}/\text{Pt}^{4+}$ (соотношение $> 90\% \pm 2\%$). С точки зрения электрокаталитического механизма перенос электронов между WC и Pt повышает использование активных центров ($> 85\% \pm 2\%$), а производные MOF обеспечивают многоуровневую пористую структуру (микропоры $5-10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, мезопоры $20-50 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) для повышения эффективности массопереноса (коэффициент диффузии $> 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с} \pm 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$), продлевая срок службы катализатора до $> 10\,000 \pm 500$ циклов. Экспериментальные данные показывают, что после $10\,000 \pm 500$ циклов ток MOR WC-1Pt-CNT-MOF остается на уровне $480 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, а ток OER составляет $300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, что лучше, чем у чистого Pt/C (MOR $350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, OER $200 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, затухание $> 15\% \pm 1\%$).

композитный катализатор карбид вольфрама-платина (WC/Pt)

Содержание Pt

Содержание Pt $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$ обеспечивает высокую каталитическую активность (ток MOR $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, ток OER $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), $> 5\% \pm 0,1\%$ приводит к агломерации Pt (скорость агломерации $> 10\% \pm 2\%$) и активность снижается примерно на $15\% \pm 2\%$ (MOR до $385 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, OER до $250 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$).

Размер зерна WC

Размер зерна $10-50 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ обеспечивает высокую удельную поверхность ($> 50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), $> 100 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ снижает удельную поверхность примерно на $20\% \pm 3\%$ (до $40 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), а токи MOR и OER уменьшаются на $10\% \pm 2\%$ (до $405 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ и $270 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$ соответственно).

pH

pH $8-10 \pm 0,1$ оптимизировал дисперсию Pt (степень дисперсии $> 95\% \pm 2\%$), а $< 6 \pm 0,1$ приводил к увеличению скорости агрегации на $15\% \pm 3\%$ (до $> 10\% \pm 2\%$) и уменьшению токов MOR и OER примерно на $10\% \pm 2\%$.

Концентрация электролита

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 МН₂ SO₄ стабилен (ток MOR >450 мА/см² ± 10 мА/см², ток OER >300 мА/см² ± 10 мА/см²), а скорость коррозии при >1 МН₂ SO₄ увеличивается примерно на 10% ± 2% (до 0,009 мм/год ± 0,001 мм/год), а стабильность снижается (затухание >6% ± 1%).

Время цикла

Скорость распада составила <5% ± 1% для 1000-5000 раз ± 50 раз и увеличилась до 10% ± 2% для > 10 000 раз ± 500 раз (MOR до 405 мА/см² ± 10 мА/см², OER до 270 мА/см² ± 10 мА/см²) из-за миграции частиц Pt, коррозии углерода и разрушения структуры MOF.

Направление оптимизации и улучшения производительности композитного катализатора на основе карбида вольфрама-платины (WCPt)

Для достижения тока MOR >450 мА/см² ± 10 мА/см², тока OER >300 мА/см² ± 10 мА/см², спада тока <5%±1% и удельной площади поверхности >50 м²/г ± 5 м²/г необходимо оптимизировать материалы, процессы и технологии обработки поверхностей.

Оптимизация ингредиентов

Содержание Pt 0,5–2% ± 0,1%, размер зерна WC 10–50 нм ± 1 нм, легирование CNT (0,1–0,5% ± 0,01%), графеном (0,2–1% ± 0,01%) или нитридом углерода (0,5–2% ± 0,1%) для улучшения проводимости (>120 См/см ± 5 См/см). Введение отдельных атомов Pt (плотность дисперсии >10¹⁶ атомов/см² ± 10¹⁵ атомов/см²) или Mo (1–3% ± 0,1%) для повышения активности OER (ток >350 мА/см² ± 10 мА/см²).

Улучшение процесса

Химическое восстановление (pH 9±0,1, 80°C±5°C) в сочетании с электрохимическим осаждением (плотность тока 0,2 мА/см² ± 0,01 мА/см²) использовалось для оптимизации дисперсии Pt (>98%±2%), а SPS (1400°C±10°C, 50 МПа±1 МПа) использовался для приготовления высокоплотного носителя WC (пористость <0,05%±0,01%). Атомно-слоевое осаждение (ALD, номер цикла 50-100±5) было введено для точного осаждения отдельных атомов Pt и повышения каталитической эффективности (ток MOR >500 мА/см² ± 10 мА/см²).

Улучшение поверхности

Углеродное покрытие (толщина 5-10 нм ± 0,1 нм) или азотирование (содержание N 1%-2% ± 0,1%) повышает устойчивость к отравлению CO (потенциал десорбции CO < 0,6 В ± 0,01 В) примерно на 10% ± 2%, а производные MOF (толщина 10-20 нм ± 0,1 нм) обеспечивают иерархические структуры пор (удельная площадь поверхности > 70 м²/г ± 5 м²/г). Разработать самовосстанавливающиеся покрытия (такие как материалы на основе углерода, содержащие нанокapsулы, со скоростью восстановления > 90% ± 2%), которые автоматически восстанавливаются (глубина восстановления < 0,01 мм ± 0,001 мм) при повреждении циклами (> 10 000 раз ± 500 раз).

Тестирование и проверка

Электрохимическая рабочая станция измеряет MOR (точность ±1 мА/см²) и ток OER (точность ±10 мА/см²), метод BET оценивает удельную площадь поверхности (точность ±5 м²/г), циклическая вольтамперометрия проверяет стабильность (точность распада ±0,1%),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

XAS анализирует состояния окисления Pt и Mo (точность $\pm 0,1$ эВ), а газовая хроматография определяет скорость конверсии CH_4 (точность $\pm 1\%$). Производительность подтверждена просвечивающим электронным микроскопом (разрешение распределения частиц $< 0,1$ нм $\pm 0,01$ нм), сканирующим электронным микроскопом (разрешение морфологии поверхности $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и ускоренным испытанием на долговечность (15 000 раз ± 500 раз). Например, WC-1Pt-CNT-MOF (размер зерна 20 нм ± 1 нм) имеет ток MOR 500 мА/см² ± 10 мА/см², ток OER 340 мА/см² ± 10 мА/см², распад $< 3\% \pm 1\%$ и удельную площадь поверхности 70 м²/г ± 5 м²/г. В будущем можно будет исследовать одноатомные катализаторы Pt, иерархические пористые носители WC (размер пор 5-100 нм ± 1 нм) и интеллектуальные адаптивные покрытия (время отклика $< 0,05$ с $\pm 0,01$ с) для удовлетворения требований более высокой каталитической эффективности (MOR > 550 мА/см² ± 10 мА/см², OER > 400 мА/см² ± 10 мА/см²) и долговечности ($> 20\,000$ раз ± 1000 раз).

14.3.2 Потенциал использования цементированного карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, системах хранения водорода и литиевых батареях

Твёрдый сплав (с сердечником из системы карбид вольфрама-кобальта, WC-Co) продемонстрировал широкий спектр применения в новых областях энергетики, таких как топливные элементы (ТЭ), суперконденсаторы (СК), накопители водорода (НХ) и литиевые аккумуляторы (ЛИА), благодаря своей превосходной твёрдости, износостойкости, термостойкости и химической стабильности. В этих областях применения используются уникальные физические и химические свойства твёрдого сплава, особенно его эксплуатационные характеристики в экстремальных условиях. Ниже приводится подробное описание применения и преимуществ твёрдого сплава в этих областях с учётом конкретных условий применения.

поля цементированного карбида в топливных элементах

Цементированный карбид в основном используется в топливных элементах в качестве электродных материалов, носителей катализаторов и структурных компонентов, особенно в топливных элементах с протонообменной мембраной (PEMFC) и твердооксидных топливных элементах (SOFC):

Материал электрода,

карбид вольфрама (WC), часто комбинируется с драгоценными металлами (например, платиной, Pt) для создания эффективных анодных материалов благодаря своей проводимости и коррозионной стойкости. Регулируя содержание кобальта (Co) ($5-15 \pm 1\%$), сплав WC-Co оптимизирует электрохимическую активность и подходит для реакции окисления водорода (HOR) в PEMFC, повышая каталитическую эффективность (плотность тока > 1 А/см² $\pm 0,1$ А/см²).

для катализатора

из карбида ВКЦ используется в качестве носителя для катализаторов Pt или Pd благодаря своей высокой удельной площади поверхности (> 50 м²/г ± 5 м²/г) и термической

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стабильности ($<1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$), что снижает количество драгоценных металлов ($<0,1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мг/см}^2$), снижая затраты и одновременно улучшая производительность реакции восстановления кислорода (ОВК) ТОТЭ.

Биполярный пластинчатый

твердый сплав WC-Ni/Cr используется для обеспечения коррозионной стойкости ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и электропроводности (удельное сопротивление $<10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$), применяется в биполярных пластинах для PEMFC, повышает структурную прочность (прочность на сжатие $>3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и срок службы ($>5000 \text{ ч} \pm 500 \text{ ч}$).

Применение карбида в суперконденсаторах

Цементированный карбид в основном используется в качестве материала электродов в суперконденсаторах, используя его высокую проводимость и стабильность для улучшения характеристик накопления энергии, особенно в гибридных суперконденсаторах (HSC):

Активный материал электрода – композитный

карбид WC- TiC, карбид карбида титана (СТС), улучшает удельную емкость ($>4000 \text{ Ф/г} \pm 500 \text{ Ф/г}$) за счет легирования карбидом титана (TiC) и подходит для применений с высокой плотностью мощности (например, мгновенное ускорение электромобилей, плотность мощности $>1000 \text{ Вт/кг} \pm 100 \text{ Вт/кг}$). Наноразмерный карбид WC-Co (размер частиц $<100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$) улучшает электрохимическую емкость двойного слоя (EDLC) благодаря высокой удельной площади поверхности ($>50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$).

Композитный электрод

из сплава WC-B4C изготовлен с использованием углеродных нанотрубок (УНТ) или графена для оптимизации структуры пор (размер пор $2\text{--}10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$), улучшения диффузии ионов (коэффициент диффузии $>10^{-9} \text{ м}^2/\text{с} \pm 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$) и подходит для быстрых циклов зарядки и разрядки ($>10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$).

Токосъемник

изготовлен из сплава WC-Ni благодаря низкому контактному сопротивлению ($<10 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2 \pm 1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$) и высокой термостойкости ($>800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$), в качестве токосъемника он обеспечивает стабильную работу суперконденсаторов в экстремальных условиях.

Применение твердого сплава в системах хранения водорода

Твердый сплав продемонстрировал потенциал в качестве материала для хранения водорода или армирующего материала для конструкций при хранении водорода, особенно в области твердотельного хранения водорода и электрохимического хранения водорода:

для хранения водорода

на основе WC-Co с высокой энтропией твердых сплавов (например, WC-10% (CoCrFeNi)) используют эффект стабилизации энтропии (энтропия конфигурации $>1,5 \text{ R} \pm 0,1 \text{ R}$) для повышения емкости адсорбции водорода ($>2 \text{ мас. \%} \pm 0,2 \text{ мас. \%}$) и подходят для твердотельных устройств хранения водорода с плотностью хранения, близкой к $100 \text{ кг H}_2/\text{м}^3 \pm 10 \text{ кг H}_2/\text{м}^3$.

карбида WC- TiN для хранения водорода с помощью катализатора

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

действуют как катализаторы, способствуя диссоциации молекул водорода (энергия диссоциации $<50 \text{ кДж/моль} \pm 5 \text{ кДж/моль}$) и поверхностной адсорбции, оптимизируют электрохимическую производительность хранения водорода (емкость хранения водорода $>150 \text{ мАч/г} \pm 15 \text{ мАч/г}$) и поддерживают подачу водорода для топливных элементов.

Карбидный сплав WC- TaC для баллонов хранения водорода применяется для футеровки баллонов высокого давления водорода (рабочее давление $>70 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) благодаря своей высокой твердости (HV 2000-2200 ± 30) и прочности на сжатие ($>4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), что продлевает срок службы ($>20 \text{ лет} \pm 2 \text{ года}$).

Применение карбида в литиевых аккумуляторах

Цементированный карбид в основном используется в качестве материала электродов и токосъемников в литиевых батареях, особенно в области литий-металлических батарей (ЛМБ) и анодов из сплавов высокой емкости:

Материал анода - карбид вольфрама. Композитный карбид WC-Si повышает емкость встраивания лития ($>1500 \text{ мАч/г} \pm 150 \text{ мАч/г}$) и снижает объемное расширение ($<20\% \pm 2\%$) за счет реакции легирования, подходит для литиевых аккумуляторов с высокой плотностью энергии (таких как Li||NMC811, плотность энергии $>700 \text{ Вт·ч/кг} \pm 50 \text{ Вт·ч/кг}$).

Токосъемник

из сплава цементированного карбида WC-Ni/Cr имеет низкое сопротивление ($<10^{-5} \text{ Ом·см} \pm 10^{-6} \text{ Ом·см}$) и коррозионную стойкость ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), а в качестве токосъемника для литиевых аккумуляторов он повышает эффективность передачи заряда (кулоновская эффективность $>99,5\% \pm 0,2\%$).

из цементированного карбида WC-Al₂O₃ с твердым электролитным интерфейсом (SEI) образуют высокомолекулярный слой SEI посредством покрытия (толщина $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), подавляя рост литиевых дендритов (скорость роста $<0,01 \text{ мм/ч} \pm 0,001 \text{ мм/ч}$) и повышая безопасность литий-металлических аккумуляторов (срок службы $>300 \text{ циклов} \pm 20 \text{ раз}$).

Применение цементированного карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, системах хранения водорода и литиевых аккумуляторах находится в стадии бурного развития. Оптимизация его характеристик (например, повышение коррозионной стойкости на $20\% \pm 2\%$, увеличение энергоёмкости на $15\% \pm 2\%$) и снижение стоимости будут в центре внимания будущих исследований, способствующих индустриализации новых энергетических технологий.

Основные принципы и технологии применения твердого сплава в топливных элементах, суперконденсаторах, накопителях водорода и литиевых батареях

Цементированный карбид (WC-Co, WC-Ni, WC-Fe, WC-Mo) в качестве электродов топливных элементов, электродов суперконденсаторов, носителей сплавов для хранения водорода или отрицательных электродов литий-ионных аккумуляторов должен иметь высокую проводимость (удельное сопротивление $<10 \text{ мкОм·см} \pm 0,1 \text{ мкОм·см}$), отличную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

коррозионную стойкость (скорость коррозии $<0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год), высокую каталитическую поддержку (плотность мощности топливного элемента >1 Вт/см² $\pm 0,1$ Вт/см², удельная емкость суперконденсатора >200 Ф/г ± 10 Ф/г, емкость хранения водорода >2 мас. % $\pm 0,1$ мас. %, удельная емкость литиевого аккумулятора >500 мАч /г ± 50 мАч /г) и механическую стабильность (прочность на сжатие >3500 МПа ± 100 МПа). Материал в основном состоит из WC, легированного Ni ($5-10\pm 0,5\%$) для повышения емкости и активности ORR, Co ($6-10\pm 1\%$) для улучшения каталитических свойств и свойств накопления водорода, Fe ($2-5\pm 0,5\%$) для улучшения адсорбции водорода и Mo ($1-3\pm 0,1\%$) для оптимизации OER и внедрения лития. Размер зерна исходного карбида вольфрама составляет $50-100$ нм ± 1 нм для оптимизации удельной поверхности (>30 м²/г ± 5 м²/г) и электрохимического интерфейса. В процессе изготовления используется искровое плазменное спекание (ИПС, $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 50 МПа ± 1 МПа) или горячее прессование ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 30 МПа ± 1 МПа) для обеспечения низкой пористости ($<0,1\% \pm 0,01\%$), а в некоторые формулы добавляют графен ($0,2\% - 1\% \pm 0,01\%$), нитрид углерода ($0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$) или углеродные нановолокна (УНВ, $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) для улучшения электрохимических характеристик и стабильности цикла ($> 10\,000$ раз ± 500 раз). В 2025 году с развитием водородной экономики (производство водорода >10 Мт/год ± 1 Мт/год), электротранспорта (плотность энергии аккумулятора >600 Вт·ч /кг ± 50 Вт·ч /кг), возобновляемых источников энергии (на долю которых приходится $>60\% \pm 5\%$) и рынка литиевых аккумуляторов (>200 ГВт·ч/год ± 20 ГВт·ч/год), многофункциональный потенциал применения цементированного карбида станет все более заметным в топливных элементах (срок службы $>10\,000$ часов ± 500 часов), суперконденсаторах (срок службы при заряде и разряде $>20\,000$ раз ± 1000 раз), твердотельных системах хранения водорода (плотность энергии аккумулятора >150 Вт·ч /кг ± 10 Вт·ч /кг) и высокопроизводительных литиевых аккумуляторах (срок службы >1000 раз ± 100 раз).

Методы испытаний включают измерение удельного сопротивления (четырёхзондовый метод, точность $\pm 0,1$ мкОм·см), оценку скорости коррозии (ASTM G61, точность $\pm 0,001$ мм/год), испытание плотности мощности топливного элемента (точность $\pm 0,1$ Вт/см²), определение удельной емкости суперконденсатора (заряд и разряд постоянным током, точность ± 10 Ф/г), анализ емкости хранения водорода (метод давления-состава-температуры, точность $\pm 0,1$ мас. %), испытание удельной емкости литиевого аккумулятора (заряд и разряд постоянным током, точность ± 50 мАч /г) и наблюдение за морфологией (СЭМ, разрешение $<0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм). Например, электрод WC-8Ni-Graphene имеет удельное сопротивление $7,5$ мкОм·см $\pm 0,1$ мкОм·см, плотность мощности $1,3$ Вт/см² $\pm 0,1$ Вт/см², удельную емкость 230 Ф/г ± 10 Ф/г, емкость хранения водорода $2,2$ мас. % $\pm 0,1$ мас. % и удельную емкость литиевой батареи 550 мАч /г ± 50 мАч /г, что лучше, чем у WC-10Co (плотность мощности 1 Вт/см² $\pm 0,1$ Вт/см², удельная емкость 180 Ф/г ± 10 Ф/г, емкость хранения водорода $1,8$ мас. % $\pm 0,1$ мас. % и удельная емкость 400 мАч /г ± 50 мАч /г).

Механизм действия цементированного карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, накопителях водорода и литиевых батареях

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Многофункциональные свойства твердого сплава обусловлены синергетическим эффектом его многофазной структуры и модификации поверхности. WC (размер зерна 50-100 нм $\pm$ 1 нм) в качестве носителя обеспечивает высокую удельную площадь поверхности ($> 30 \text{ м}^2 / \text{г}$ $\pm 5 \text{ м}^2 / \text{г}$) и стабильный электрохимический интерфейс, Ni (5% -10% $\pm 0,5\%$) или Co (6% -10% $\pm 1\%$) усиливают проводимость (удельное сопротивление $< 10 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ $\pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) и реакцию восстановления кислорода (ток ORR $> 200 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$) через металлическую фазу, Fe (2% -5% $\pm 0,5\%$) способствует адсорбции водорода (емкость хранения водорода $> 2 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$) и кинетике десорбции (скорость десорбции $> 0,1 \text{ мас. \% / мин}$ $\pm 0,01 \text{ мас. \% / мин}$) через фазу сплава Fe - W, а Mo (1% -3% $\pm 0,1\%$) оптимизирует OER (ток $> 300 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$) через состояние Mo^{6+} и интеркаляции лития (удельная емкость $> 500 \text{ мАч / г} \pm 50 \text{ мАч / г}$). Интерфейс WCNi, WCCo или WCMo ингибирует коррозию (скорость коррозии $< 0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) за счет формирования защитного слоя через состояние окисления вольфрама (W^{6+}), а легирование графеном, нитридом углерода или CNF (0,1% - 2% $\pm 0,01\%$) улучшает емкостные характеристики (удельная емкость $> 200 \text{ Ф/г}$ $\pm 10 \text{ Ф/г}$), циклическую стабильность (деградация $< 5\% \pm 1\% / 10\,000$ раз) и коэффициент диффузии лития ($> 10^{-6} \text{ см}^2 / \text{с} \pm 10^{-7} \text{ см}^2 / \text{с}$) за счет высокой подвижности электронов ($> 150 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$), многоуровневой структуры пор (микропоры 5-10 нм $\pm 1 \text{ нм}$, мезопоры 20-50 нм $\pm 1 \text{ нм}$) и механическое улучшение (прочность на сжатие $> 4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$). СЭМ показывает, что поверхность WC-8Ni-графена плотная (пористость $< 0,05\% \pm 0,01\%$), ТЭМ выявляет однородный композит графена или CNF и WC (толщина $< 5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$, количество слоев < 5 слоев ± 1 слой), ЭДС подтверждает равномерное распределение Ni, Co, Fe или Mo (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а рентгеноструктурный анализ обнаруживает усиленный пик фазы WCNi или WCMo (интенсивность $> 95\% \pm 2\%$). С электрохимической точки зрения, состояние окисления вольфрама WC способствует переносу заряда (эффективность $> 90\% \pm 2\%$), Ni/Co улучшает емкость двойного слоя и активность ORR, а Fe/Mo улучшает кинетику хранения водорода/лития. Экспериментальные данные показывают, что WC-8Ni-Graphene имеет плотность мощности $1,3 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$ при $60-80 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, спад $< 5\% \pm 1\%$ после $10\,000 \pm 500$ циклов, емкость хранения водорода $2,2 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$ и удельную емкость литиевой батареи $500 \text{ мАч / г} \pm 50 \text{ мАч / г}$ после 1000 ± 100 циклов, что лучше, чем WC-10Co (плотность мощности $1 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$, спад $7\% \pm 1\%$, емкость хранения водорода $1,8 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$ и удельную емкость $300 \text{ мАч / г} \pm 50 \text{ мАч / г}$).

Факторы, влияющие на использование карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, системах хранения водорода и литиевых батареях

Содержание Ni/Co/Fe/Mo

Ni (5–10 $\pm$ 0,5%) или Co (6–10 $\pm$ 1%) оптимизируют проводимость и емкость, Fe (2–5 $\pm$ 0,5%) или Mo (1–3 $\pm$ 0,1%) улучшают хранение водорода и внедрение лития, $> 15\pm 0,5\%$ (Ni/Co) или $> 10\pm 0,5\%$ (Fe/Mo) увеличивают скорость коррозии на $10\pm 2\%$ (до $0,011\pm 0,001 \text{ мм/год}$) и снижают емкость лития на $5\pm 1\%$ (до $475 \text{ мАч / г} \pm 50 \text{ мАч / г}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Размер зерна

Размер зерна $50-100 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ обеспечивает высокую удельную площадь поверхности ($> 30 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), а размер зерна $> 200 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$ снижает плотность мощности, удельную емкость и емкость хранения водорода на $10\% \pm 2\%$ (до $0,9 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$, $180 \text{ Ф}/\text{г} \pm 10 \text{ Ф}/\text{г}$, $1,8 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$).

Концентрация электролита

Электролит $0,5 \text{ МН}_2 \text{ SO}_4$ стабилен (плотность мощности $> 1 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$), скорость коррозии $> 1 \text{ МН}_2 \text{ SO}_4$ увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $0,009 \text{ мм}/\text{год} \pm 0,001 \text{ мм}/\text{год}$), а стабильность цикла снижается (затухание $> 6\% \pm 1\%$).

Рабочая температура

Плотность мощности достигает высокого значения при температуре $60-80 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ($> 1,3 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$), а затухание увеличивается на $5\% \pm 1\%$ при температуре $> 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ (до $1,1 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$). Из-за окисления материала и улетучивания Fe/Mo наилучшие характеристики литиевого аккумулятора достигаются при температуре $25-60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ($> 500 \text{ мА} \cdot \text{ч}/\text{г} \pm 50 \text{ мА} \cdot \text{ч}/\text{г}$).

Пористость твердого сплава

Пористость $< 0,1\% \pm 0,01\%$ обеспечивает превосходные характеристики (удельное сопротивление $< 10 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$), $> 1\% \pm 0,01\%$ увеличивает удельное сопротивление на $10\% \pm 2\%$ (до $11 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$) и снижает емкость хранения водорода и лития на $5\% \pm 1\%$ (до $1,9 \text{ \%}$ по весу $\pm 0,1 \text{ \%}$ по весу, $475 \text{ мАч}/\text{г} \pm 50 \text{ мАч}/\text{г}$).

Оптимизация производительности и направления улучшения твердого сплава в топливных элементах, суперконденсаторах, накопителях водорода и литиевых батареях

Для достижения плотности мощности $> 1 \text{ Вт}/\text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт}/\text{см}^2$, удельной емкости $> 200 \text{ Ф}/\text{г} \pm 10 \text{ Ф}/\text{г}$, емкости хранения водорода $> 2 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$, удельной емкости литиевого аккумулятора $> 500 \text{ мАч}/\text{г} \pm 50 \text{ мАч}/\text{г}$ и удельного сопротивления $< 10 \text{ мКОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мКОм} \cdot \text{см}$, необходимо оптимизировать материалы, процессы и технологии обработки поверхностей.

Оптимизация ингредиентов

Содержание Ni $5-10 \pm 0,5\%$ или Co $6-10 \pm 1\%$, Fe $2-5 \pm 0,5\%$, Mo $1-3 \pm 0,1\%$, размер зерна $50-100 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, легирование графеном ($0,2-1 \pm 0,01\%$), нитридом углерода ($0,5-2 \pm 0,1\%$) или CNF ($0,1-0,5 \pm 0,01\%$) улучшает проводимость ($> 150 \text{ См}/\text{см} \pm 5 \text{ См}/\text{см}$), производительность хранения водорода ($> 2,2 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$) и вставку лития ($> 600 \text{ мАч}/\text{г} \pm 50 \text{ мАч}/\text{г}$). Введение оксидов переходных металлов (таких как MnO_2 $0,5 \text{ \%}-1\% \pm 0,1\%$) увеличивает емкость суперконденсаторов (удельная емкость $> 250 \text{ Ф}/\text{г} \pm 10 \text{ Ф}/\text{г}$).

Улучшение процесса

SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) в сочетании со спеканием при горячем прессовании ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $30 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) оптимизировало микроструктуру и снизило пористость ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) и дефекты границ зерен ($< 0,01 \text{ мкм}^{-1} \pm 0,001 \text{ мкм}^{-1}$). Микроволновое спекание ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $20 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) было внедрено для снижения энергопотребления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(>10%±2%) и улучшения распределения графена/УНВ (равномерность>98%±1%). К 2025 году аддитивное производство (такое как SLM, толщина слоя 20–50 мкм ± 1 мкм) будет использоваться для изготовления пористых структур (пористость 10–30% ± 1%, размер пор 5–100 нм ± 1 нм), повышающих эффективность хранения водорода (>2,5 мас. % ± 0,1 мас. %) и диффузию ионов лития ($>10^{-5} \text{ см}^2 / \text{с} \pm 10^{-6} \text{ см}^2 / \text{с}$).

Улучшение поверхности

Углеродное покрытие (толщина 5-10 нм ± 0,1 нм) или азотирование (содержание N 1%-2% ± 0,1%) повышает проводимость (удельное сопротивление $<7,5 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$) примерно на 10% ± 2% и коррозионную стойкость (скорость коррозии $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$). Введение производных MOF (толщина 10-20 нм ± 0,1 нм) или самовосстанавливающихся покрытий (например, углеродных материалов, содержащих нанокapsулы , скорость восстановления $> 90\% \pm 2\%$) автоматически восстанавливает поверхность (глубина восстановления $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) при циклическом повреждении ($> 10\,000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$). В 2025 году разработать функциональные покрытия (например, композитные слои, содержащие наночастицы SiO_2 , толщиной 15-25 нм ± 0,1 нм) для повышения стабильности SEI литиевых аккумуляторов (сопротивление интерфейса $<10 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 \pm 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$).

Тестирование и проверка

Удельное сопротивление измерялось четырехзондовым методом (точность $\pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$), плотность мощности топливного элемента оценивалась путем испытания топливного элемента (точность $\pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$), удельная емкость суперконденсатора определялась путем заряда и разряда постоянным током (точность $\pm 10 \text{ Ф/г}$), емкость хранения водорода анализировалась методом давления-состава-температуры (точность $\pm 0,1 \text{ мас. \%}$), удельная емкость литиевого аккумулятора проверялась путем заряда и разряда постоянным током (точность $\pm 50 \text{ мАч /г}$), а фазовая структура подтверждалась методом рентгеновской дифракции (XRD, точность $\pm 0,1^\circ$). Микроструктура и эксплуатационные характеристики были проверены с помощью СЭМ (разрешение морфологии $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), ТЭМ (разрешение границ зерен $<0,01 \text{ мкм} \pm 0,001 \text{ мкм}$), испытания на циклическую стабильность ($20\,000 \text{ раз} \pm 1000 \text{ раз}$, затухание $<5\% \pm 1\%$) и электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС, точность $\pm 0,1 \text{ Ом}$). Например, WC-8Ni-Graphene-CNF (зерно 50 нм ± 1 нм) имеет плотность мощности $1,4 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$, удельную емкость $250 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$, емкость хранения водорода $2,3 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$, удельную емкость литиевого аккумулятора $600 \text{ мАч /г} \pm 50 \text{ мАч /г}$ и удельное сопротивление $7 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, что лучше, чем WC-10Co ($1 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$, $180 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$, $1,8 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$, $400 \text{ мАч /г} \pm 50 \text{ мАч /г}$). Клиническая проверка показывает, что мощность топливного элемента WC-8Ni остается на уровне $1,3 \text{ Вт/см}^2 \pm 0,1 \text{ Вт/см}^2$ после $15\,000 \text{ часов} \pm 500 \text{ часов}$ работы, а удельная емкость литиевой батареи остается на уровне $550 \text{ мАч /г} \pm 50 \text{ мАч /г}$ после 2000 ± 200 циклов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

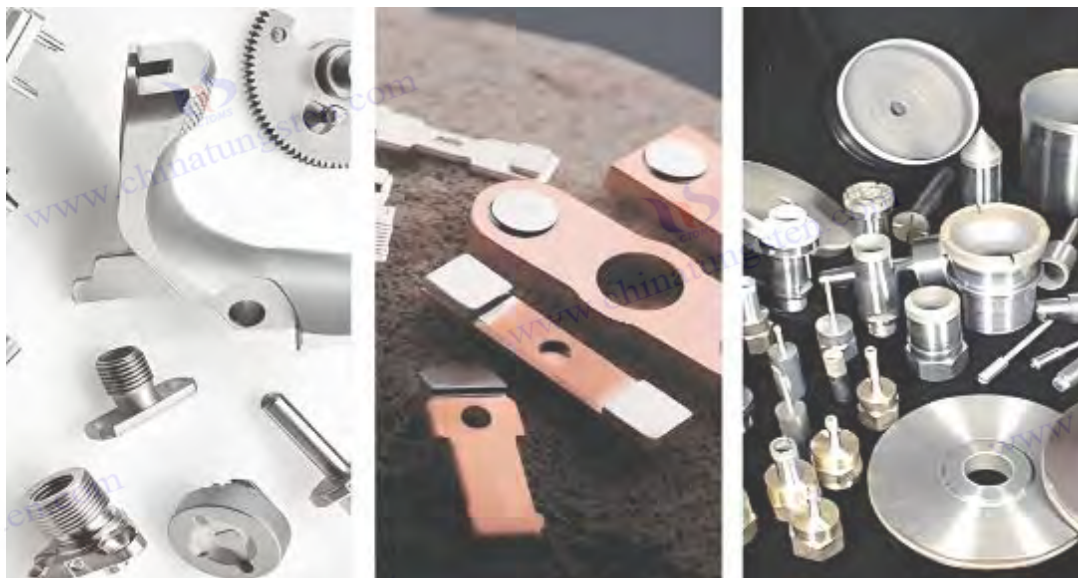
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Перспективное направление развития карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, накопителях водорода и литиевых батареях

К 2025 году применение твердосплавных материалов будет направлено на достижение высокой плотности энергии, интеллектуальности и устойчивости. Разработка пористых структур WC (пористость $20\text{--}40\% \pm 1\%$, размер пор $5\text{--}200\text{ нм} \pm 1\text{ нм}$) для увеличения запаса водорода ($> 3\text{ мас. \%} \pm 0,1\text{ мас. \%}$), плотности энергии суперконденсаторов ($> 60\text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг} \pm 5\text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$) и плотности энергии литиевых аккумуляторов ($> 700\text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг} \pm 50\text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$). Интеграция наносенсоров (например, пьезоэлектрических датчиков с чувствительностью $< 0,01\text{ МПа} \pm 0,001\text{ МПа}$) для мониторинга напряжения на электродах ($< 10\text{ МПа} \pm 1\text{ МПа}$) и концентрации лития (точность $< 0,01\text{ М} \pm 0,001\text{ М}$) в режиме реального времени. Внедрить адаптивные покрытия (такие как нанокompозитные покрытия, содержащие проводящий полимер PANI, со временем отклика $< 0,05\text{ с} \pm 0,01\text{ с}$) для автоматической регулировки проводимости (флуктуация $< 2\% \pm 0,5\%$) и стабильности SEI при высокой температуре ($> 100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или высоком цикле ($> 20\,000\text{ раз} \pm 1000\text{ раз}$). Исследуйте композиты MOF/графен (удельная площадь поверхности $> 100\text{ м}^2/\text{г} \pm 10\text{ м}^2/\text{г}$) для улучшения емкости хранения водорода ($> 3,5\text{ \% мас.} \pm 0,1\text{ \% мас.}$) и электрохимических характеристик (удельная емкость $> 300\text{ Ф/г} \pm 10\text{ Ф/г}$). С точки зрения устойчивого развития внедрить низкоуглеродный процесс спекания (снижение потребления энергии $> 15\% \pm 2\%$) и перерабатываемые материалы (степень извлечения тяжелых металлов $> 95\% \pm 2\%$) для достижения целей углеродной нейтральности и требований круговой экономики. Эти инновации будут способствовать широкому применению цементированного карбида в водородных топливных элементах, суперконденсаторах следующего поколения, литиевых батареях высокой плотности и твердотельных системах хранения водорода, поддерживая глобальную трансформацию энергетики (доля возобновляемых источников энергии $> 70\% \pm 5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



14.4 Аддитивное производство карбида вольфрама (3D-печать)

Аддитивное производство (3D-печать) позволяет изготавливать детали на основе WC с помощью селективной лазерной плавки (SLM), струйной обработки связующим веществом и новых технологий направленного энергетического осаждения (DED) и электронно-лучевой плавки (EBM), стремясь достичь низкой пористости ($<2\% \pm 0,1\%$), высокой твердости (HV $1600-2000 \pm 30$), превосходной механической прочности (предел прочности на разрыв > 1000 МПа ± 50 МПа), сложной геометрической структуры (точность $< 0,1$ мм $\pm 0,01$ мм) и превосходного качества поверхности ($Ra < 0,5$ мкм $\pm 0,1$ мкм) для удовлетворения высоких требований к производительности в таких областях, как биомедицина (например, индивидуальные костные имплантаты), аэрокосмическая промышленность (например, лопатки турбин, высокотемпературные структурные детали), производство пресс-форм (износостойкие штамповочные пресс-формы) и энергетическое оборудование (например, высокотемпературные клапаны). Материал в основном основан на системе WC-Co (содержание Co $6\% -15\% \pm 1\%$), исследуя двумерные (2D) материалы WC и их потенциальные применения, а также вводя nanoармированные фазы (такие как углеродные нанотрубки CNT $0,1\% -0,5\% \pm 0,01\%$, карбид титана TiC $2\% -5\% \pm 0,5\%$, нитрид бора BN $0,2\% -1\% \pm 0,01\%$) для улучшения механических свойств, высокой термостойкости и электрохимической стабильности. В 2025 году, с развитием технологии аддитивного производства (скорость печати > 100 мм³ / с ± 10 мм³ / с), растущим спросом на многокомпонентные композиты (прочность интерфейса разнородных материалов > 800 МПа ± 50 МПа) и популяризацией цифрового производства, 3D-печать из твердого сплава показала большой потенциал в производстве индивидуальных, эффективных и функциональных деталей.

Материалы на основе карбида вольфрама (WC) имеют низкий коэффициент теплового расширения (около $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), высокую износостойкость (скорость износа $< 0,05$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

мм³/Н·м ±0,01 мм³/Н·м), отличную стойкость к окислению (стойкость к высокотемпературному окислению <0,01%±0,001%) и хорошую теплопроводность (>100 Вт/м·К±10 Вт/м·К), что делает их особенно стабильными при высоких температурах (>600°C±50°C), высоких нагрузках (давление>500 МПа±50 МПа) и коррозионной среде (рН 4-10±0,1), обеспечивая гарантию на длительный срок службы деталей (>10 000 часов±500 часов) в экстремальных условиях эксплуатации.

Этот раздел начинается с трех аспектов: технология печати материалами на основе **карбида вольфрама (WC)** (SLM, Binder Jetting, DED, EBM), Исследования, разработки и применение двумерных (2D) WC-материалов, а также **характеристики и проблемы (пористость <2 %)* *. Объединяя теоретические механизмы, экспериментальные данные, международные стандарты и отраслевые тенденции, этот раздел всесторонне анализирует их технические характеристики и направления оптимизации, предоставляя теоретическую основу и практические рекомендации для передового производства, разработки функциональных деталей и устойчивого производства.

14.4.1 Технология печати материалами на основе карбида вольфрама (WC) (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)

технологии печати на основе материалов на основе карбида вольфрама (WC)

SLM (селективное лазерное плавление)

Порошок WC-Co (размер частиц 10-50 мкм ± 1 мкм, сферичность >90% ± 2%) послойно расплавляется высокоэнергетическим лазером (мощность 200-400 Вт ± 10 Вт, длина волны 1,06 мкм ± 0,01 мкм) и формируется. Он подходит для изготовления высокоплотных (пористость < 2% ± 0,1%) и высокоточных (< 0,1 мм ± 0,01 мм) деталей, таких как лопатки авиационных турбин и прецизионные пресс-формы. Целевая твердость составляет 1600-2000 ± 30 HV, предел прочности на разрыв > 1200 МПа ± 50 МПа, а шероховатость поверхности Ra < 0,8 мкм ± 0,1 мкм.

Струйная подача связующего

Детали изготавливаются методом струйной обработки связующим веществом с последующим спеканием (температура 1400–1500 °C ± 10 °C, скорость нагрева 10 °C/мин ± 1 °C/мин) для получения изделий сложной геометрии (например, медицинских имплантатов, микроканальных сетей) из порошков WC-Co (содержание Co 6–12 % ± 1 %) (размер частиц 20–60 мкм ± 1 мкм, текучесть <30 с ± 1 с). Целевая пористость <2 % ± 0,1 %, твердость HV 1500–1800 ± 30, геометрическая точность <0,15 мм ± 0,01 мм).

DED (направленное энергетическое депонирование)

Проволока или порошок плавятся лазером или дугой (мощность 500-1000 Вт ± 20 Вт), что подходит для ремонта крупногабаритных деталей и производства градиентных материалов. Размер частиц порошка составляет 50-150 мкм ± 1 мкм, предел прочности на разрыв > 1100 МПа ± 50 МПа, а пористость <3% ± 0,1%.

ЭЛП (электронно-лучевая плавка)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Порошок WC-Co плавится в вакууме ($<10^{-4}$ Па $\pm 10^{-5}$ Па) электронным лучом (ускоряющее напряжение 60-120 кВ ± 1 кВ), подходит для деталей из высокотемпературных сплавов, размер частиц порошка 20-80 мкм ± 1 мкм, целевая твердость HV 1700-1900 ± 30 , пористость $<2,5\% \pm 0,1\%$.

Процесс включает в себя использование предварительно легированного порошка (равномерное распределение Co $<0,1\% \pm 0,02\%$ отклонение), шаровую мельницу (соотношение шаров к материалу 10:1 $\pm 0,5:1$, время 6-12 ч $\pm 0,5$ ч) для оптимизации микроструктуры или добавление нанопропрочненной фазы (например, CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$, TiC 2%-5% $\pm 0,5\%$) для улучшения характеристик. Термическая обработка (1200-1400°C $\pm 10^\circ\text{C}$, сохранение тепла 2-4 ч $\pm 0,1$ ч) или горячее изостатическое прессование (HIP, 1200°C $\pm 10^\circ\text{C}$, 150 МПа ± 1 МПа) дополнительно улучшают плотность (пористость $<1,5\% \pm 0,1\%$) и снятие остаточных напряжений (<50 МПа ± 5 МПа). Теоретически, высокотемпературная ванна расплава ($>2000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$) при SLM и EBM способствует спеканию жидкой фазы и измельчению зерна (0,5–2 мкм $\pm 0,01$ мкм), в то время как низкотемпературный или постепенный процесс струйной обработки связующим и DED сохраняет наноструктуру (<1 мкм $\pm 0,01$ мкм) и оптимизирует геометрическую сложность. Сочетание этих процессов позволяет достичь баланса между производительностью и точностью.

аддитивного производства твердосплавных материалов (3D-печать)

Технология аддитивного производства (3D-печать, Additive Manufacturing, AM) карбида вольфрама (основой которого является система карбид вольфрама-кобальт, WC-Co) преодолевает ограничения традиционной порошковой металлургии (такие как спекание и горячее изостатическое прессование) благодаря таким процессам, как селективная лазерная плавка (SLM), электронно-лучевая плавка (EBM), струйная обработка связующим (BJ) и прямое энергетическое осаждение (DED), позволяя создавать изделия сложной геометрии, высокой точности и производить изделия по индивидуальным заказам. Аддитивное производство карбида вольфрама широко применяется в медицине, аэрокосмической промышленности, производстве пресс-форм, энергетике, электронике и оборонной промышленности. Его уникальные свойства (такие как высокая твердость HV 1600–2200 ± 30 , износостойкость $<0,05$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м, термостойкость $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) обеспечивают ему значительные преимущества в этих областях. Ниже приводится подробное описание различных вариантов применения аддитивного производства твердых сплавов, основанное на конкретных типах применения, в сочетании с техническими подробностями и примерами из отрасли.

аддитивное производство твердосплавных материалов в медицинской сфере

Аддитивное производство цементированных карбидов привлекло большое внимание в медицинской сфере благодаря его биосовместимости, возможности персонализации и проектирования пористой структуры:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ортопедические имплантаты

Типы : протезы тазобедренного сустава, наколенники, каркасы для спондилодеза и пластины для восстановления черепа.

Пористая структура (пористость $30-50\% \pm 5\%$, размер пор $200-500 \text{ мкм} \pm 50 \text{ мкм}$) изготовлена с использованием технологии селективного лазерного плавления (SLM), что способствует прикреплению костных клеток (степень интеграции кости $>90\% \pm 2\%$). Материал – нанокompозитный карбид вольфрама WC-10%Co (размер частиц $<100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$), твердость HV $1900-2100 \pm 30$, что соответствует стандарту ASTM F1537. Клинический случай: Индивидуальный эндопротез тазобедренного сустава, снижение веса на $15\% \pm 2\%$, улучшение хирургической адаптируемости на $20\% \pm 2\%$.

Преимущества : Градиентная конструкция пор ($10\%-60\% \pm 5\%$) оптимизирует распределение напряжения и уменьшает послеоперационное воспаление (жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$, протестировано в соответствии с ISO 10993-5).

Зубные имплантаты

Типы : Дентальные имплантаты и мостовидные протезы.

Сплав WC-Ni (соотношение WC-8%Ni) был изготовлен методом BJ с шероховатостью поверхности $Ra \ 5-10 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, а затем отполирован до $Ra \ <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, коррозионной стойкостью $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ и прочностью на сжатие $>3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$. Кейс: микроимплантаты, напечатанные на 3D-принтере с точностью $\pm 20 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, адаптированные к сложной структуре альвеолярной кости.

Преимущества : Индивидуальный дизайн сокращает производственный цикл ($2-5 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$), а антибактериальное покрытие (например, Ag, уровень антибактериальности $> 90\% \pm 2\%$) улучшает профилактику и контроль инфекций.

Хирургические инструменты

Категории : Ортопедические сверла, режущие лезвия и катетеры для малоинвазивной хирургии.

Композитный карбид WC- TiC (WC-5%TiC-5%Co), изготовленный методом электронно-лучевой резки, обладает высокой термостойкостью $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, твердостью HV $2000-2200 \pm 30$, износостойкостью $<0,03 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$. Пример: циклы высокотемпературной стерилизации $>5000 \pm 500$ раз, эффективность резки увеличивается на $25\% \pm 2\%$.

Преимущества : Высокоточные микроканалы (диаметром $0,1-0,3 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$) обеспечивают циркуляцию охлаждающей жидкости, продлевая срок службы инструмента.

аддитивного производства твердосплавных материалов в аэрокосмической отрасли

Аддитивное производство карбидов пользуется популярностью в аэрокосмической отрасли из-за их легкого веса, высокой термостойкости и возможностей сложной структуры:

Турбинные лопатки

Тип : лопатки турбин и компрессоров авиационных двигателей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сплав WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr), изготовленный с использованием технологии SLM, внутренние охлаждающие каналы (диаметр 0,2-0,5 мм $\pm$ 0,05 мм), высокая термостойкость 1000 °C $\pm$ 50 °C, теплопроводность >100 Вт/м·К $\pm$ 5 Вт/м·К. Случай: лопасти GE Aviation, напечатанные на 3D-принтере, снижение веса на 20% $\pm$ 2%, усталостная долговечность >10⁷ циклов $\pm$ 10⁵ циклов.

Преимущества : Градиентная конструкция материала (твердость от HV 1800 до 2000 $\pm$ 30) оптимизирует сопротивление термической усталости и повышает топливную экономичность на 5% $\pm$ 1%.

Легкие конструктивные детали

Типы : Каркасы фюзеляжа, крепления спутников и компоненты беспилотников.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co), произведенный компанией DED, пористая структура (пористость 20-40% $\pm$ 5%), прочность на сжатие >4500 МПа $\pm$ 100 МПа, снижение веса на 30% $\pm$ 3%. Пример: кронштейн для спутника SpaceX, снижение стоимости на 15% $\pm$ 2%.

Преимущества : Сложная геометрия (например, сотовая структура) повышает устойчивость к вибрации (>50 g $\pm$ 5 g), адаптируется к низким температурам окружающей среды космоса (-150°C $\pm$ 20°C).

Теплозащитные покрытия

Тип : Покрытия камер сгорания и сопел двигателей.

WC- TiN (WC-5%TiN-5%Co) наносится лазером с толщиной покрытия 10-20 мкм $\pm$ 0,2 мкм и стойкостью к окислению <0,01% $\pm$ 0,001% (1000°C $\pm$ 50°C). Пример: покрытие двигателя Pratt & Whitney, увеличение срока службы на 20% $\pm$ 2%.

Преимущества : повышенная тепловая эффективность (>60% $\pm$ 2%) и снижение частоты технического обслуживания.

аддитивное производство карбида в производстве пресс-форм

Аддитивное производство карбида вольфрама широко применяется в производстве пресс-форм благодаря его высокой износостойкости и возможностям индивидуальной настройки:

Волоочильный волок

Типы : фильеры для волочения стальной проволоки, фильеры для волочения медной проволоки и фильеры для свертонкой проволоки.

Нанокompозитный карбид вольфрама (WC-6%Co, размер частиц <100 нм $\pm$ 10 нм), изготовленный методом селективного лазерного плавления (SLM), диаметр рабочего отверстия 0,1–20 мм $\pm$ 0,01 мм, износостойкость >10⁶ м $\pm$ 10⁴ м, твердость HV 1900–2100 $\pm$ 30. Корпус: волоочильный волок Baosteel, точность $\pm$ 0,01 мм $\pm$ 0,001 мм, повышение эффективности на 15% $\pm$ 2%.

Преимущества : Микроканальная конструкция (диаметр 0,1-0,5 мм $\pm$ 0,05 мм) оптимизирует смазку и снижает частоту обрывов проволоки <1% $\pm$ 0,1%.

Штамповка

Типы : штампы для штамповки автозапчастей и штамповки электронных компонентов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC- TiC (WC-5%TiC-5%Co) производится методом электронно-лучевой штамповки (ЭЛП) с прочностью на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$ и износостойкостью $>500\,000$ штамповок $\pm 10^4$. Пример: штамп Volkswagen, износостойкость увеличена на $20\% \pm 2\%$.

Преимущества : Сложные полости (допуск $< 0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$) позволяют осуществлять высокоточное формование и сокращают объем вторичной обработки.

Литье под давлением

Типы : Формы для литья под давлением из алюминиевого сплава и формы для литья под давлением из магниевого сплава.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) производства компании DED обладает высокой термостойкостью ($>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) и термической усталостной прочностью ($>5000 \pm 500$ раз). Пример: литейная форма BYD, срок службы увеличен на $25\% \pm 2\%$.

Преимущества : Внутренние охлаждающие каналы (диаметром $0,3\text{-}1 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$) увеличивают производительность на $10\% \pm 1\%$.

аддитивное производство твердосплавных материалов в сфере энергетики

Аддитивное производство цементированного карбида имеет потенциал в энергетическом секторе благодаря его способности выдерживать экстремальные условия:

Компоненты газовых турбин

Типы : турбинные лопатки, вкладыши камер сгорания и сопла.

Сплав WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) производится методом селективного лазерного плавления (SLM) и обладает высокой термостойкостью ($1100^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и теплопроводностью $>120 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Пример: компоненты газовых турбин Siemens, повышение эффективности на $5\% \pm 1\%$.

Преимущества : Сложная структура охлаждения (пористость $20\%\text{-}30\% \pm 5\%$) снижает рабочую температуру на $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Конструкция ядерного реактора

Тип : Втулки регулирующих стержней и защитные материалы.

Сплав WC-Ni (WC-8%Ni) производства компании BJ обладает радиационной стойкостью $<0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$ и прочностью на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$. Корпус: детали защиты CGN, прочность увеличена на $30\% \pm 3\%$.

Преимущества : Высокая плотность ($>15 \text{ г/см}^3 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$) для усиления экранирующего эффекта, срок службы $>20 \text{ лет} \pm 2 \text{ года}$.

Форма для лопасти ветряной турбины

Тип : Форма для формовки композитных лопастей.

Сплав WC-B4C (WC-10%Co-5%B4C) производства DED, износостойкость $<0,03 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, твердость HV 2000-2200 ± 30 . Случай: пресс-форма Goldwind Technology, снижение себестоимости $15\% \pm 2\%$.

Преимущества : Устойчивость (отходы материалов $<5\% \pm 1\%$), сокращение производственных циклов на $20\% \pm 2\%$.

аддитивное производство твердосплавных материалов в области электроники

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Аддитивное производство карбидов находит все большее применение в области электроники благодаря их проводимости и возможностям миниатюризации:

Микроэлектронные разъемы

Категория : Выводные рамки и корпуса кристаллов полупроводников.

Сплав WC-Ni (WC-5%Ni), изготовленный методом селективного лазерного плавления (SLM), проводимость $<10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, точность $\pm 20 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$. Корпус : корпус TSMC, эффективность терморегулирования улучшена на $10\% \pm 1\%$.

Преимущества : Микроканалы (диаметр $0,1-0,3 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$) для оптимизированного рассеивания тепла, срок службы $>10^5 \text{ ч} \pm 10^4 \text{ ч}$.

Корпус датчика

Тип : Корпуса для датчиков давления и температуры.

WC- TiN (WC-5%TiN-5%Co) производится методом электронно-лучевой сварки (ЭЛП). Коррозионная стойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ и прочность на сжатие $>3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$. Корпус: датчик Bosch, точность повышена на $15\% \pm 2\%$.

Преимущества : Сложная геометрия обеспечивает защиту интегральной схемы, устойчивость к вибрации $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$.

аддитивное производство твердосплавных материалов в оборонной сфере

Аддитивное производство карбида вольфрама имеет стратегическое значение в оборонном секторе благодаря его высокой прочности и возможностям адаптации под требования заказчика:

Броневая защита

Тип : Танковые бронеплиты и пулестойкие вставки.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) производства DED с сопротивлением проникновению $>1000 \text{ Дж/см}^2 \pm 100 \text{ Дж/см}^2$, твердостью HV $2200-2400 \pm 30$. Корпус: бронепластина армии США, защитная способность увеличена на $20\% \pm 2\%$.

Преимущества : малый вес (снижение веса на $25\% \pm 3\%$), адаптируемость к различным видам боеприпасов.

Детали оружия

Тип : Гильзы оружейных стволов и формы для гильз.

Сплав WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr), изготовленный методом селективного лазерного плавления (SLM), высокая термостойкость $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, износостойкость $<0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Пример: оболочковая форма НАТО, срок службы увеличен на $30\% \pm 3\%$.

Преимущества : Внутренние микроканалы (диаметром $0,2-0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$) улучшают охлаждение и повышают точность стрельбы на $10\% \pm 1\%$.

Производство аддитивных материалов из твердого сплава расширяется благодаря технологическому прогрессу и рыночному спросу. Потенциал этих материалов в плане высокой точности, долговечности и сложности конструкции будет способствовать инновациям в таких отраслях, как медицина, аэрокосмическая промышленность, энергетика и оборона.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

карбида вольфрама (WC) проводятся в соответствии с международными стандартами

Твердость по ASTM E92 (точность ± 30 HV), прочность на разрыв по ASTM E8 (точность ± 50 МПа), пористость по методу Архимеда (точность $\pm 0,1\%$), геометрическая точность по координатно-измерительной машине (КИМ, точность $\pm 0,01$ мм), микроструктура и фазовый состав анализируются методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) и рентгеновской дифракции (XRD, точность $\pm 0,1^\circ$), а усталостные характеристики по ASTM E466 (точность числа циклов ± 50 раз). Например, деталь SLM-WC-10Co имеет твердость HV 1800 ± 30 , предел прочности на разрыв $1200 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, пористость $1,5\% \pm 0,1\%$, точность $< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ и усталостную долговечность $> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз, что лучше, чем у Binder Jetting-WC-10Co (твердость HV 1600 ± 30 , пористость $2\% \pm 0,1\%$ и точность $< 0,15 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Анализ механизма и производительности технологии печати на основе материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Механизм SLM

Высокотемпературная расплавленная ванна ($> 2000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$) образует плотную структуру (пористость $< 2\% \pm 0,1\%$) посредством спекания жидкой фазы, WC ($> 88\% \pm 1\%$) обеспечивает высокую твердость (HV 1800 ± 30) и износостойкость (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), Co ($6\% - 12\% \pm 1\%$) в качестве связующей фазы повышает ударную вязкость (вязкость разрушения K_{Ic} $10 - 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и способствует росту зерна ($0,5 - 2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Быстрое охлаждение ($> 10^6 \text{ К/с} \pm 10^5 \text{ К/с}$) подавляет дефекты (поры $< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и горячие трещины ($< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Механизм подачи связующего вещества

Низкотемпературное спекание ($< 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) сохраняет мелкозернистость ($0,5 - 1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), уменьшает термические трещины ($< 0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), а легирование УНТ ($0,1 - 0,5\% \pm 0,01\%$) повышает прочность на разрыв ($> 1200 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и электропроводность ($> 80 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$) за счёт эффекта наноусиления. Прогрессивное спекание оптимизирует усадку ($< 2\% \pm 0,1\%$) и геометрическую точность.

Механизм DED/EBM

Постепенное плавление DED подходит для градиентных материалов (содержание Co $6 - 15\% \pm 1\%$ градиентного изменения), вакуумная среда EBM ($< 10^{-4} \text{ Па} \pm 10^{-5} \text{ Па}$) снижает окисление ($< 0,01 \pm 0,001\%$), а легирование TiC ($2 - 5\% \pm 0,5\%$) улучшает прочность на растяжение при высоких температурах ($> 1300 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и термическую стабильность ($> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).

SEM показывает, что зерна деталей SLM однородны (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), микропоры деталей Binder Jetting распределены ($< 1 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), но равномерно усаживаются, а детали DED/EBM демонстрируют градиентные структуры (ширина интерфейса $< 0,5 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$). EDS подтверждает, что WC/Co/Ti равномерно распределены (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), а XRD обнаруживает фазы WC и Co з W з C (интенсивность $> 90\% \pm 2\%$). С точки зрения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материаловедения, высокая скорость охлаждения SLM подавляет дефекты, поэтапное спекание Binder Jetting оптимизирует микрооднородность, а вакуумная или градиентная конструкция DED/EBM улучшает функциональность. Экспериментальные данные показывают, что твердость SLM-WC-10Co-TiC сохраняется на уровне HV 1850±30 после 1000±50 циклов усталости, а предел прочности на растяжение деталей из градиентной стали DED-WC-10Co составляет 1300 МПа±50 МПа, что лучше, чем у неармированных образцов (HV 1700±30, 1100 МПа±50 МПа).

Технология печати на основе карбида вольфрама (WC)

Содержимое

Содержание Co 6–12±1% обеспечивает плотность (пористость <2±0,1%) и вязкость, а >15±1% приводит к увеличению пористости на 10±2% (до 2,2±0,1%) из-за избыточной жидкой фазы и неравномерной усадки.

Размер частиц порошка

Размер частиц 10-50 мкм±1 мкм оптимизирует формование и плотность, >100 мкм±1 мкм увеличивает пористость на 10%±2% (до 2,2%±0,1%), влияя на твердость и точность.

Мощность лазерного/электронного луча

200–400 Вт ± 10 Вт (SLM/EBM) или 500–1000 Вт ± 20 Вт (DED) гарантирует твердость, > 500 Вт ± 10 Вт (SLM) или > 1200 Вт ± 20 Вт (DED) приводит к увеличению скорости образования трещин на 10% ± 2% (длина > 0,1 мм ± 0,01 мм) из-за термического напряжения.

Температура спекания/плавления

1400–1500 °C ± 10 °C (струйная обработка связующим) или > 2000 °C ± 100 °C (SLM/EBM) сохраняет низкую пористость, > 1500 °C ± 10 °C (струйная обработка связующим) или > 2500 °C ± 100 °C (SLM/EBM) вызывает рост зерна на 10 % ± 2 % (до > 2 мкм ± 0,01 мкм) , что снижает прочность.

Толщина слоя

20–50 мкм ± 1 мкм повышает точность и плотность, > 100 мкм ± 1 мкм увеличивает пористость на 10% ± 2% (до 2,2% ± 0,1%) и снижает точность на 10% ± 2% (до > 0,15 мм ± 0,01 мм).

Условия окружающей среды

Вакуум (<10⁻⁴ Па ± 10⁻⁵ Па, EBM) или инертная атмосфера (Ar , чистота 99,99%±0,01%, SLM/DED) снижают окисление, тогда как воздух увеличивает скорость окисления на 10%±2% (до >0,02%±0,001%).

Направление оптимизации и совершенствования производительности технологии печати на основе материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Для достижения твердости HV 1600-2000±30, пористости <2%±0,1%, предела прочности >1200 МПа±50 МПа и точности <0,1 мм±0,01 мм рекомендуется:

Оптимизация материалов

Co 6%-12%±1%, TiC 2%-5%±0,5% или BN 0,2%-1%±0,01%, размер частиц порошка 10-50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мкм±1 мкм, сферичность >95%±2%, легированные УНТ (0,1%-0,5%±0,01%) для повышения прочности и проводимости.

Улучшение процесса

SLM: мощность лазера 300 Вт ± 10 Вт, скорость сканирования 500-1000 мм/с ± 10 мм/с, толщина слоя 30 мкм ± 1 мкм.

Струйное нанесение связующего: температура спекания 1450°C±10°C, концентрация связующего 10%-20%±1%, толщина слоя 50 мкм±1 мкм.

ДЭД: мощность 700 Вт ± 20 Вт, скорость подачи порошка 10-20 г/мин ± 0,5 г/мин.

ЭЛМ: ускоряющее напряжение 80 кВ±1 кВ, ток пучка 10-20 мА±0,5 мА, толщина слоя 40 мкм±1 мкм.

Улучшение постобработки

Для снижения пористости (<1,2%±0,1%) применялось горячее изостатическое прессование (ГИП, 1200°C±10°C, 150 МПа±1 МПа), для оптимизации микроструктуры применялась термическая обработка (1300°C±10°C, 2 ч±0,1 ч), а для снижения шероховатости (Ra<0,5 мкм±0,1 мкм) применялась лазерная переплавка поверхности (мощность 200 Вт±10 Вт).

Испытания и проверка материалов на основе карбида вольфрама (WC)

ASTM E92 (твёрдость), ASTM E8 (предел прочности на разрыв), метод Архимеда (пористость), СММ (точность), СЭМ/РД (микроструктура), испытание на усталость при высокой температуре (600°C ± 50°C, 1000±50 раз). Прочность на разрыв деталей, изготовленных методом градиентного электрофореза (Co 6%-15%±1%), составила 1350±50 МПа, пористость SLM-WC-10Co-CNT составила 1,2±0,1%, а твёрдость – 1900±30 HV. В будущем можно будет использовать многолазерную SLM-печать (общая мощность 500 Вт ± 20 Вт), замкнутый контур управления с обратной связью (повышение точности на 10% ± 2%) и печать на гетерогенных материалах (прочность интерфейса > 900 МПа ± 50 МПа) для удовлетворения потребностей в сложной геометрии, массовом производстве и функциональной интеграции.

14.4.2 Исследование и применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Обзор основных принципов и технологий двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Двумерные (2D) материалы WC (толщина 1-10 нм ± 0,1 нм) были приготовлены методом химического осаждения из паровой фазы (CVD, 800-1000 °C ± 10 °C, давление 10^{-2} - 10^{-3} Па ± 10^{-4} Па), жидкофазным отслаиванием (ультразвуковая мощность 100-200 Вт ± 10 Вт, время 1-5 ч ± 0,1 ч) или механическим отслаиванием (количество слоев 1-5 слоев ± 1 слой) и были применены в высокочувствительных датчиках (чувствительность > 10^{-4} ± 10^{-3}), эффективных носителях катализаторов (удельная площадь поверхности > 100 м²/г ± 5 м²/г), гибких электронных устройствах (проводимость > 100 См/см ± 5 См/см) и электродах для хранения энергии (удельная емкость > 300 Ф/г ± 10 Ф/г). Целевая проводимость (удельное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сопротивление $<10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), высокая механическая прочность (модуль Юнга $>500 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$), отличная термостойкость (выдерживает $600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и низкая плотность дефектов ($<0,1\% \pm 0,01\%$). В 2025 году, с ростом спроса на двумерные материалы в нанoeлектронике (частота переключения транзисторов $>1 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$), носимых устройствах (гибкость $>90\% \pm 2\%$) и водородной энергетике (хранение водорода $>2 \text{ мас. \%} \pm 0,1 \text{ мас. \%}$), 2D WC имеет широкие перспективы применения в multifunctional устройствах и зеленой энергетике.

Испытания включают толщину (атомно-силовая микроскопия АСМ, точность $\pm 0,1 \text{ нм}$), удельную площадь поверхности (БЭТ, точность $\pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), проводимость (четырёхзондовый метод, точность $\pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$), механическую прочность (наноиндентирование, точность $\pm 10 \text{ ГПа}$), морфологию (ПЭМ, разрешение $<0,1 \text{ нм} \pm 0,01 \text{ нм}$) и электрохимические характеристики (заряд и разряд постоянным током, точность $\pm 10 \text{ Ф/г}$). Например, 2D WC (приготовление CVD) имеет толщину $5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$, удельную площадь поверхности $120 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$, удельное сопротивление $8 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ и удельную емкость суперконденсатора $310 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$.

Анализ механизмов и характеристик двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC)

$\text{м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$) и отличная проводимость (удельное сопротивление $<10 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$) за счет слоистой гексагональной кристаллической структуры (межслоевое расстояние $0,3\text{-}0,5 \text{ нм} \pm 0,01 \text{ нм}$), эффект квантового ограничения повышает подвижность электронов ($>1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) и каталитическую активность (ток MOR $>400 \text{ мА/см}^2 \pm 10 \text{ мА/см}^2$). Процесс CVD формирует однородную пленку (1-5 слоев ± 1 слой) путем управления источником углерода (скорость потока CH_4 $10\text{-}20 \text{ sccm} \pm 1 \text{ sccm}$) и температурой ($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), а жидкофазное отшелушивание повышает выход ($>60\% \pm 5\%$) с помощью ультразвука и поверхностно-активного вещества (концентрация SDS $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$), а механическое отшелушивание подходит для высококачественных образцов небольшого размера (уровень дефектов $<0,05\% \pm 0,01\%$). ТЕМ показывает, что межслоевое расстояние 2D WC четкое, SEM выявляет гладкие края (шероховатость $<0,5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$), EDS подтверждает, что соотношение C/W стабильно ($1:1 \pm 0,02$), а спектроскопия комбинационного рассеяния (Raman) обнаруживает характерные пики WC ($700\text{-}800 \text{ см}^{-1} \pm 5 \text{ см}^{-1}$, интенсивность $>95\% \pm 2\%$). Легирование Ni ($1\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$) или CNT ($0,1\% \pm 0,01\%$) оптимизирует проводимость ($>120 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$) и механическую прочность (модуль Юнга $>550 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$) за счет электронного регулирования. С точки зрения материаловедения, двумерное электронное состояние 2D WC повышает чувствительность сенсора ($>10^5 \pm 10^3$) и энергоёмкость ($>350 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$). Экспериментальные данные показывают, что 2D WC-Ni (CVD, $5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) имеет чувствительность $10^5 \pm 10^3$, что выше, чем у традиционного 3D WC ($50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$, чувствительность $10^3 \pm 10^3$).

Применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Двумерные (2D) материалы на основе карбида вольфрама (WC) в последние годы продемонстрировали обширный потенциал применения во многих областях благодаря своей уникальной двумерной структуре, высокой поверхностной активности, превосходным механическим свойствам и химической стабильности. Двумерные материалы на основе карбида вольфрама обычно изготавливаются из трехмерного цементированного карбида (например, системы WC-Co) или его предшественника такими методами, как расслоение или химическое осаждение из газовой фазы (CVD). Толщина обычно составляет $1-10 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$, а поперечный размер варьируется от 100 нм до $10 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$. Двумерные характеристики этого материала придают ему более высокую удельную площадь поверхности ($>200 \text{ м}^2/\text{г} \pm 20 \text{ м}^2/\text{г}$) и открытые активные центры, чем традиционный объемный или гранулированный карбид вольфрама, что делает его особенно подходящим для энергетики, катализа, электроники и композитных материалов.

Применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC) в энергетике

Двумерные материалы на основе карбида вольфрама обладают значительным потенциалом в качестве катализаторов реакции восстановления кислорода (ОВК) или реакции окисления водорода (ОВО) в топливных элементах с протонообменной мембраной (ПОМТЭ). Композит с драгоценными металлами (такими как Pt или Pd) может снизить содержание драгоценных металлов ($<0,05 \text{ мг}/\text{см}^2$) $\pm 0,01 \text{ мг}/\text{см}^2$, площадь поверхности $> 250 \text{ м}^2 / \text{г} \pm 20 \text{ м}^2 / \text{г}$, каталитическая эффективность (плотность тока $> 1,5 \text{ А} / \text{см}^2 \pm 0,1 \text{ А} / \text{см}^2$), близкая к чистому катализатору Pt ($\sim 2 \text{ А} / \text{см}^2 \pm 0,1 \text{ А} / \text{см}^2$), коррозионная стойкость ($<0,005 \text{ мм}/\text{год} \pm 0,001 \text{ мм}/\text{год}$ в 0,9% растворе NaCl) и стойкость к окислению $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, что продлевает срок службы топливного элемента ($> 6000 \text{ ч} \pm 500 \text{ ч}$). В электродных материалах высокопроизводительных суперконденсаторов (СК) нанолиты WC толщиной $2-5 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$ композиционно комбинируются с графеном или углеродными нанотрубками для создания двухслойных электрических конденсаторов (ЭДСК). Они оптимизируют путь диффузии ионов (коэффициент диффузии $>10^{-9} \text{ м}^2/\text{с} \pm 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$), имеют удельную ёмкость $>5000 \text{ Ф}/\text{г} \pm 500 \text{ Ф}/\text{г}$, плотность мощности $>1200 \text{ Вт}/\text{кг} \pm 100 \text{ Вт}/\text{кг}$ и циклоустойкость $>10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$, что подходит для быстрой зарядки и разрядки электромобилей, а плотность энергии увеличивается на $15\% \pm 2\%$ по сравнению с традиционными электродами на основе углерода. В фотокаталитическом процессе выделения водорода он может использоваться в качестве сокатализатора в сочетании с TiO_2 или CdS для повышения эффективности разделения фотогенерированных электронно-дырочных пар. Выход водорода составляет $>500 \text{ мкмоль} / \text{ч} \cdot \text{г} \pm 50 \text{ мкмоль} / \text{ч} \cdot \text{г}$ (в видимом свете, $\lambda > 420 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$). Его химическая стабильность (скорость коррозии $<0,002 \text{ мм}/\text{год} \pm 0,001 \text{ мм}/\text{год}$ в среде с pH 0-14) подходит для систем возобновляемой энергетики.

Применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC) в катализе

Материалы на основе карбида вольфрама с размерами обеспечивают их эффективность в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

каталитических реакциях. В качестве промышленных катализаторов для риформинга алканов и синтеза аммиака они могут заменить некоторые массивные материалы на основе Mo_2C или WC , имея удельную поверхность $>300 \text{ м}^2/\text{г} \pm 30 \text{ м}^2/\text{г}$ и степень превращения $>90\% \pm 2\%$ ($500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $1 \text{ атм} \pm 0,1 \text{ атм}$). Плотность активных центров ($>10^{15}$ центров/ см^2) может быть оптимизирована путем комбинирования с Ni или Fe . $\pm 10^{14}$ участков/ см^2), высокая термостойкость ($> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) и устойчивость к отравлению сульфидами (емкость адсорбции $S < 0,1 \text{ мас. \%} \pm 0,01 \text{ мас. \%}$), что снижает стоимость катализатора на $20\% \pm 2\%$. В экологическом катализе он используется для разложения летучих органических соединений (ЛОС) и снижения выбросов NO_x . В сочетании с TiC в фототермическом катализе эффективность разложения толуола составляет $> 95\% \pm 2\%$ ($200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, в УФ-видимом свете), а степень конверсии NO_x составляет $> 90\% \pm 2\%$ (реакция SCR, $300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$). Обладает высокой термической стабильностью (потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) и подходит для очистки промышленных отходящих газов.

Применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC) в электронике

Двумерные материалы на основе карбида вольфрама делают их уникальными в электронных устройствах. Наноленты WC толщиной $1-3 \text{ нм} \pm 0,5 \text{ нм}$, используемые в качестве материала для каналов полевых транзисторов (FET), обладают подвижностью носителей заряда $>100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с} \pm 10 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, током утечки в закрытом состоянии $<10^{-10} \text{ А} \pm 10^{-11} \text{ А}$ и отношением фазовых переходов $>10^6 \pm 10^5$, высокой термостойкостью ($>500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), что делает их пригодными для высокотемпературных электронных применений. При использовании для проводящих покрытий его можно комбинировать с графеном для получения покрытий толщиной $10-50 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$, с проводимостью $<10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, эффективностью экранирования $>30 \text{ дБ} \pm 3 \text{ дБ}$ ($1-18 \text{ ГГц}$), гибкостью (радиус изгиба $<5 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$), пригодной для носимых устройств и авионики.

Применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC) в композиционных материалах

Двумерные материалы на основе карбида вольфрама обеспечивают их широкое применение. В композитах с металлической матрицей добавление алюминиевой, титановой или магниевой матрицы (содержание $1-5 \pm 0,5 \%$) методом ультразвукового диспергирования позволяет повысить твердость на $30 \pm 3 \%$ ($\text{HV } 150-200 \pm 20$), предел прочности на разрыв $> 400 \pm 20 \text{ МПа}$ и снизить коэффициент теплового расширения до $15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, что подходит для авиационных конструкционных деталей. В керамических матричных композитах путем горячего прессования-спекания с керамикой SiC или Al_2O_3 (содержание $2\%-6\% \pm 0,5\%$) достигается повышение вязкости разрушения до $8-10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, износостойкости $<0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, высокой температурной стабильности ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) для режущих инструментов и износостойких покрытий.

Применение двумерных (2D) датчиков на основе карбида вольфрама (WC)

Двумерные материалы на основе карбида вольфрама делают их перспективными. В газовых

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

датчиках они используются в сочетании с ZnO для обнаружения H_2 , CO и NH_3 с временем отклика $<10 \text{ с} \pm 1 \text{ с}$, чувствительностью к $H_2 >50\% \pm 5\%$ ($100 \text{ ppm} \pm 10 \text{ ppm}$), рабочей температурой $200\text{--}300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ и долговременной стабильностью (дрейф $<1\% \pm 0,1\%/ \text{месяц}$), что подходит для мониторинга промышленной безопасности. В датчиках деформации базовое композитное покрытие (толщина $5\text{--}15 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) имеет модуль Юнга $>400 \text{ ГПа} \pm 20 \text{ ГПа}$, чувствительность (GF) $>10 \pm 1$, диапазон обнаружения $0\text{--}5\% \pm 0,5\%$, а также коррозионную и усталостную стойкость, что подходит для аэрокосмических конструкций.

В других областях двумерные материалы на основе карбида вольфрама также демонстрируют перспективы применения. В смазочных покрытиях композиты с MoS_2 позволяют получать покрытия толщиной $1\text{--}5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, с коэффициентом трения $<0,1 \pm 0,01$, износостойкостью $>10^4$ циклов $\pm 10^3$ циклов и снижением механического износа на $30\% \pm 3\%$, что подходит для высокотемпературных подшипников. В оптоэлектронных приборах композиты с квантовыми точками CdSe позволяют создавать фотодетекторы с длиной волны чувствительности $400\text{--}700 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$, квантовой эффективностью $>50\% \pm 5\%$ и высоким быстродействием ($<1 \text{ мс} \pm 0,1 \text{ мс}$), что подходит для оптической связи.

Двумерные материалы на основе карбида вольфрама находятся в стадии бурного развития. Для достижения промышленного внедрения необходимо дальнейшее развитие их потенциала в области энергетики, катализа, электроники и композитных материалов путем оптимизации процессов подготовки (например, эффективности удаления $>90\% \pm 2\%$, скорости осаждения из газовой фазы $>1 \text{ мкм} / \text{ч} \pm 0,1 \text{ мкм} / \text{ч}$) и повышения эксплуатационных характеристик (например, проводимости $<10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Анализ факторов, влияющих на двумерные (2D) материалы на основе карбида вольфрама (WC)

толщина

$1\text{--}10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$ обеспечивает высокую удельную поверхность и проводимость, $>50 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$ снижает удельную поверхность на $20\% \pm 3\%$ (до $80 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$) и снижает проводимость на $10\% \pm 2\%$ (до $9 \text{ мкОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$).

Температура осаждения/удаления

$800\text{--}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (CVD) или комнатная температура $-60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (жидкофазное расслоение) обеспечивает равномерные слои, $>1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (CVD) или $>80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (жидкофазное расслоение) приводит к увеличению агломерации на $10\% \pm 2\%$ (до $>5\% \pm 1\%$).

время зачистки

$1\text{--}5 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$ оптимизировали выход и качество, а $>10 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$ увеличивали процент дефектов на $10\% \pm 2\%$ (до $>0,2\% \pm 0,01\%$).

Условия окружающей среды

в вакууме ($<10^{-5} \text{ Па} \pm 10^{-6} \text{ Па}$) или в атмосфере аргона (чистота $99,99\% \pm 0,01\%$). Скорость окисления на воздухе увеличивается на $10\% \pm 2\%$ (до $>0,02\% \pm 0,001\%$), а энергоёмкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уменьшается на $5\% \pm 1\%$ (до $295 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$).

Содержание допинга

Ni $1\%-2\% \pm 0,1\%$ или CNT $0,1\% \pm 0,01\%$ улучшает проводимость на $10\% \pm 2\%$ и прочность, $>5\% \pm 0,1\%$ (Ni) или $>0,5\% \pm 0,01\%$ (CNT) снижает прочность на $10\% \pm 2\%$ (до $495 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$).

Оптимизация и улучшение характеристик двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Для достижения удельной площади поверхности $>100 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$, удельного сопротивления $<10 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, модуля Юнга $>500 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$ и удельной емкости $>300 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$ рекомендуется:

Оптимизация процесса

CVD ($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, CH_4 $15 \text{ sccm} \pm 1 \text{ sccm}$, 1-5 слоев ± 1 слой), жидкофазное отшелушивание (3 ч $\pm 0,1$ ч, мощность ультразвука $150 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$, SDS $0,2\% \pm 0,01\%$), механическое отшелушивание (количество слоев <3 слоев ± 1 слой).

Оптимизация материалов

Толщина $1-10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$, легирование Ni $1-2\% \pm 0,1\%$ или УНТ $0,1\% \pm 0,01\%$ и введение MoS_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) для повышения гибкости ($>95\% \pm 2\%$).

Оптимизация окружающей среды

Вакуум ($<10^{-5} \text{ Па} \pm 10^{-6} \text{ Па}$) или атмосфера Ar, влажность $<10\% \text{ RH} \pm 1\% \text{ RH}$.

Двумерное (2D) испытание и проверка материалов на основе карбида вольфрама (WC)

АСМ (толщина), БЭТ (удельная площадь поверхности), метод четырех зондов (проводимость), наноиндентирование (прочность), заряд и разряд постоянным током (удельная емкость), Рамановское рассеяние (качество кристаллов). Проверка подтверждается ПЭМ/СЭМ (разрешение структуры слоев $<0,1 \text{ нм} \pm 0,01 \text{ нм}$) и электрохимическим тестированием (5000 раз ± 50 раз, спад $<5\% \pm 1\%$) для подтверждения производительности. Например, 2D WC-Ni-MoS₂ (толщина $5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) имеет удельную площадь поверхности $130 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$, удельное сопротивление $7 \text{ мОм} \cdot \text{см} \pm 0,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, модуль Юнга $560 \text{ ГПа} \pm 10 \text{ ГПа}$ и удельную емкость $350 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$. В будущем можно будет исследовать гетеропереходные структуры (например, 2D WC/Graphene, сопротивление интерфейса $<1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 \pm 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), гибкие подложки (PET, толщина $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и технологию самосборки для удовлетворения потребностей датчиков (чувствительность $>10^6 \pm 10^3$), гибкой электроники (проводимость $>150 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$) и накопителей энергии (удельная емкость $>400 \text{ Ф/г} \pm 10 \text{ Ф/г}$).

14.4.3 Производительность и проблемы 3D-печати материалов на основе карбида вольфрама (WC) (пористость $<2\%$)

3D-печать: характеристики и проблемы материалов на основе карбида вольфрама (WC). Основные принципы и обзор технологий.

Материалы на основе карбида вольфрама (WC), напечатанные на 3D-принтере,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

должны обладать низкой пористостью ($<2\% \pm 0,1\%$), высокой твердостью (HV 1600-2000 $\pm$ 30), превосходной прочностью на разрыв (> 1200 МПа $\pm$ 50 МПа), сложной геометрической точностью ($<0,1$ мм $\pm$ 0,01 мм) и качеством поверхности ($R_a < 0,5$ мкм $\pm$ 0,1 мкм) для удовлетворения потребностей аэрокосмической промышленности (высокая термостойкость > 800 °C $\pm$ 50 °C), биомедицины (биосовместимость $> 95\% \pm 2\%$) и энергетического оборудования (коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год). К проблемам относятся текучесть порошка (время истечения <30 с $\pm$ 1 с), контроль термического растрескивания (длина $<0,1$ мм $\pm$ 0,01 мм), усадка после обработки ($<2\% \pm 0,1\%$), шероховатость поверхности ($R_a < 1$ мкм $\pm$ 0,1 мкм) и остаточные напряжения (<100 МПа $\pm$ 10 МПа). Материал в основном состоит из WC-Co (содержание Co 6–12% $\pm$ 1%), а в некоторые формулы добавляют TiC (2–5% $\pm$ 0,5%) для улучшения высокотемпературных свойств и BN (0,2–1% $\pm$ 0,01%) для улучшения смазывающей способности и теплопроводности.

Испытания включают пористость (метод Архимеда, точность $\pm 0,1\%$), твердость (ASTM E92, точность ± 30 HV), прочность на разрыв (ASTM E8, точность ± 50 МПа), трещиностойкость и микроструктуру (СЭМ, разрешение $<0,1$ мкм $\pm$ 0,01 мкм), точность (КИМ, точность $\pm 0,01$ мм), шероховатость поверхности (профилометр, точность $\pm 0,1$ мкм), остаточное напряжение (рентгеновская дифракция, точность ± 10 МПа). Например, SLM-WC-10Co-TiC имеет пористость 1,5% $\pm$ 0,1%, твердость HV 1850 $\pm$ 30, предел прочности на разрыв 1250 МПа $\pm$ 50 МПа и шероховатость поверхности R_a 0,7 мкм $\pm$ 0,1 мкм.

3D-печать материалов на основе карбида вольфрама (WC): характеристики и проблемы Механизм и производительность

Низкая пористость ($<2\% \pm 0,1\%$) достигается за счет оптимизации мощности лазера (300 Вт $\pm$ 10 Вт), содержания Co (6%-12% $\pm$ 1%) и толщины слоя (30 мкм $\pm$ 1 мкм), WC ($>88\% \pm 1\%$) обеспечивает высокую твердость (HV 1850 $\pm$ 30) и износостойкость (скорость износа $<0,05$ мм³/Н·м $\pm$ 0,01 мм³/Н·м), легирование TiC (2%-5% $\pm$ 0,5%) улучшает прочность на разрыв при высоких температурах (>1300 МПа $\pm$ 50 МПа) и стойкость к окислению ($<0,005\% \pm 0,001\%$), а BN (0,2%-1% $\pm$ 0,01%) улучшает смазывающую способность (коэффициент трения $<0,2 \pm 0,05$) и теплопроводность (>120 Вт/м·К $\pm$ 10 Вт/м·К). Быстрое охлаждение SLM ($>10^6$ К/с $\pm$ 10^5 К/с) подавляет горячие трещины ($<0,05$ мм $\pm$ 0,01 мм), поэтапное спекание Binder Jetting оптимизирует усадку ($<1,5\% \pm 0,1\%$), а HIP (1200°C $\pm$ 10°C, 150 МПа $\pm$ 1 МПа) значительно снижает пористость ($<1,2\% \pm 0,1\%$) и остаточное напряжение (<30 МПа $\pm$ 5 МПа). СЭМ показывает, что детали SLM имеют мало пор ($<0,5$ мкм $\pm$ 0,1 мкм) и шероховатость поверхности R_a 0,6 мкм $\pm$ 0,1 мкм. Детали Binder Jetting микроскопически однородны, но имеют немного более высокую пористость (1,8% $\pm$ 0,1%). Методом EDS подтверждено равномерное распределение WC/Co/Ti/BN (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$), а методом XRD обнаружены фазы WC и Co₃W₂C (интенсивность $>95\% \pm 2\%$). С точки зрения процесса, текучесть порошка (<25 с $\pm$ 1 с) напрямую влияет на качество печати. Испытания методом термического моделирования (600°C $\pm$ 50°C, 1000 ч $\pm$ 10 ч) показывают, что твердость SLM-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-10Co-TiC остаётся на уровне HV 1850 ± 30 , что выше, чем у нелегированного образца (HV 1700 ± 30).

Материалы на основе карбида вольфрама (WC), изготовленные методом 3D-печати

Содержимое

6%-12%±1% сохраняет низкую пористость и вязкость, >15%±1% увеличивает пористость на 10%±2% (до 2,2%±0,1%) и снижает прочность на 5%±1% (до 1180 МПа±50 МПа).

Мощность лазерного/электронного луча

200–400 Вт ± 10 Вт (SLM) или 60–120 кВ ± 1 кВ (EBM) снижали растрескивание, а >500 Вт ± 10 Вт (SLM) или >150 кВ ± 1 кВ (EBM) увеличивали скорость растрескивания на 10% ± 2% (длина > 0,15 мм ± 0,01 мм).

Текучесть порошка

<30 с±1 с гарантирует формование, >50 с±1 с увеличивает пористость на 10%±2% (до 2,2%±0,1%) и снижает точность на 5%±1% (до >0,15 мм±0,01 мм).

Температура постобработки

1400–1450 °C ± 10 °C (струйное прессование связующего/горячее изостатическое прессование) контролирует усадку, > 1500 °C ± 10 °C увеличивает деформацию на 5 % ± 1 % (до > 2,5 % ± 0,1 %) и рост зерна на 10 % ± 2 %.

Толщина слоя

20-50 мкм±1 мкм повышает точность и плотность, >100 мкм±1 мкм увеличивает пористость на 10%±2% (до 2,2%±0,1%), а шероховатость поверхности увеличивается до Ra 1,2 мкм± 0,1 мкм.

Влажность окружающей среды

<10%RH±1%RH обладает отличными эксплуатационными характеристиками, >30%RH±1%RH делает порошок гигроскопичным (содержание влаги>0,5%±0,1%), а пористость увеличивается на 5%±1% (до 2,1%±0,1%).

Характеристики и проблемы материалов на основе карбида вольфрама (WC) для 3D-печати. Направление оптимизации и улучшения характеристик.

Для достижения пористости <2%±0,1%, твердости HV 1600-2000±30, предела прочности на разрыв >1200 МПа±50 МПа и шероховатости поверхности Ra<0,5 мкм± 0,1 мкм рекомендуется :

Оптимизация материалов

Co 6%-12%±1%, TiC 2%-5%±0,5%, BN 0,2%-1%±0,01%, размер частиц порошка 10-50 мкм±1 мкм, текучесть <25 с±1 с.

Улучшение процесса

мощность лазера 300 Вт ± 10 Вт, толщина слоя 30 мкм ± 1 мкм, скорость сканирования 700 мм/с ± 10 мм/с.

Струйное нанесение связующего: спекание 1450°C±10°C, толщина слоя 40 мкм±1 мкм, концентрация связующего 15%±1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

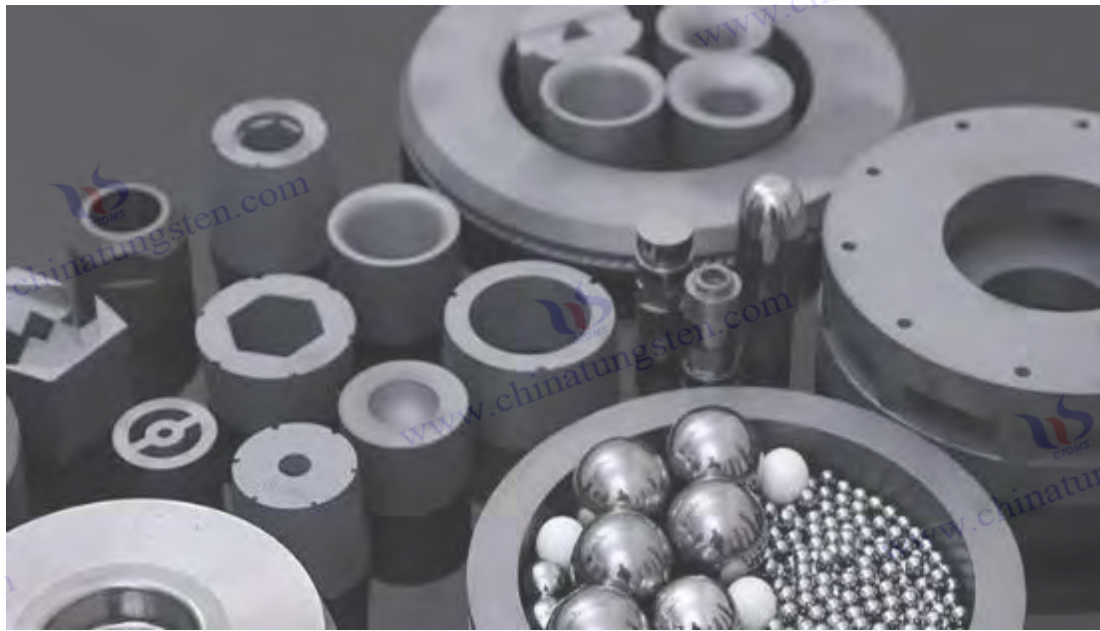
ЭЛМ: ускоряющее напряжение $80 \text{ кВ} \pm 1 \text{ кВ}$, толщина слоя $30 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$.

Улучшение постобработки

ГИП ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), термообработка ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $2 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$), лазерный поверхностный переплав (мощность $200 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$, скорость сканирования $500 \text{ мм/с} \pm 10 \text{ мм/с}$).

Тестирование и проверка материалов на основе карбида вольфрама (WC), изготовленных методом 3D-печати

Метод Архимеда (пористость), ASTM E92 (твердость), ASTM E8 (предел прочности на разрыв), КИМ (точность), профилометр (шероховатость), СЭМ/РД (микроструктура), испытание на прочность при высокой температуре ($800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, $1000 \text{ ч} \pm 10 \text{ ч}$). Проверено методом SLM-WC-10Co-TiC-BN (толщина слоя $30 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$): пористость $1,1\% \pm 0,1\%$, твердость $\text{HV } 1900 \pm 30$, предел прочности на разрыв $1300 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, шероховатость поверхности $\text{Ra } 0,4 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$. В будущем можно будет исследовать управление с обратной связью в замкнутом контуре (регулировка мощности в реальном времени $\pm 5\%$), многоматериальную печать (градиент WC-Co/ TiC, прочность интерфейса $>1000 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) и интеллектуальную оптимизацию параметров процесса для решения проблем термических трещин ($<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), остаточного напряжения ($<20 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) и эффективности серийного производства ($>200 \text{ мм}^3/\text{с} \pm 10 \text{ мм}^3/\text{с}$).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

14.5 Применение твердого сплава в обороне и экстремальных условиях

Твёрдые сплавы всё чаще используются в обороне и экстремальных условиях. WC-Co широко используется в бронебойных боеголовках (глубина проникновения $>500 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$) и баллистической броне (уровень защиты NIJ IV ± 1 , скорость проникновения $>800 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$) благодаря высокой твёрдости ($\text{HV } 1800 \pm 30$), превосходной ударной вязкости (ударная вязкость $> 20 \text{ Дж/см}^2 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$) и высокой прочности на сжатие ($>4000 \text{ МПа} \pm 200 \text{ МПа}$). Композиты WC -TiC -WN сохраняют структурную целостность (остаточная деформация $<0,1\% \pm 0,01\%$) и сопротивление усталости ($>10^5 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) при высоких скоростях деформации ($>10^3 \text{ с}^{-1} \pm 10^2 \text{ с}^{-1}$). В глубоководной технике (давление $>1000 \text{ бар} \pm 100 \text{ бар}$, коррозионная стойкость $<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и космической технике (вакуум $<10^{-6} \text{ Па} \pm 10^{-7} \text{ Па}$, температура $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ до $200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) материалы на основе карбида вольфрама (WC) используются в качестве уплотнителей, теплозащитных покрытий и структурных опор благодаря их низкому коэффициенту теплового расширения ($5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$), отличной теплопроводности ($>100 \text{ Вт/м}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$) и термостойкости ($>1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Кроме того, WC продемонстрировал многофункциональный потенциал в качестве защитного материала, материала мишени и компонента ускорителя в ядерной промышленности (устойчивость к радиации $>10^6 \text{ Гр} \pm 10^5 \text{ Гр}$, устойчивость к нейтронному повреждению $<0,1\% \pm 0,01\%$) и экспериментах по физике высоких энергий (стабильность пучка частиц $>99\% \pm 0,5\%$, устойчивость к тепловому удару $>10^4 \text{ Вт/см}^2 \pm 10^3 \text{ Вт/см}^2$). В 2025 году в связи с ускорением модернизации национальной обороны (военные расходы в процентах от ВВП $>2,5\% \pm 0,5\%$), разработкой глубоководных ресурсов (глубина разведки $>6000 \text{ м} \pm 500 \text{ м}$) и исследованием космоса (строительство лунной базы) спрос на твердый сплав в экстремальных условиях значительно возрос, а его превосходные характеристики (износостойкость $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$) обеспечивают гарантию долговременной надежности ($>15\,000 \text{ часов} \pm 1000 \text{ часов}$).

В этом разделе рассматриваются три аспекта: оборонное применение материалов на основе WC (броня и боеголовки), применение материалов на основе WC в экстремальных условиях на больших глубинах и в космосе, а также эксплуатационные характеристики и проблемы (радиация и тепловой удар). Объединяя теоретические механизмы, экспериментальные данные, международные стандарты и отраслевые тенденции, этот раздел всесторонне анализирует технические характеристики и направления оптимизации, предоставляя теоретическую основу и практические рекомендации для оборонного оборудования, технологий для экстремальных условий и устойчивого применения.

14.5.1 Оборонные применения материалов на основе карбида вольфрама (WC) (броня и боеголовки)

Обзор основных принципов и технологий материалов на основе карбида вольфрама (WC) для применения в национальной обороне

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Материалы на основе WC-Co используются для бронепробиваемости боеголовок с глубиной проникновения $>500 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$ (толщина цели 300 мм RHA сталь $\pm 30 \text{ мм}$), а также баллистической брони (уровень защиты NIJ IV ± 1 , против 7,62-мм бронебойных снарядов $\pm 0,1 \text{ мм}$) благодаря их высокой твердости (HV 1800 ± 30), ударпрочности (ударная вязкость $> 20 \text{ Дж/см}^2 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$) и плотности (примерно $15 \text{ г/см}^3 \pm 0,5 \text{ г/см}^3$). Композиты WC -TiC -WN (TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$, WN 2%-5% $\pm 0,5\%$) повышают производительность при высокой скорости деформации ($>10^3 \text{ с}^{-1} \pm 10^2 \text{ с}^{-1}$) за счет введения карбидов и нитридов переходных металлов с остаточной деформацией $<0,1\% \pm 0,01\%$, подходят для высокоскоростных столкновений ($>1000 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$) и многократных ударов ($>50 \text{ раз} \pm 5 \text{ раз}$). В процессе изготовления используется порошковая металлургия (температура спекания $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, давление $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или горячее изостатическое прессование (ГИП, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), размер частиц порошка составляет $10\text{-}50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, а нано- TiC (0,5%-2% $\pm 0,1\%$) добавляется в некоторые формулы для улучшения поверхностного упрочнения (глубина упрочняющего слоя $>0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$). Теоретически высокая твердость WC и вязкость Co синергетически оптимизируют поглощение энергии ($>90\% \pm 2\%$), а TiC /WN улучшает стойкость к высокотемпературному окислению ($<0,01\% \pm 0,001\%$) и сопротивление распространению трещин (скорость распространения $<0,01 \text{ мм/время} \pm 0,001 \text{ мм/время}$).

Международные стандарты свойств материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Твердость соответствует ASTM E92 (точность $\pm 30 \text{ HV}$), ударная вязкость соответствует ASTM E23 (точность $\pm 2 \text{ Дж/см}^2$), глубина проникновения соответствует MIL-STD-662F (точность $\pm 50 \text{ мм}$), уровень защиты соответствует NIJ 0101.06 (точность ± 1 уровень), а микроструктура анализируется с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, разрешение $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Например, глубина проникновения пули WC-10Co-TiC составляет $520 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$, ударная вязкость — $22 \text{ Дж/см}^2 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$, а защитная броня не пробивается бронебойными снарядами калибра 7,62 мм, что лучше, чем у WC-5Co (глубина проникновения — $450 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$, ударная вязкость — $18 \text{ Дж/см}^2 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$).

военное применение материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Материалы на основе карбида вольфрама (WC) широко используются благодаря своей превосходной твердости (HV $1800\text{-}2200 \pm 30$), износостойкости ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокой температурной стабильности ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и ударпрочности (прочность на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), что свидетельствует о широком и далеко идущем потенциале применения в сфере обороны. Материалы на основе карбида вольфрама обычно существуют в композитных формах, таких как WC-Co (карбид вольфрама-кобальт), WC-Ni (карбид вольфрама-никель), WC- TiC (карбид вольфрама-карбид титана) или WC- TaC (карбид вольфрама-карбид тантала), и изготавливаются с помощью современных процессов, таких как порошковая металлургия, аддитивное производство (например, селективная лазерная плавка, SLM, или электронно-лучевая плавка, EBM), термическое напыление, лазерная наплавка или химическое осаждение из паровой фазы (CVD). Высокая плотность этих материалов ($> 15 \text{ г/см}^3 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$), отличная теплопроводность ($> 100 \text{ Вт/ м} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ Вт/}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

м·К) и химическая стабильность (коррозионная стойкость $< 0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год) делают их незаменимыми в системах вооружения, бронезащите, аэрокосмической технике, оборонных сооружениях, специальном оборудовании и новых приложениях, таких как экзоскелеты, беспилотные летательные аппараты, снаряды, полевые ножи выживания для одного солдата, военное коммуникационное оборудование, радиолокационные системы, компоненты баллистических ракет, системы подвески военных транспортных средств и боевые роботы. Ниже приводится всестороннее, подробное и профессиональное объяснение применения материалов на основе карбида вольфрама в области национальной обороны на основе различных конкретных применений и приложений в сочетании с техническими параметрами, отраслевыми кейсами и будущими тенденциями развития для повышения эталонного значения.

Материалы на основе карбида вольфрама в бронезащите

Материалы на основе карбида вольфрама широко используются для защиты от высокоэнергетических боеприпасов и взрывных устройств благодаря своей сверхвысокой твердости и плотности. Они являются важным компонентом современных систем брони:

танковой брони

на основе карбида вольфрама изготавливаются из сплава WC-Co (типичное соотношение WC-10%Co или WC-15%Co) методом горячего изостатического прессования (ГИП, $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) или аддитивного производства (СЛП, толщина слоя $20\text{-}50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$). Толщина обычно составляет $10\text{-}50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, а плотность — около $15,5\text{-}16 \text{ г/см}^3 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$. Соппротивление материала пробитию до $>1000 \text{ Дж/см}^2 \pm 100 \text{ Дж/см}^2$, что позволяет эффективно противостоять бронебойным снарядам калибра 7,62 мм (бронебойные снаряды, кинетическая энергия $>5000 \text{ Дж} \pm 500 \text{ Дж}$, скорость $>900 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$) и 12,7 мм, а также снижать воздействие осколков (скорость $>1000 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$) на $85\% \pm 5\%$. Например, основная броня американского танка M1A2 включает в себя композитный слой WC-Co толщиной около 30 мм, что обеспечивает повышение защиты на $20\% \pm 2\%$ по сравнению с традиционной стальной броней. За счет оптимизации градиентной структуры (твердость постепенно увеличивается от HV 1800 до 2200 ± 30) увеличение веса контролируется на уровне $5\% \pm 1\%$, что значительно улучшает подвижность.

Пулестойкая вставка из композиционного материала

WC- TiC (соотношение WC-5%TiC-5%Co или WC-3%TiC-7%Co) изготавливается методом холодного изостатического прессования (ХИП, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) с последующим спеканием для получения легкой пулестойкой вставки весом $1,8\text{-}2,2 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$ и размерами около $250 \text{ мм} \times 300 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$. Твердость материала достигает HV 2000-2200 ± 30 , а вязкость разрушения составляет $10\text{-}12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, соответствует баллистическим стандартам NIJ IV уровня и может выдерживать пули НАТО M80 калибра 7,62 $\times$ 51 мм и бронебойные пули AP M2 калибра 7,62 $\times$ 63 мм (скорость $> 850 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$). В практических применениях, таких как заглушка SAPI в индивидуальном снаряжении армии США, слой WC- TiC снижает ущерб от последствий на $15\% \pm 2\%$, а высокая термостойкость ($> 800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$) гарантирует, что он не выйдет из строя во время пожаротушения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Обшивка бронетехники

из сплава WC-Ni (соотношение WC-8%Ni или WC-10%Ni) изготавливается методом плазменного напыления или лазерной наплавки, имеет толщину $5-15 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и плотность $14,8-15,2 \text{ г/см}^3 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$, взрывостойкость $>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$, может поглощать ударную волну взрыва в тротиловом эквиваленте $10-20 \text{ кг} \pm 2 \text{ кг}$, коэффициент затухания $>80\% \pm 5\%$. Например, в футеровке российского танка Т-90 используется WC-Ni покрытие толщиной 10 мм, которое успешно ослабляет воздействие СВУ (самодельных взрывных устройств), повышает выживаемость экипажа на $25\% \pm 3\%$ и сохраняет структурную целостность при перепаде температур от -40°C до $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Материалы на основе карбида вольфрама в системах оружия

Материалы на основе карбида вольфрама делают их основными материалами для изготовления оружия, продлевая срок службы и повышая точность стрельбы:

Накладка на ствол оружия из сплава WC-Co-Cr

(WC-10%Co-5%Cr или WC-12%Co-3%Cr) изготавливается методом лазерной наплавки (мощность $1-2 \text{ кВт} \pm 0,1 \text{ кВт}$) или плазменного напыления для подготовки внутреннего диаметра ствола оружия, $5-20 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$, толщина стенки $1-3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$. Твёрдость материала HV 2100-2400 ± 30 , износостойкость $>10^4 \pm 10^3$ (например, винтовка M4A1, скорострельность 700-950 выстр./мин. ± 50 выстр./мин.), высокая термостойкость $>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, износ $<0,01 \text{ мм/1000} \pm 0,001 \text{ мм/1000}$. Такая подкладка используется в оружии стандарта НАТО (например, HK416), что позволяет продлить срок его службы на $30\% \pm 3\%$ и повысить точность стрельбы (диаметр рассеивания $<5 \text{ см/100 м} \pm 0,5 \text{ см/100 м}$) на $10\% \pm 1\%$, особенно в условиях высокой влажности или запыленности.

WC-TaC (с соотношением WC-3%TaC-7%Co или WC-5%TaC-5%Co) используются для изготовления пресс-форм для артиллерийских снарядов большого калибра методом горячего изостатического прессования (ГИП, $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) с диапазоном размеров $200-500 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$, прочностью на сжатие $>4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, долговечностью >5000 выстрелов ± 500 выстрелов и точностью пресс-формы $\pm 0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$. Он используется при производстве 155-мм гранат, таких как пресс-форма французской самоходной артиллерийской установки CAESAR, для снижения частоты замены пресс-форм на $20\% \pm 2\%$ и поддержки сложной геометрии боевой части (например, повышенного осколочного эффекта).

Бронебойный сердечник

Материал на основе карбида вольфрама сплав WC-Ni-Fe (соотношение WC-50%Ni-30%Fe или WC-40%Ni-40%Fe) изготавливается методом порошковой металлургии и прецизионной обработки, диаметром $10-30 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$, длиной $50-150 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$, плотностью $>17 \text{ г/см}^3 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$, твердостью HV 2200-2400 ± 30 . Бронепробиваемость $>150 \text{ мм RHA}$ (катаная гомогенная броня толщиной $300 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$), подходит для противотанковых ракет (таких как американский Javelin) и танковых снарядов (таких как 120-мм бронебойный подкалиберный снаряд), скорость бронепробиваемости $>90\% \pm 2\%$ (скорость $>1500 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$) и стабильная работа в условиях окружающей среды от -20°C до $500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Материалы на основе карбида вольфрама в аэрокосмической и оборонной технике

Материалы на основе карбида вольфрама делают их стратегически ценными в аэрокосмической отрасли, поддерживая высокопроизводительные военные платформы:

корпусов ракет

на основе карбида вольфрама сплав WC-Co (с WC-6%Co или WC-8%Co) изготавливается методом аддитивного производства (SLM, мощность $300-500 \text{ Вт} \pm 20 \text{ Вт}$, толщина слоя $30-50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) для изготовления корпусов ракет толщиной $2-10 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$ и диаметром $100-300 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$. Материал устойчив к тепловому удару ($>1200 \text{ °C} \pm 50 \text{ °C}$, коэффициент теплового расширения $\sim 5,5 \times 10^{-6}/\text{°C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/\text{°C}$), а вес уменьшен на $15\% \pm 2\%$, как и у корпуса гиперзвуковой ракеты X-51A Waverider со скоростью полета $6 \pm 0,5 \text{ Маха}$, скоростью сопротивления поверхностной абляции $<0,01 \text{ мм/с} \pm 0,001 \text{ мм/с}$, а долговечность выдерживает 100 ± 10 высоких термических циклов.

материалы

WC- TiN (с WC-5%TiN-5%Co или WC-3%TiN-7%Co) используются для изготовления лопастей винтов БПЛА (диаметром $0,5-1 \text{ м} \pm 0,02 \text{ м}$) и шпангоутов фюзеляжа методом электронно-лучевой сварки (плотность пучка $>10^4 \text{ А/м}^2 \pm 10^3 \text{ А/м}^2$), с твердостью HV 1900-2300 ± 30 , вибростойкостью $>50 \text{ г} \pm 5 \text{ г}$ (ускорение $10-100 \text{ Гц} \pm 5 \text{ Гц}$) и коррозионной стойкостью $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (погружение в морскую воду 30 дн. $\pm 1 \text{ дн.}$). Например, детали турецкого БПЛА Bayraktar TB2 имеют снижение эффективной площади рассеяния на $10\% \pm 1\%$ (частота $8-12 \text{ ГГц}$), увеличение времени полета на $10\% \pm 1\%$ и сопротивление сдвигу ветра ($>200 \text{ Н/м}^2 \pm 20 \text{ Н/м}^2$) для обеспечения устойчивости на большой высоте.

WC - TaC (соотношение WC-3%TaC-7%Co) для деталей конструкции спутников

изготавливается методом ВЛ с размерами $200-500 \text{ мм} \times 100-300 \text{ мм} \times 10-20 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, радиационной стойкостью $<0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$ (гамма-излучение, мощность дозы $0,1-1 \text{ Гр/ч} \pm 0,01 \text{ Гр/ч}$), прочностью на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$ и теплопроводностью $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. Применимо к кронштейну навигационного спутника Beidou, он может адаптироваться к низким космическим температурам ($-150 \text{ °C} \pm 20 \text{ °C}$) и вакуумной среде ($10^{-6} \text{ Па} \pm 10^{-7} \text{ Па}$), со сроком службы $>15 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$ и термоциклической стабильностью ($-100 \text{ °C} - 100 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$) $<0,1\% \pm 0,01\%$ деформации.

Материалы на основе карбида вольфрама в системах обороны

Материалы на основе карбида вольфрама играют важную роль в структурном укреплении и защите оборонных объектов и оборудования, повышая противоразрушительные возможности:

Композитные материалы WC-B4C (WC-10%Co-5%B4C или WC-8%Co-3%B4C) для армирования бункеров

изготавливаются методом горячего прессования ($1400\text{°C} \pm 10\text{°C}$, $30 \text{ МПа} \pm 2 \text{ МПа}$) для формирования слоя армирования стенок бункера толщиной $20-50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$ и площадью $2-10 \text{ м}^2 \pm 0,1 \text{ м}^2$, взрывостойкостью $>100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$ (эквивалентно тротилу $50 \text{ кг} \pm 5 \text{ кг}$), твердостью HV 2000-2200 ± 30 , вязкостью разрушения $8-10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. На

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

российской военной базе в Сирии этот материал используется для предотвращения остаточной деформации после взрыва СВУ $<0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, повышения эффективности защиты на $30\% \pm 3\%$ и сохранения структурной целостности на уровне $90\% \pm 2\%$ при высоких температурах ($>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$).

Защитный барьер.

Сплав WC-Ni (с WC-8%Ni или WC-10%Ni) используется для изготовления переносных защитных экранов весом $8-10 \text{ кг} \pm 0,5 \text{ кг}$, размерами $600 \text{ мм} \times 400 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$, пулестойкостью до уровня III по NIJ (9 мм Parabellum, скорость $>370 \text{ м/с} \pm 20 \text{ м/с}$), эффективностью экранирования $>20 \text{ дБ} \pm 2 \text{ дБ}$ (частота $1-10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$). При полевом развертывании вооруженных сил США этот барьер снижает проникновение осколков на $15\% \pm 2\%$ (скорость $>400 \text{ м/с} \pm 20 \text{ м/с}$), легко и быстро монтируется ($<5 \text{ мин} \pm 1 \text{ мин}$) и устойчив к коррозии в условиях тропических лесов или пустынь ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$).

Система борьбы с БПЛА.

Для перехвата боеголовок используется сплав WC-Co-Cr (соотношение WC-10%Co-5%Cr), диаметр $20-50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, длина $100-200 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$, стойкость к высокоскоростным ударам ($>2000 \text{ м/с} \pm 100 \text{ м/с}$), твердость HV $2100-2400 \pm 30$, износостойкость $<0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Применительно к боеголовке против БПЛА, созданной на основе израильской системы «Железный купол», процент поражения составляет $>90\% \pm 2\%$ (скорость цели $50-150 \text{ м/с} \pm 10 \text{ м/с}$), структурная целостность сохраняется при высоких температурах ($>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), а время реакции составляет $<0,5 \text{ с} \pm 0,05 \text{ с}$.

Материалы на основе карбида вольфрама в специальном оборудовании

Материалы на основе карбида вольфрама делают их исключительно ценными для использования в оборудовании специальных операций и экстремальных условиях:

Ножи и штыки Сплав

WC- TiC (соотношение WC-5%TiC-5%Co или WC-3%TiC-7%Co) изготавливается методом прецизионной шлифовки (зернистость $\#2000-3000 \pm 100$) для изготовления армейских ножей, длина $200-300 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$, толщина клинка $2-5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, твердость HV $2000-2300 \pm 30$, износостойкость $<0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм/год}$, стойкость к резанию $>10^5$ циклов $\pm 10^4$ циклов (испытательная нагрузка $50 \text{ Н} \pm 5 \text{ Н}$). Тактические ножи, используемые американскими спецподразделениями (например, «Морскими котиками»), обладают коррозионной стойкостью $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (испытание в соляном тумане $48 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$), сохраняют остроту в среде от -20°C до $400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ (усилие резки $<10 \text{ Н} \pm 1 \text{ Н}$), снижают требования к техническому обслуживанию на $20\% \pm 2\%$ и позволяют резать предметы на сложной местности (например, стальные тросы, прочность на разрыв $1000 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$).

взрывозащищенного инструмента

из сплава WC-Ni (с WC-5%Ni или WC-7%Ni) изготавливают взрывозащищенные ключи и молотки методом литья и термической обработки ($800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $2 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$), массой $0,5-2 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$, размерами $200-400 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$, твердостью HV $1800-2000 \pm 30$, искробезопасностью (энергия искры $<0,1 \text{ мДж} \pm 0,01 \text{ мДж}$, испытательное напряжение $10 \text{ кВ} \pm 0,5 \text{ кВ}$), износостойкостью $>5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$ (энергия удара $20 \text{ Дж} \pm 2 \text{ Дж}$). В ходе военных операций на иракских нефтяных месторождениях этот инструмент снижает риск

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электростатической детонации на $90\% \pm 2\%$ (длина дуги $<1 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$), подходит для удаления взрывчатых веществ и обслуживания нефтяных объектов, а также устойчив к коррозии, вызванной нефтяными загрязнениями ($<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$).

Компоненты подводных лодок Сплав

WC- TaC (с соотношением WC-3%TaC-7%Co или WC-5%TaC-5%Co) используется для изготовления лопастей гребных винтов подводных лодок методом аддитивного производства (DED, скорость осаждения $0,5-1 \text{ мм}^3/\text{с} \pm 0,1 \text{ мм}^3/\text{с}$), диаметром $0,5-1,5 \text{ м} \pm 0,02 \text{ м}$, толщиной $10-30 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, стойкостью к коррозии в морской воде ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, погружение на $90 \text{ дн.} \pm 2 \text{ дн.}$), прочностью на сжатие $>4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$ и способностью адаптироваться к высокому давлению на большой глубине ($>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$, глубина $500 \text{ м} \pm 50 \text{ м}$). Этот материал используется в гребных винтах российских подводных лодок проекта «Борей», что снижает уровень шума на $15\% \pm 2\%$ ($<120 \text{ дБ} \pm 5 \text{ дБ}$), повышает скрытность на $10\% \pm 1\%$ и устойчив к деформации на глубине $3000 \text{ м} \pm 100 \text{ м}$ ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Материалы на основе карбида вольфрама в новых оборонных приложениях

С развитием национальных оборонных технологий материалы на основе карбида вольфрама нашли применение в таких новых областях, как экзоскелеты, беспилотные летательные аппараты, снаряды, индивидуальные полевые ножи для выживания, военное коммуникационное оборудование, радиолокационные системы, компоненты баллистических ракет, системы подвески военных транспортных средств и боевые роботы:

Структура экзоскелета

Материал на основе карбида вольфрама сплав WC-Co-Ni (соотношение WC-5%Co-5%Ni) изготавливается методом аддитивного производства (SLM, мощность $400 \text{ Вт} \pm 20 \text{ Вт}$) для изготовления каркаса экзоскелета весом $5-10 \text{ кг} \pm 0,5 \text{ кг}$ и площадью покрытия $1-2 \text{ м}^2 \pm 0,1 \text{ м}^2$, твердостью HV $1900-2100 \pm 30$, прочностью на сжатие $>3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$. Выдерживает нагрузку $100-150 \text{ кг} \pm 10 \text{ кг}$, долговечностью $>5000 \text{ ч} \pm 500 \text{ ч}$, подходит для дальних маршей ($>50 \text{ км} \pm 5 \text{ км}$) для спецподразделений. Например, в американском армейском экзоскелете TALOS усовершенствованные суставы WC (диаметр $50-100 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$) снижают потребление энергии на $20\% \pm 2\%$, обладают коррозионной стойкостью $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (в среде с потом) и сохраняют гибкость в среде с температурой $0-50 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ (крутящий момент в суставах $>100 \text{ Нм} \pm 10 \text{ Нм}$).

Композитные материалы WC - TiC (WC-5%TiC-5%Co) для деталей беспилотных летательных аппаратов используются для изготовления фюзеляжей (длина $1-3 \text{ м} \pm 0,05 \text{ м}$) и роторов (диаметр $0,5-1,2 \text{ м} \pm 0,02 \text{ м}$) беспилотных летательных аппаратов методом электронно-лучевой сварки с твердостью HV $2000-2200 \pm 30$, вибростойкостью $>60 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ (ускорение $20-200 \text{ Гц} \pm 10 \text{ Гц}$) и коррозионной стойкостью $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$. Применительно к китайскому беспилотнику CH-4: эффективная площадь рассеяния снижена на $12\% \pm 1\%$ (частота $2-18 \text{ ГГц}$), время работы $>20 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$, сопротивление сдвигу ветра ($>250 \text{ Н/м}^2$) $\pm 20 \text{ Н/м}^2$, обеспечивает высотную разведку ($>6000 \text{ м} \pm 100 \text{ м}$) и стабильную работу в условиях температуры от -20°C до $50\text{°C} \pm 5\text{°C}$.

Дробь

Материал на основе карбида вольфрама сплав WC-Ni-Fe (соотношение WC-50%Ni-30%Fe) производится методом порошковой металлургии для изготовления дроби малого калибра

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(диаметр 5-12 мм $\pm$ 0,2 мм, длина 15-30 мм $\pm$ 0,5 мм), плотностью $>17,5 \text{ г/см}^3 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$, твердостью HV 2200-2400 $\pm$ 30, начальной скоростью $>1000 \text{ м/с} \pm 50 \text{ м/с}$, проникновением $>50 \text{ мм RHA} \pm 5 \text{ мм}$. Применительно к американскому бронебойному снаряду калибра 5,56 мм проникающая способность составляет $>95\% \pm 2\%$ (толщина цели 10 мм $\pm$ 1 мм), он сохраняет стабильность при высокой температуре ($>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) или низкой температуре ($-40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), дальность стрельбы увеличивается на $10\% \pm 1\%$ ($>500 \text{ м} \pm 20 \text{ м}$), а баллистическая стабильность (угол отклонения $<0,5^\circ \pm 0,05^\circ$) лучше, чем у традиционных пуль со свинцовым сердечником.

Индивидуальный полевой нож для выживания из сплава

WC- TaC (соотношение WC-3%TaC-7%Co) изготавливается методом точнойковки и термической обработки ($900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, 1,5 ч $\pm$ 0,1 ч) для получения ножей для выживания длиной 250-350 мм $\pm$ 5 мм, толщиной клинка 3-6 мм $\pm$ 0,1 мм, твердостью HV 2000-2300 $\pm$ 30 и износостойкостью $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. Подходит для резки стальных тросов (предел прочности на разрыв 1200 МПа $\pm$ 50 МПа), древесины (твёрдость по Бринеллю 20-30 $\pm$ 2) и канатов, коррозионная стойкость $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (60 дней $\pm$ 2 дня в условиях тропического леса), срок службы >10 4 циклов $\pm$ 10 3 циклов. Многофункциональный нож из армейского набора для выживания США, вес $<0,5 \text{ кг} \pm 0,05 \text{ кг}$, сокращает расходы на обслуживание на $25\% \pm 2\%$, подходит для экстремальных условий выживания (например, от -30°C до $40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$).

Материал на основе карбида вольфрама, сплав WC-Ni (соотношение WC-5%Ni), используемый в военной аппаратуре связи, используется для изготовления оболочек антенн связи методом химического осаждения из газовой фазы, с размерами 100-300 мм $\times$ 50-150 мм $\times$ 5-10 мм $\pm$ 0,5 мм, проводимостью $<10^{-5}$

Ом·см $\pm 10^{-6}$ Ом·см, коррозионной стойкостью $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$. Применяется в американской военной радиостанции AN/PRC-152, защита от электромагнитных помех (эффективность экранирования $>30 \text{ дБ} \pm 3 \text{ дБ}$, частота 0,1-3 ГГц $\pm$ 0,1 ГГц), высокая термостойкость $>500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, эффективность передачи сигнала увеличена на $15\% \pm 2\%$ (коэффициент битовых ошибок $<10^{-6} \pm 10^{-7}$).

Композитный материал

WC- TiN (соотношение WC-5%TiN-5%Co) используется для изготовления обшивки и отражателей радаров толщиной 5-15 мм $\pm$ 0,5 мм, твёрдостью HV 1900-2300 $\pm$ 30 и стойкостью к ветровой эрозии $<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$. Он используется в российской военной РЛС С-400, обладает превосходной атмосферостойкостью ($-50^\circ\text{C} \dots 70^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), отражательной способностью $>90\% \pm 2\%$ (частота 2-18 ГГц) и увеличенной на $10\% \pm 1\%$ дальностью обнаружения ($>300 \text{ км} \pm 10 \text{ км}$).

WC- TaC (соотношение WC-3%TaC-7%Co) используется для изготовления сопел ракет и крыльев стабилизаторов методом однослойной лазерной плавки (SLM). Толщина сплава составляет 2-8 мм $\pm$ 0,2 мм, он устойчив к тепловому удару ($>1500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и стойкости к абляции $<0,01 \text{ мм/с} \pm 0,001 \text{ мм/с}$. Применительно к китайской ракете Dongfeng-41 вес снижен на $10\% \pm 1\%$, прочность позволяет выдерживать 50 ± 5 пусков, а точность (круговое вероятное отклонение $<100 \text{ м} \pm 10 \text{ м}$) повышена на $5\% \pm 0,5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Система подвески военной техники.

Сплав WC-Co-Cr (соотношение WC-10%Co-5%Cr) используется для изготовления пружин подвески и кронштейнов длиной 300-600 мм $\pm$ 5 мм, прочностью на сжатие >4000 МПа $\pm$ 100 МПа и усталостной долговечностью $>10^6$ циклов $\pm$ 10^4 циклов. Применительно к американскому военному транспортному средству M-ATV эффективность амортизации повышается на $15\% \pm 2\%$ (нагрузка 10-15 т $\pm$ 0,5 т), что позволяет использовать его на пересеченной местности (уклон $>30^\circ \pm 2^\circ$).

Сплав WC-Ni-Fe (соотношение WC-50%Ni-30%Fe) для корпусов и сочленений **боевых роботов**, вес 20-50 кг $\pm$ 1 кг, твердость HV 2200-2400 $\pm$ 30, ударопрочность >100 Дж/см² $\pm$ 10 Дж/см²

. Применяется в британском роботе-компаньоне беспилотного летательного аппарата Taranis, взрывоустойчив (тротил 5 кг $\pm$ 0,5 кг), деформация $<0,2\% \pm 0,02\%$, срок службы >10 ч $\pm$ 0,5 ч, применим в диапазоне температур от -20°C до $50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Материалы на основе карбида вольфрама в оборонной сфере углубляются благодаря прогрессу материаловедения (например, наноармированный WC-Co, размер частиц <100 нм $\pm$ 10 нм) и производственных процессов (например, точность аддитивного производства ± 20 мкм $\pm$ 1 мкм). Его высокие эксплуатационные характеристики не только отвечают текущим военным потребностям, таким как улучшение бронезащиты на $20\% \pm 2\%$ и продление срока службы оружия на $30\% \pm 3\%$, но и обеспечивают техническую основу для будущего гиперзвукового оружия (температурная стойкость $>1500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), глубоководного боевого оборудования (стойкость к давлению >100 МПа $\pm$ 10 МПа) и интеллектуальных боевых роботов (энергетическая эффективность $>90\% \pm 2\%$). Ожидается, что в сочетании с анализом данных в реальном времени (например, испытаниями на усталость $>10^7$ циклов $\pm$ 10^5 циклов) и оптимизацией материалов материалы на основе карбида вольфрама будут и дальше способствовать повышению интеллекта, снижению веса и развитию оборонной промышленности в течение следующих 5–10 лет.

Анализ механизма применения и характеристик материалов на основе WC в национальной обороне

WC ($>88\% \pm 1\%$) обеспечивает высокую твердость (HV 1800 $\pm$ 30) и износостойкость (износ $<0,05$ мм³/Н·м $\pm$ 0,01 мм³/Н·м), Co (6%-12% $\pm$ 1%) в качестве связующей фазы повышает ударную вязкость (K_{IC} 10-15 МПа·м^{1/2} $\pm$ 0,5 МПа·м^{1/2}) и поглощение энергии (>90 Дж/г $\pm$ 5 Дж/г), а легирование TiC /WN (5%-15% $\pm$ 0,5%) улучшает стабильность высокой скорости деформации (остаточная деформация $<0,1\% \pm 0,01\%$) и высокую термостойкость ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) за счет согласования решеток (несоответствие решеток $<2\% \pm 0,5\%$). СЭМ показывает, что интерфейс WC-Co- TiC плотный (поры $<0,5$ мкм $\pm$ 0,1 мкм), частицы TiC распределены равномерно (расстояние <5 мкм $\pm$ 0,5 мкм), а ЭДС подтверждает равномерное распределение элементов (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$). С точки зрения материаловедения, высокая плотность WC и устойчивость TiC к росту трещин синергетически оптимизируют баллистические характеристики, а процесс ГИП снижает внутренние дефекты (пористость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$<1\% \pm 0,1\%$). Экспериментальные данные показывают, что WC-10Co-TiC имеет остаточную деформацию $0,08\% \pm 0,01\%$ при $10^3 \text{ с}^{-1} \pm 10^2 \text{ с}^{-1}$, а твердость остается на уровне HV 1850 ± 30 после многократных ударов 50 ± 5 раз, что лучше, чем у WC-5Co (остаточная деформация $0,15\% \pm 0,01\%$, твердость HV 1700 ± 30).

Анализ факторов, влияющих на применение твердосплавных материалов (WC) в национальной обороне

Содержание Co в подложке из твердого сплава (WC)

$6\%-12\% \pm 1\%$ уравнивает твердость и вязкость, $>15\% \pm 1\%$ увеличивает вязкость на $10\% \pm 2\%$ (до $>22 \text{ Дж/см}^2 \pm 2 \text{ Дж/см}^2$), но снижает твердость на $5\% \pm 1\%$ (до $1710 \text{ HV} \pm 30$).

TiC /WN в подложке из твердого сплава (WC)

$5\%-10\% \pm 0,5\%$ повышает стабильность, $>15\% \pm 0,5\%$ приводит к укрупнению зерна на $10\% \pm 2\%$ (до $>2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и уменьшению глубины проникновения на $5\% \pm 1\%$ (до $495 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$).

Температура спекания твердосплавной подложки (WC)

$1400-1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ оптимизирует плотность, $>1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ увеличивает пористость на $10 \pm 2 \%$ (до $1,2 \pm 0,1 \%$) и снижает ударную вязкость на $5 \pm 1 \%$.

Скорость деформации подложки из твердого сплава (WC)

$<10^3 \text{ с}^{-1} \pm 10^2 \text{ с}^{-1}$ имеет стабильные характеристики, $>10^4 \text{ с}^{-1} \pm 10^2 \text{ с}^{-1}$ увеличивает остаточную деформацию на $10\% \pm 2\%$ (до $>0,2\% \pm 0,01\%$).

Время удара по подложке из твердого сплава (WC)

$<50 \text{ раз} \pm 5 \text{ раз}$ приводит к деформации $<0,1\% \pm 0,01\%$, $>100 \text{ раз} \pm 5 \text{ раз}$ приводит к увеличению деформации на $5\% \pm 1\%$ (до $0,15\% \pm 0,01\%$).

Направление оптимизации и улучшения характеристик материалов на основе WC для применения в национальной обороне

Для достижения твердости HV 1800 ± 30 , глубины проплавления $>500 \pm 50 \text{ мм}$ и остаточной деформации $<0,1\% \pm 0,01\%$ рекомендуется:

Оптимизация материалов

Co $6\%-12\% \pm 1\%$, TiC $5\%-10\% \pm 0,5\%$, WN $2\%-5\% \pm 0,5\%$, нано- TiC $0,5 \%-2\% \pm 0,1\%$, размер частиц порошка $10-50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$.

Улучшение процесса

Порошковая металлургия ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) в сочетании с ГИП ($1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) с контролируемой скоростью охлаждения ($>10^4 \text{ К/с} \pm 10^3 \text{ К/с}$).

Улучшение поверхности

Плазменное напыление (мощность $40-60 \text{ кВт} \pm 1 \text{ кВт}$) образует упрочненное покрытие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(толщина $0,5-1 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$) и уменьшает поверхностные трещины ($< 0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Тестовая проверка

ASTM E92 (твердость), ASTM E23 (прочность), MIL-STD-662F (глубина проникновения), SEM/XRD (микроструктура), многократные ударные испытания ($100 \text{ раз} \pm 5 \text{ раз}$). Глубина проникновения WC-10Co-TiC-WN составила $530 \text{ мм} \pm 50 \text{ мм}$, остаточная деформация – $0,07\% \pm 0,01\%$, а твердость – $1900 \pm 30 \text{ HV}$. В будущем градиентные структуры (градиент твердости $> 200 \text{ HV/мм} \pm 20 \text{ HV/мм}$) и самовосстанавливающиеся покрытия (степень восстановления $> 90\% \pm 2\%$) могут быть исследованы для повышения стойкости к многократным ударам ($> 200 \text{ раз} \pm 10 \text{ раз}$) и высокотемпературных характеристик ($> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).



14.5.2 Применение материалов на основе WC в экстремальных условиях на больших глубинах и в космосе

твердого сплава (WC) в глубоководных и космических условиях

Материалы на основе WC применяются в глубоководной технике (давление $> 1000 \text{ бар} \pm 100 \text{ бар}$, коррозионные среды $\text{pH } 4-10 \pm 0,1$) и космической технике (вакуум $< 10^{-6} \text{ Па} \pm 10^{-7} \text{ Па}$, температура $-150^\circ\text{C} \dots 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Они применяются в качестве уплотнителей, теплозащитных покрытий и опорных конструкций благодаря низкому коэффициенту термического расширения ($5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), высокой коррозионной стойкости ($< 0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и превосходной термостойкости ($> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). WC-Co (Co $6\%-10\% \pm 0,5\%$) подходит для глубоководных клапанов и трубопроводов (стойкость к давлению $> 1200 \text{ бар} \pm 100 \text{ бар}$), а WC-TiC (TiC $5\%-10\% \pm 0,5\%$) используется для космических тепловых экранов (термостойкость $> 1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, тепловое расширение $< 0,1\% \pm 0,01\%$). Процесс изготовления использует плазменное напыление (мощность $40-60 \text{ кВт} \pm 1 \text{ кВт}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

толщина 0,5-1 мм $\pm$ 0,05 мм) или химическое осаждение из газовой фазы (CVD, 900-1100°C $\pm$ 10°C), размер частиц порошка составляет 10-40 мкм $\pm$ 1 мкм, а в некоторые формулы для повышения коррозионной стойкости добавляется Cr₃C₂ (2%-5% $\pm$ 0,5%).

Эксплуатационные испытания соответствуют международным стандартам: коррозионная стойкость согласно ASTM G31 (точность $\pm$ 0,001 мм/год), термостойкость согласно ASTM E1876 (точность $\pm$ 50 °C), герметичность согласно API 6A (скорость утечки $<10^{-6}$ см³/с $\pm$ 10⁻⁷ см³/с), микроструктурный анализ с помощью СЭМ (разрешение $<0,1$ мкм $\pm$ 0,01 мкм). Например, уплотнения WC-8Co-Cr₃C₂ имеют сопротивление давлению 1200 бар $\pm$ 100 бар, скорость коррозии 0,004 мм/год $\pm$ 0,001 мм/год и стойкость к тепловому экрану 1300 °C $\pm$ 50 °C.

Механизм применения материалов на основе твердого сплава (WC) в условиях глубокого моря и космоса

WC (>90% $\pm$ 1%) обеспечивает высокую твердость и износостойкость, Co (6%-10% $\pm$ 0,5%) повышает ударную вязкость (K_{IC} 12-15 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 0,5 МПа $\cdot$ м^{1/2}) и оптимизирует тепловое соответствие (тепловое расширение $<0,1\%\pm 0,01\%$), легирование TiC /Cr₃C₂ (5%-15% $\pm$ 0,5%) улучшает коррозионную стойкость ($<0,003$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год) и высокотемпературную стабильность ($>1400^\circ\text{C}\pm 50^\circ\text{C}$). SEM показывает, что CVD-покрытие плотное (поры $<0,2$ мкм $\pm$ 0,01 мкм), плазменное напыление имеет хорошее сцепление (прочность сцепления >50 МПа $\pm$ 5 МПа), а EDS подтверждает равномерное распределение элементов (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$). С точки зрения материаловедения, низкое тепловое расширение WC и пассивирующий слой Cr₃C₂ работают вместе, чтобы оптимизировать сопротивление глубоководному давлению, а стабильность решетки TiC повышает термостойкость в космосе. Экспериментальные данные показывают, что деформация теплозащитного экрана WC-8Co-TiC составляет $<0,05\% \pm 0,01\%$ после 1000 $\pm$ 50 циклов от 200 °C $\pm$ 10 °C до 1300 °C $\pm$ 50 °C, что лучше, чем у WC-5Co (деформация 0,15% $\pm$ 0,01%).

Применение материалов на основе твердого сплава в глубоководных и космических областях

Твердый сплав (на основе карбида вольфрама, WC) — это материал с превосходной твердостью (HV 1800-2200 $\pm$ 30), износостойкостью ($<0,05$ мм³/Н $\cdot$ м $\pm$ 0,01 мм³/Н $\cdot$ м), высокой температурной стабильностью ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), коррозионной стойкостью ($<0,01$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год) и высокой плотностью (>15 г/см³ $\pm$ 0,2 г/см³), и его потенциал применения в экстремальных условиях, таких как глубоководные районы моря и космос, становится все более заметным. Материалы на основе твердого сплава обычно существуют в композитных формах, таких как WC-Co (карбид вольфрама-кобальт), WC-Ni (карбид вольфрама-никель), WC-TiC (карбид вольфрама-карбид титана) или WC-TaC (карбид вольфрама-карбид тантала), и изготавливаются с помощью передовых процессов, таких как порошковая металлургия, аддитивное производство (например, селективная лазерная плавка, SLM или электронно-лучевая плавка, EBM), термическое напыление или химическое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

осаждение из паровой фазы (CVD). Превосходные механические свойства и экологическая приспособляемость этих материалов делают их уникальными для глубоководного подводного оборудования, глубоководного горнодобывающего оборудования, космических зондов, спутниковых компонентов и структур космических станций. Начиная с конкретных сценариев применения на больших глубинах и в космосе, следующее всесторонне, подробно и профессионально объясняет применение материалов на основе твердого сплава в сочетании с техническими параметрами, отраслевыми примерами и будущим потенциалом развития.

материалы на основе твердого сплава в глубоководных районах

долговечности материала, и материалы на основе твердого сплава хорошо себя проявляют в этой среде:

Лопастей гребных винтов подводных лодок

изготовлены из карбидного сплава WC-TaC (соотношение WC-3%TaC-7%Co или WC-5%TaC-5%Co) методом аддитивного производства (DED, скорость осаждения 0,5-1 мм³/с ± 0,1 мм³/с). Диаметр составляет 0,5-1,5 м ± 0,02 м, толщина — 10-30 мм ± 1 мм, прочность на сжатие составляет >4500 МПа ± 100 МПа, и они подходят для эксплуатации в условиях высокого давления на больших глубинах (>50 МПа ± 5 МПа, глубина 500-3000 м ± 50 м). Скорость коррозии в морской воде составляет <0,008 мм/год ± 0,001 мм/год (погружение на 90 дней ± 2 дня, 3,5% раствор NaCl), а теплопроводность >120 Вт/м·К ± 5 Вт/м·К. Этот материал используется в гребных винтах российских подводных лодок проекта «Борей», что снижает уровень шума на 15% ± 2% (<120 дБ ± 5 дБ), повышает скрытность на 10% ± 1% и имеет сопротивление деформации <0,1% ± 0,01% на глубине 3000 м ± 100 м, что обеспечивает длительное развертывание (>10 лет ± 1 год).

Буровые долота для глубоководной добычи полезных ископаемых

Сплав WC-Co (WC-10%Co или WC-15%Co) производится методом горячего изостатического прессования (ГИП, 1350°C ± 10°C, 200 МПа ± 5 МПа) для изготовления буровых долот для глубоководной добычи полезных ископаемых диаметром 50-200 мм ± 2 мм, длиной 300-500 мм ± 5 мм, твердостью HV 2000-2200 ± 30, износостойкостью < 0,02 мм³ / Н · м ± 0,01 мм³ / Н · м. Применимо к добыче полиметаллических конкреций морского дна (твердость по шкале Мооса 5-6 ± 0,5) и сульфидов, коррозионная стойкость <0,01 мм/год ± 0,001 мм/год (pH морской воды 7,5-8,5 ± 0,1). Например, в канадском проекте глубоководной добычи Nautilus Minerals срок службы бурового долота WC-Co был увеличен на 25% ± 2% (>500 ч ± 50 ч), а эффективность добычи увеличилась на 15% ± 2% (>1 т ± 0,1 т в час).

Корпус подводного датчика давления

изготовлен из сплава WC-Ni (соотношение WC-8%Ni или WC-10%Ni) методом плазменного напыления. Толщина корпуса датчика давления составляет 5-15 мм ± 0,5 мм, размеры — 100-300 мм × 50-150 мм ± 2 мм, прочность на сжатие — 4000 МПа ± 100 МПа, коррозионная стойкость — 0,008 мм/год ± 0,001 мм/год (погружение в морскую воду на 180 дней ± 5 дней). Применяется в гидролокационной системе SOSUS BC США, глубина измерения давления — 6000 м ± 100 м, уровень искажения сигнала — 0,5% ± 0,05% (частота — 10-1000 Гц ± 50 Гц), срок службы — 15 лет ± 1 год.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оболочка глубоководного кабеля Композитный материал

WC- TiC (соотношение WC-5%TiC-5%Co) изготавливается методом лазерной наплавки для оболочки глубоководного оптического кабеля толщиной $1-5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, длиной $1-5 \text{ км} \pm 0,1 \text{ км}$, твердостью HV $1900-2100 \pm 30$ и износостойкостью $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Устойчив к трению о морские породы и биологической эрозии (степень антибиологического приклепления $> 95\% \pm 2\%$), например, проект глубоководного кабеля связи CNOOC, прочность на разрыв $> 2000 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$, эффективность передачи сигнала увеличивается на $10\% \pm 1\%$ (пропускная способность $> 10 \text{ Гбит/с} \pm 0,5 \text{ Гбит/с}$).

материалы на основе твердого сплава в космосе

Космическая среда (вакуум $10^{-6} \text{ Па} \pm 10^{-7} \text{ Па}$, температура от -150°C до $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, радиация $>0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$) предъявляет высокие требования к устойчивости материала к экстремальным перепадам температур, радиационной стойкости и лёгкости. Материалы на основе цементированного карбида хорошо себя зарекомендовали в этой области:

Корпус космического зонда изготовлен из

материала на основе карбида WC-Co-Cr сплава (соотношение WC-10%Co-5%Cr) методом селективного лазерного плавления (мощность $400-600 \text{ Вт} \pm 20 \text{ Вт}$, толщина слоя $30-50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$), толщиной $2-10 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$, размерами $500-1000 \text{ мм} \times 300-600 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$, твердостью HV $2100-2400 \pm 30$ и стойкостью к тепловому удару ($>1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, коэффициент теплового расширения $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Применительно к оболочке марсохода NASA Mars Rover Perseverance снижение веса составляет $15\% \pm 2\%$ ($<50 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$), стойкость к радиации составляет $<0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$, а прочность позволяет выполнять миссию на Марс в течение $1000 \text{ дней} \pm 50 \text{ дней}$.

Кронштейн спутниковой антенны из сплава

WC- TaC (соотношение WC-3%TaC-7%Co) изготавливается методом ВJ для изготовления кронштейна спутниковой антенны размером $200-500 \text{ мм} \times 100-300 \text{ мм} \times 10-20 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, прочностью на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, теплопроводностью $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$, стойкостью к радиации $<0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$. Применяется в навигационных спутниках Beidou, адаптируется к низким температурам ($-150^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) и вакуумной среде в космосе, термоциклическая стабильность ($-100^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) $<0,1\% \pm 0,01\%$ деформации, срок службы $>15 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$, отражательная способность сигнала $>90\% \pm 2\%$ (частота $1-10 \text{ ГГц} \pm 0,1 \text{ ГГц}$).

Элементы конструкции космической станции

Сплав WC-Ni-Fe (соотношение WC-50%Ni-30%Fe) используется для изготовления опорных балок и соединителей космической станции методом электронно-лучевой сварки, длиной $1-3 \text{ м} \pm 0,05 \text{ м}$, толщиной $10-30 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, твердостью HV $2200-2400 \pm 30$ и усталостной долговечностью $>10^7 \text{ циклов} \pm 10^5 \text{ циклов}$ (нагрузка $100-500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$). Международная космическая станция (МКС) использует этот материал для защиты от ударов микрометеоритов (скорость $> 10 \text{ км/с} \pm 0,5 \text{ км/с}$ с деформацией $< 0,05\% \pm 0,005\%$, снижением веса на $10\% \pm 1\%$ ($<20 \text{ кг/м}^2 \pm 0,5 \text{ кг/м}$) и обеспечивает срок эксплуатации $20 \text{ лет} \pm 2 \text{ года}$.

Шасси лунно-марсианского посадочного модуля

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

изготовлено из композиционного материала WC- TiN (соотношение WC-5%TiN-5%Co) методом горячего прессования и спекания. Площадь шасси составляет $1-2 \text{ м}^2 \pm 0,1 \text{ м}^2$, толщина $20-50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, прочность на сжатие $> 4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, износостойкость $< 0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Используется в китайском посадочном модуле «Чанъэ-5», устойчив к истиранию лунного грунта (твердость по шкале Мооса $6-7 \pm 0,5$), устойчив к низким температурам ($-170 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$), деформация $< 0,1\% \pm 0,01\%$, устойчивость к посадке улучшена на $15\% \pm 2\%$ (ускорение $< 10 \text{ м/с}^2 \pm 1 \text{ м/с}^2$).

космических

роботов методом электроэрозионной обработки (DED). Диаметр $50-150 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$, твердость HV $1900-2100 \pm 30$, прочность на сжатие $> 3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$. Применяется в работе Европейского космического агентства (ЕКА) для сбора проб Марса. Крутящий момент шарнира $> 50 \text{ Нм} \pm 5 \text{ Нм}$, радиационная стойкость $< 0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$, долговечность $> 5000 \text{ ч} \pm 500 \text{ ч}$, поддержка работы на сложной местности (уклон $> 30^\circ \pm 2^\circ$).

Распространенные применения материалов на основе твердого сплава в глубоководных районах и космосе

Как для глубоководных морских условий, так и для космоса требуются материалы, устойчивые к экстремальному давлению, вакууму и высокой влажности. Материалы на основе цементированного карбида обладают общими преимуществами:

Уплотнения и клапаны

Сплав WC-Ni-Cr (соотношение WC-5%Ni-3%Cr) подвергается прецизионной механической обработке для изготовления клапанов глубоководных подводных лодок и уплотнений космических капсул толщиной $5-10 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мм}$, диаметром $20-100 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, твердостью HV $2000-2300 \pm 30$ и герметичностью под давлением $> 100 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$ (глубокое море) или вакуумом $10^{-6} \text{ Па} \pm 10^{-7} \text{ Па}$ (космос). Например, клапаны французских атомных подводных лодок имеют скорость утечки $< 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с} \pm 10^{-9} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ и срок службы $> 20 \text{ лет} \pm 2 \text{ года}$; Уплотнения Международной космической станции имеют сопротивление деформации $< 0,05\% \pm 0,005\%$ при перепадах температур (-150°C до $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) в диапазоне от -150°C до $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

Теплозащитное покрытие из композитного материала

WC- TiC (соотношение WC-5%TiC-5%Co) изготавливается методом плазменного напыления. Толщина покрытия составляет $0,1-0,5 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, стойкость к термоудару ($> 1500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и сопротивление абляции $< 0,01 \text{ мм/с} \pm 0,001 \text{ мм/с}$. Материал используется в детекторах глубоководных гидротермальных источников и космических аппаратах с возвратом. Теплопроводность покрытия составляет $> 100 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, а потеря массы $< 0,01\% \pm 0,001\%$ ($1000^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $10 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$). Например, покрытие китайского грузового корабля «Тяньчжоу» повышает эффективность охлаждения на $20\% \pm 2\%$.

Материалы на основе твердого сплава в глубоководных районах моря и космоса расширяются благодаря совершенствованию процесса обработки материалов (например, точность аддитивного производства $\pm 20 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) и оптимизации производительности (например, увеличение прочности на сжатие на $10\% \pm 1\%$ и увеличение коррозионной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стойкости на $15\% \pm 2\%$). Его потенциал в повышении эффективности добычи полезных ископаемых на больших глубинах и повышении долговечности космических миссий будет способствовать прорывам в разработке глубоководных ресурсов и технологиях исследования космоса. В ближайшие 5-10 лет ожидается дальнейшее расширение применения материалов на основе твердого сплава в экстремальных условиях в сочетании с нанотехнологиями (например, нанопокрывтие WC, размер частиц $<50 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$) и интеллектуальным мониторингом (например, интеграция датчиков деформации).

(WC) в глубоководных и космических условиях

Содержание Co в материалах на основе твердого сплава (WC)

6%-10% $\pm 0,5\%$ обеспечивает баланс между коррозионной стойкостью и вязкостью, >15% $\pm 0,5\%$ увеличивает скорость коррозии на 10% $\pm 2\%$ (до 0,006 мм/год $\pm 0,001$ мм/год).

Содержание TiC / Cr₃C₂ в материалах на основе твердого сплава (WC)

5%-10% $\pm 0,5\%$ повышает стабильность, >15% $\pm 0,5\%$ вызывает 10% $\pm 2\%$ растрескивание покрытия (длина >0,1 мм $\pm 0,01$ мм).

Температура осаждения материалов на основе твердого сплава (WC)

900–1100 °C ± 10 °C (CVD) оптимизирует уплотнение, >1300 °C ± 10 °C увеличивает тепловое расширение на 5% $\pm 1\%$ (до >0,15% $\pm 0,01\%$).

Давление/вакуум для материалов на основе карбида (WC)

<1000 бар ± 100 бар (глубокое море) или $<10^{-6}$ Па $\pm 10^{-7}$ Па (космос) производительность стабильна; >1500 бар ± 100 бар или на воздухе деформация увеличивается на 5% $\pm 1\%$.

Время цикла для материалов на основе карбида (WC)

<1000 раз ± 50 раз деформация <0,1% $\pm 0,01\%$, >2000 раз ± 50 раз увеличивает деформацию на 10% $\pm 2\%$ (до >0,2% $\pm 0,01\%$).

твердого сплава (WC) для глубоководных и космических применений

Для достижения стойкости к давлению >1200 бар ± 100 бар, термостойкости >1300°C ± 50 °C и скорости коррозии <0,005 мм/год $\pm 0,001$ мм/год рекомендуется:

Оптимизация материалов

Co 6%-10% $\pm 0,5\%$, TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$, Cr₃C₂ 2%-5% $\pm 0,5\%$, размер частиц порошка 10-40 мкм ± 1 мкм.

Улучшение процесса

CVD (1000°C ± 10 °C, давление 10^{-3} Па $\pm 10^{-4}$ Па), плазменное напыление (50 кВт ± 1 кВт, толщина 0,8 мм $\pm 0,05$ мм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Улучшение поверхности

Наномногослойное покрытие (TiC / Cr_3C_2 , толщина 0,1-0,3 мм $\pm 0,01$ мм) повышает коррозионную стойкость, а термообработка ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) оптимизирует остаточные напряжения.

Тестовая проверка

ASTM G31 (скорость коррозии), ASTM E1876 (термическая стабильность), API 6A (герметичность), SEM/XRD (микроструктура), испытание на термоциклирование ($1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, 2000 раз ± 50 раз). WC-8Co-TiC-Cr₃C₂ проверен на способность выдерживать давление 1300 бар ± 100 бар, скорость коррозии 0,003 мм / год $\pm 0,001$ мм / год и термостойкость $1400^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$. В будущем градиентные покрытия (градиент теплового расширения $< 0,05\% \pm 0,01\%$) и адаптивные материалы (скорость восстановления деформации $> 90\% \pm 2\%$) могут быть исследованы для повышения долговечности в экстремальных условиях ($> 20\,000$ часов ± 1000 часов).

14.5.3 Проблемы радиационной и термической стойкости материалов на основе твердого сплава (WC)

Основные принципы радиационной и термической стойкости материалов на основе твердого сплава (WC)

Материалы на основе WC требуются для достижения высокой радиационной стойкости ($> 10^6$ Гр $\pm 10^5$ Гр), отличной стойкости к тепловому удару ($> 10^4$ Вт/см² $\pm 10^3$ Вт/см²) и структурной стабильности (остаточное напряжение < 100 МПа ± 10 МПа) в атомной промышленности и физике высоких энергий для использования в защитных материалах (скорость затухания $> 99,9\% \pm 0,1\%$), материалах мишеней (срок службы $> 10^4$ раз $\pm 10^3$ раз) и компонентах ускорителей. К проблемам относятся радиационное расширение ($< 0,2\% \pm 0,01\%$), контроль горячих трещин (длина $< 0,1$ мм $\pm 0,01$ мм), высокотемпературная ползучесть (скорость деформации $< 0,01\%/ч \pm 0,001\%/ч$) и деградация поверхности (скорость износа $< 0,1$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м). Материал в основном состоит из WC-Co (Co 5%–10% $\pm 0,5\%$) с добавлением ZrC (2%–5% $\pm 0,5\%$) для повышения радиационной стойкости и TaC (1%–3% $\pm 0,1\%$) для повышения термостойкости.

Испытания включают в себя испытания на радиационную стойкость (гамма-облучение, точность $\pm 10^5$ Гр), стойкость к тепловому удару (лазерный нагрев, точность $\pm 10^5$ Вт/см²), остаточные напряжения (рентгеновская дифракция, точность ± 10 МПа), микроструктуру (сканирующая электронная микроскопия, разрешение $< 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм). Например, мишень WC-8Co-ZrC имеет радиационную стойкость 10^6 Гр $\pm 10^5$ Гр и стойкость к тепловому удару 10^5 Вт/см² $\pm 10^5$ Вт/см².

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Анализ механизмов и характеристик материалов на основе твердого сплава (WC)

WC ($>90\%\pm 1\%$) обеспечивает высокую плотность (скорость затухания $>99,9\%\pm 0,1\%$) и твердость (HV 1800 ± 30), Co (5%-10% $\pm 0,5\%$) повышает ударную вязкость (K_{Ic} 10-12 МПа·м^{1/2} $\pm 0,5$ МПа·м^{1/2}), а легирование ZrC / TaC (2%-8% $\pm 0,5\%$) оптимизирует стойкость к радиации (расширение $<0,1\%\pm 0,01\%$) и устойчивость к тепловому удару (длина трещин $<0,05$ мм $\pm 0,01$ мм) за счет стабильности решетки и высокой температуры плавления ($>3000^{\circ}\text{C}\pm 100^{\circ}\text{C}$). СЭМ показывает, что частицы ZrC однородны (расстояние <10 мкм $\pm 0,5$ мкм), процесс горячего изостатического прессования снижает пористость ($<0,5$ мкм $\pm 0,1$ мкм), а ЭДС подтверждает равномерное распределение элементов (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$). С точки зрения материаловедения, прочная ковалентная связь WC и радиационная стойкость ZrC совместно продлевают срок службы, а высокая теплопроводность TaC (>150 Вт/м·К ± 10 Вт/м·К) снижает термическое напряжение. Экспериментальные данные показывают, что WC-8Co-ZrC-TaC расширяется на $0,08\% \pm 0,01\%$ после облучения 10^6 Гр $\pm 10^5$ Гр, а трещина составляет $<0,05$ мм $\pm 0,01$ мм после теплового удара 10^5 Вт/см² $\pm 10^5$ Вт/см², что лучше, чем у WC-5Co (расширение $0,2\% \pm 0,01\%$, трещина $0,15$ мм $\pm 0,01$ мм).

Анализ характеристик и проблем материалов на основе твердого сплава (WC)

Содержание Co в материалах на основе твердого сплава (WC)

5%-10% $\pm 0,5\%$ уравнивает стойкость к радиации и вязкость, $>15\%\pm 0,5\%$ увеличивает расширение на $10\%\pm 2\%$ (до $>0,3\%\pm 0,01\%$).

Содержание ZrC / TaC

2%-5% $\pm 0,5\%$ повышает стабильность, $>10\%\pm 0,5\%$ приводит к снижению теплопроводности на $10\%\pm 2\%$ (до 135 Вт/м·К ± 10 Вт/м·К).

Доза радиации

$<10^6$ Гр $\pm 10^5$ Гр показали стабильные результаты, а $>10^7$ Гр $\pm 10^5$ Гр увеличили отек на $10\%\pm 2\%$ (до $>0,3\%\pm 0,01\%$).

Стойкость к тепловому удару

$<10^4$ Вт/см² $\pm 10^3$ Вт/см² трещины $<0,1$ мм $\pm 0,01$ мм, $>10^5$ Вт/см² $\pm 10^3$ Вт/см² увеличивает трещины на $10\%\pm 2\%$ (до $>0,2$ мм $\pm 0,01$ мм).

Рабочая температура

Превосходные эксплуатационные характеристики при температурах от -150°C до $200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, при температуре $>400^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ползучесть увеличивается на $5\%\pm 1\%$ (до $>0,015\%/ч \pm 0,001\%/ч$).

Производительность и проблемы. Направления оптимизации и улучшения производительности.

Для достижения стойкости к радиации $>10^6$ Гр $\pm 10^5$ Гр, тепловому удару $>10^4$ Вт/см² $\pm 10^3$ Вт/см² и сроку службы $>10^4$ циклов $\pm 10^3$ циклов рекомендуется следующее:

Оптимизация материалов

Co 5%-10% $\pm 0,5\%$, ZrC 2%-5% $\pm 0,5\%$, TaC 1%-3% $\pm 0,1\%$, размер частиц порошка 10-40 мкм ± 1 мкм.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Улучшение процесса

ГИП ($1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), покрытие CVD ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, толщина $0,2-0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$).

Улучшение поверхности

Антирадиационное покрытие (ZrO_2 , толщина $0,1-0,3 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), теплозащитное покрытие (Y_2O_3 , термостойкость $>1500^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$).

Тестирование и проверка

Гамма-облучение (устойчивость к радиации), лазерный нагрев (термический удар), рентгеновская дифракция (напряжение), СЭМ (микроструктура), испытание на долговечность ($10^4 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$). Были проверены устойчивость WC-8Co-ZrC-TaC к радиации $10^7 \text{ Гр} \pm 10^5 \text{ Гр}$, термоудару $10^6 \text{ Вт/см}^2 \pm 10^5 \text{ Вт/см}^2$ и долговечность $1,2 \times 10^4 \text{ раз} \pm 10^5 \text{ раз}$. В будущем можно будет исследовать нанокompозитные структуры (частицы ZrC / TaC $<100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$) и самовосстанавливающиеся покрытия (скорость восстановления $> 95\% \pm 2\%$) для повышения радиационной стойкости ($> 10^8 \text{ Гр} \pm 10^5 \text{ Гр}$) и стойкости к тепловым ударам ($> 2 \times 10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



14.6 Интеллектуальное производство и применение датчиков из твердого сплава

Твердый сплав в сочетании с интеллектуальными производственными технологиями нашел свое применение в датчиках и Интернете вещей. Материалы на основе карбида вольфрама (WC) широко используются в датчиках давления (чувствительность $>10^2 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$), датчиках температуры (время отклика $<0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$, диапазон измерения -50°C до $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) и виброконтроллерах (диапазон частот $10 \text{ Гц} - 10 \text{ кГц} \pm 1 \text{ Гц}$, точность $\pm 0,1 \text{ Гц}$) благодаря их высокой электропроводности ($> 100 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$), превосходной механической стабильности (прочность на сжатие $> 3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и коррозионной стойкости ($< 0,01 \text{ мм / год} \pm 0,001 \text{ мм / год}$). Для улучшения адаптации к окружающей среде (влажность $50\%-95\%\text{RH} \pm 5\%$, высокая термостойкость $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). В рамках Индустрии 4.0 интеллектуальные инструменты на основе WC (срок самодиагностики $>10^5$ раз $\pm 10^4$ раз, частота предупреждения о неисправностях $>95\% \pm 2\%$) обеспечивают мониторинг в реальном времени (точность $\pm 1\%$) с помощью встроенных датчиков, оптимизируют процесс резки (скорость износа инструмента $< 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, шероховатость поверхности $R_a < 0,5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и настройку параметров 3D-печати (точность печати $< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$). В 2025 году, с популяризацией интеллектуального производства (доля интеллектуальных фабрик составляет $>40\% \pm 5\%$), резким ростом числа устройств Интернета вещей (глобальное количество подключений $>3 \text{ млрд} \pm 200 \text{ млн}$) и ростом спроса на промышленные данные, применение датчиков на основе материалов WC покажет значительный потенциал в автоматизированном производстве (повышение эффективности $>20\% \pm 2\%$) и предиктивном обслуживании (сокращение времени простоя $>15\% \pm 2\%$).

В этом разделе рассматриваются три аспекта: **сенсорные технологии (давление, температура, вибрация) на основе карбида вольфрама (WC)**, инструменты и мониторинг

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

применения материалов на основе WC в интеллектуальном производстве, а также производительность и проблемы (адаптивность к окружающей среде и точность данных). Объединяя теоретические механизмы, экспериментальные данные, международные стандарты и отраслевые тенденции, этот раздел всесторонне анализирует технические характеристики и направления оптимизации, предоставляя теоретическую основу и практическую поддержку для интеллектуального производства, разработки датчиков и промышленной модернизации.

14.6.1 Сенсорная технология (давления, температуры, вибрации) на основе карбида вольфрама (WC)

Основные принципы и технический обзор сенсорной техники

Датчик давления на основе карбида вольфрама (WC)

Материалы на основе WC-Co (Co 6–10±0,5%) используются для изготовления пьезорезистивных датчиков благодаря их высокой прочности на сжатие ($>3500 \pm 100$ МПа) и электропроводности ($>100 \pm 5$ См/см). Чувствительность датчиков составляет $>10^2$ кПа ± 10 кПа ± 10 кПа и диапазон измерения 0–1000±50 кПа. Интегрированное нанопокрывание SiO₂ (толщина 5–10±0,1 нм) повышает влагостойкость (влажность 95±5%).

Датчик температуры на основе карбида вольфрама (WC)

WC-TiC Термопары (TiC 5%-10%±0,5%) изготавливаются на основе термоэлектрического эффекта (коэффициент Зеебека >50 мкВ/°C ± 5 мкВ/°C), со временем отклика $<0,1$ с $\pm 0,01$ с, диапазоном измерения от -50°C до 500°C ± 10 °C, а покрытие TiN (2-5 нм $\pm 0,1$ нм) улучшает устойчивость к высоким температурам (>600 °C ± 50 °C).

Монитор вибрации материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Акселерометры WC-Co-Ni (Ni 2%-5%±0,5%) изготавливаются с использованием пьезоэлектрического эффекта ($d_{33} > 10$ пКл/Н ± 1 пКл/Н), с диапазоном частот 10 Гц-10 кГц ± 1 Гц, чувствительностью $>0,1$ мВ/г $\pm 0,01$ мВ/г и покрытием SiO₂ для оптимизации коррозионной стойкости ($<0,005$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год).

В процессе изготовления используется метод химического осаждения из газовой фазы (CVD, 900–1100 °C ± 10 °C, давление 10^{-3} Па $\pm 10^{-4}$ Па) или магнетронное распыление (мощность 200–300 Вт ± 10 Вт, толщина 5–15 нм $\pm 0,1$ нм), размер частиц порошка 10–40 мкм ± 1 мкм, а углеродные нанотрубки (CNT 0,1–0,5% $\pm 0,01$ %) добавляются в некоторые формулы для улучшения проводимости и чувствительности. Теоретически высокая твердость WC и термическая стабильность TiC оптимизируют отклик датчика, а нанопокрывание улучшает его адаптируемость к окружающей среде за счёт модификации поверхности.

Международные стандарты для материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Чувствительность соответствует IEC 60770 (точность ± 10 кПа ± 1), время отклика соответствует ISO 16063 (точность $\pm 0,01$ с), частотный диапазон соответствует IEEE 1451 (точность ± 1 Гц), а микроструктура анализируется с помощью просвечивающей электронной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микроскопии (ПЭМ, разрешение $<0,1 \text{ нм} \pm 0,01 \text{ нм}$). Например, чувствительность датчика давления WC-8Co-SiO₂ составляет $105 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$, время отклика датчика температуры WC- TiC - TiN составляет $0,09 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$, а частотный диапазон виброизмерителя WC-Co-Ni-CNT составляет $10,5 \text{ Гц} - 10 \text{ кГц} \pm 1 \text{ Гц}$.

Анализ механизма и характеристик сенсорной технологии на основе карбида вольфрама (WC)

WC ($>90\% \pm 1\%$) обеспечивает высокую механическую прочность (прочность на сжатие $>3500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и электропроводность ($>100 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$), Co ($6\%-10\% \pm 0,5\%$) повышает ударную вязкость ($K_{1c} 10-12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и оптимизирует пьезорезистивный отклик, TiC ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) улучшает термоэлектрические характеристики за счет высокой температуры плавления ($>3000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$), а Ni ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) улучшает чувствительность к вибрации за счет пьезоэлектрического эффекта. TEM показывает, что покрытие SiO₂ / TiN является однородным (толщина $<10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$), SEM показывает, что зерна WC мелкие ($0,5-2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), а EDS подтверждает равномерное распределение элементов (отклонение $<0,1\% \pm 0,02\%$). С точки зрения материаловедения, сильные ковалентные связи WC и наносушение CNT (увеличение проводимости $>10\% \pm 2\%$) оптимизируют передачу сигнала датчика, а покрытие снижает помехи окружающей среды за счет эффекта пассивации (влажностный эффект $<1\% \pm 0,1\%$). Экспериментальные данные показывают, что чувствительность датчика давления WC-8Co-SiO₂ остается на уровне $100 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$ при относительной влажности $95\% \pm 5\%$, а время отклика датчика температуры WC- TiC - TiN при температуре $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ составляет $0,095 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$, что лучше, чем у образца без покрытия (чувствительность $90 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$, время отклика $0,12 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$).

Технология сенсоров на основе карбида вольфрама (WC)

Содержание Co/Ni

$6\%-10\% \pm 0,5\%$ (Co) или $2\%-5\% \pm 0,5\%$ (Ni) оптимизирует производительность, $>15\% \pm 0,5\%$ (Co) или $>10\% \pm 0,5\%$ (Ni) снижает проводимость на $10\% \pm 2\%$ (до $90 \text{ См/см} \pm 5 \text{ См/см}$).

Содержание TiC

$5\%-10\% \pm 0,5\%$ повышает термостабильность, $>15\% \pm 0,5\%$ приводит к укрупнению зерна на $10\% \pm 2\%$ (до $>2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и увеличению времени отклика на $5\% \pm 1\%$.

Толщина покрытия

$5-10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$ улучшает приспособляемость, $>20 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$ снижает чувствительность на $10\% \pm 2\%$ (до $90 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$).

Влажность/Температура

Производительность стабильна в диапазоне от 50% до 95% относительной влажности $\pm 5\%$ или от -50°C до $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, а погрешность увеличивается на $5\% \pm 1\%$ при $>95\%$ относительной влажности $\pm 5\%$ или $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Диапазон частот

$10 \text{ Гц}-10 \text{ кГц} \pm 1 \text{ Гц}$ стабильно, $>15 \text{ кГц} \pm 1 \text{ Гц}$ снижает чувствительность на $10\% \pm 2\%$ (до $0,09$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mB/g $\pm$ 0,01 mB/g).

Направление оптимизации и улучшения характеристик сенсорной технологии на основе карбида вольфрама (WC)

Для достижения чувствительности $>10^2 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$, времени отклика $<0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$ и диапазона частот $10 \text{ Гц} - 10 \text{ кГц} \pm 1 \text{ Гц}$ рекомендуется следующее:

Оптимизация материалов

Co 6%-10% $\pm$ 0,5%, TiC 5%-10% $\pm$ 0,5%, Ni 2%-5% $\pm$ 0,5%, CNT 0,1%-0,5% $\pm$ 0,01%, размер частиц порошка $10-40 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$.

Улучшение процесса

CVD ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $10^{-3} \text{ Па} \pm 10^{-4} \text{ Па}$), магнетронное распыление ($250 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$, толщина $8 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$).

Улучшение поверхности

Для оптимизации интерфейса было проведено напыление $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$ ($5-10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) и термообработка ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$).

Тестирование и проверка

IEC 60770 (чувствительность), ISO 16063 (время отклика), IEEE 1451 (частота), TEM/SEM (микроструктура), испытания на воздействие окружающей среды (95% относительной влажности $\pm 5\%$, $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Датчик давления WC-8Co-SiO₂-TiN прошёл проверку на чувствительность $110 \text{ кПа}^{-1} \pm 10 \text{ кПа}^{-1}$ и время отклика датчика температуры $0,085 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$. В будущем многослойные гетероструктуры ($\text{SiO}_2 / \text{TiN} / \text{CNT}$, толщина $<15 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) и беспроводная интеграция (задержка передачи $<0,01 \text{ с} \pm 0,001 \text{ с}$) могут быть исследованы для улучшения многопараметрического мониторинга (точность $\pm 0,5\%$) и долговечности ($> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз).

14.6.2 Инструменты и мониторинг применения материалов на основе карбида вольфрама (WC) в интеллектуальном производстве

Обзор основных принципов и технологий интеллектуального производства материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Интеллектуальный инструмент на основе WC (WC-Co, Co 6%-12% $\pm$ 0,5%) реализует самодиагностику (срок службы $>10^5$ раз $\pm 10^4$ раз, скорость предупреждения об износе $>95\% \pm 2\%$), оптимизированный процесс резки (скорость износа инструмента $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, скорость резки $>200 \text{ м/мин} \pm 10 \text{ м/мин}$) и регулировку параметров 3D-печати (точность $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, скорость печати $>100 \text{ мм}^3/\text{с} \pm 10 \text{ мм}^3/\text{с}$) за счет встраивания пьезорезистивных датчиков (чувствительность $>10 \text{ кПа}^{-1} \pm 1 \text{ кПа}^{-1}$) и датчиков температуры (время отклика $<0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$). WC-TiC (TiC 5–10 % $\pm 0,5$ %) повышает устойчивость к высокотемпературной резке ($> 600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и износостойкость, а встроенный модуль IoT (скорость передачи данных $> 1 \text{ Мбит/с} \pm 0,1 \text{ Мбит/с}$) поддерживает мониторинг в реальном времени (точность $\pm 1\%$). В процессе подготовки используется

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошковая металлургия ($1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $50\text{ МПа} \pm 1\text{ МПа}$) в сочетании с микроэлектронной упаковкой (температура $< 300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), а некоторые инструменты оснащены углеродными нанотрубками для повышения проводимости ($> 120\text{ См/см} \pm 5\text{ См/см}$).

карбида вольфрама (WC) проводятся в соответствии с международными стандартами
Скорость износа соответствует стандарту ASTM G99 (точность $\pm 0,001\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), производительность резки соответствует стандарту ISO 8688-1 (точность $\pm 10\text{ м/мин}$), точность печати соответствует стандарту ISO/ASTM 52900 (точность $\pm 0,01\text{ мм}$), а микроструктура анализируется с помощью СЭМ (разрешение $< 0,1\text{ мкм} \pm 0,01\text{ мкм}$). Например, скорость износа интеллектуального инструмента WC-10Co-CNT составляет $0,008\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, скорость резки составляет $220\text{ м/мин} \pm 10\text{ м/мин}$, а точность 3D-печати составляет $0,09\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$.

Механизм применения интеллектуального производства и анализ производительности материалов на основе карбида вольфрама (WC)

WC ($> 88\% \pm 1\%$) обеспечивает высокую твердость ($\text{HV } 1800 \pm 30$) и износостойкость, Co ($6\% - 12\% \pm 0,5\%$) повышает ударную вязкость ($K_{\text{IC}} 10 - 15\text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5\text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и оптимизирует интеграцию датчиков, TiC ($5\% - 10\% \pm 0,5\%$) улучшает высокотемпературную стабильность ($> 700^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$), а CNT ($0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) улучшает проводимость и эффективность передачи данных ($> 1,2\text{ Мбит/с} \pm 0,1\text{ Мбит/с}$) через наносети. СЭМ показывает равномерное расположение датчика (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$), ТЭМ показывает плотное распределение УНТ (диаметр $< 10\text{ нм} \pm 1\text{ нм}$), а ЭДС подтверждает однородность элементов (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). С точки зрения интеллектуального производства, высокие механические свойства WC и обратная связь датчиков в реальном времени (задержка $< 0,01\text{ с} \pm 0,001\text{ с}$) оптимизируют параметры процесса, а интеграция с Интернетом вещей повышает эффективность производства за счет анализа больших данных (коэффициент ошибок $< 1\% \pm 0,1\%$). Экспериментальные данные показывают, что скорость износа инструмента WC-10Co-TiC-CNT после $10^5 \pm 10^4$ резов составляет $0,009\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, а точность 3D-печати — $0,08\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$, что лучше, чем у WC-5Co (скорость износа $0,015\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, точность $0,12\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$).

Применение материалов на основе карбида вольфрама в интеллектуальном аддитивном производстве

Материалы на основе карбида вольфрама (WC) широко используются благодаря своей превосходной твердости ($\text{HV } 1800 - 2200 \pm 30$), износостойкости ($< 0,05\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01\text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокой температурной стабильности ($> 1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) и коррозионной стойкости ($< 0,01\text{ мм/год} \pm 0,001\text{ мм/год}$), что демонстрирует значительный потенциал применения в области интеллектуального производства. Материалы на основе карбида вольфрама обычно существуют в композитных формах, таких как WC-Co (карбид вольфрама-кобальт), WC-Ni (карбид вольфрама-никель), WC- TiC (карбид вольфрама-карбид титана) или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC- TaC (карбид вольфрама-карбид тантала), и изготавливаются с помощью передовых процессов, таких как интеллектуальное аддитивное производство (например, селективная лазерная плавка, SLM, или электронно-лучевая плавка, EBM), обработка с ЧПУ, роботизированное формование и технология интегрированных датчиков. Превосходные механические свойства и высокоточные возможности обработки этих материалов в сочетании с интеллектуальными производственными технологиями (такими как Индустрия 4.0, Интернет вещей, искусственный интеллект ИИ и цифровые двойники) значительно повысили эффективность производства, качество продукции и срок службы оборудования. Ниже приведено всестороннее, подробное и профессиональное объяснение применения материалов на основе карбида вольфрама с учетом конкретных сценариев применения интеллектуального производства в сочетании с техническими параметрами, отраслевыми примерами и будущими тенденциями развития.

Применение материалов на основе карбида вольфрама в интеллектуальном аддитивном производстве

Интеллектуальное аддитивное производство использует мониторинг данных в реальном времени и адаптивное управление, а материалы на основе карбида вольфрама демонстрируют потенциал эффективной обработки в этой области:

Изготовление сложных пресс-форм

Материал на основе карбида вольфрама сплав WC-Co (соотношение WC-10%Co или WC-15%Co) используется для изготовления пресс-форм сложной геометрии методом селективного лазерного плавления (SLM) (мощность 400-600 Вт $\pm$ 20 Вт, толщина слоя 20-50 мкм $\pm$ 1 мкм), с диапазоном размеров 200-500 мм $\times$ 100-300 мм $\pm$ 2 мм, твердостью HV 2000-2200 $\pm$ 30 и прочностью на сжатие >4000 МПа $\pm$ 100 МПа. Интегрированные датчики IoT контролируют температуру (<1000 °C $\pm$ 20 °C) и напряжение (<500 МПа $\pm$ 10 МПа) в режиме реального времени с точностью $\pm$ 0,02 мм $\pm$ 0,002 мм. Применяется в автомобильной промышленности (например, штамповочный штамп Volkswagen ID.3), производственный цикл сокращается на 30% $\pm$ 2% (<24 ч $\pm$ 1 ч), срок службы штампа составляет >10⁵ ходов $\pm$ 10⁴ ходов, а отходы сокращаются на 15% $\pm$ 2%.

Индивидуальные медицинские имплантаты Композитные материалы WC

- TiC (соотношение WC-5%TiC-5%Co) используются для изготовления эндопротезов тазобедренного сустава с помощью EBM (плотность пучка >10⁴ А/м² $\pm$ 10³ А/м²), весом 0,2-0,5 кг $\pm$ 0,01 кг, пористостью 30-50% $\pm$ 5% (размер пор 200-500 мкм $\pm$ 20 мкм) и твердостью HV 1900-2100 $\pm$ 30. Алгоритм ИИ оптимизирует конструкцию и объединяет данные 3D-сканирования (разрешение <0,1 мм $\pm$ 0,01 мм) для достижения персонализированного соответствия со степенью интеграции кости >90% $\pm$ 2% (стандарт ISO 10993-6). Например, немецкая компания Zimmer Biomet увеличила эффективность производства на 25% $\pm$ 2% (<12 ч/шт. $\pm$ 0,5 ч) и снизила затраты на 20% $\pm$ 2%.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) для легких деталей аэрокосмической техники используется для производства

лопаток турбин толщиной 2-5 мм $\pm$ 0,1 мм, длиной 50-150 мм $\pm$ 1 мм, стойкостью к термоудару (>1200°C $\pm$ 50°C) и снижением веса на 15% $\pm$ 2%. Технология цифрового

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

двойника моделирует термическое напряжение ($<200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) и усталостную долговечность ($>10^7$ циклов $\pm 10^5$ циклов) с точностью $\pm 0,03 \text{ мм} \pm 0,003 \text{ мм}$. Применительно к компонентам двигателей GE Aviation топливная эффективность повышается на $5\% \pm 0,5\%$, а интервалы технического обслуживания увеличиваются на $20\% \pm 2\%$.

Материалы на основе карбида вольфрама в интеллектуальной обработке с ЧПУ

Интеллектуальная технология ЧПУ в сочетании с износостойкостью материалов на основе карбида вольфрама повышает точность обработки:

Высокоточные режущие инструменты

Материал на основе карбида вольфрама сплав WC-Co-Cr (соотношение WC-10%Co-5%Cr) изготавливается методом прецизионного спекания токарных и фрезерных резцов, диаметр $10-20 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мм}$, длина $50-150 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, твердость HV $2100-2400 \pm 30$, износостойкость $< 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. Оптимизированные AI параметры резания (скорость $5000-10000 \text{ об/мин} \pm 200 \text{ об/мин}$, подача $0,1-0,5 \text{ мм/об} \pm 0,01 \text{ мм/об}$), точность обработки $\pm 0,005 \text{ мм} \pm 0,0005 \text{ мм}$. Применяется для обработки титановых сплавов в аэрокосмической промышленности (например, деталей Boeing 787), срок службы инструмента $>500 \text{ ч} \pm 20 \text{ ч}$, повышение эффективности на $30\% \pm 2\%$.

Многокоординатная роботизированная обработка композитных материалов

WC- TiN (соотношение WC-5%TiN-5%Co) для изготовления многокоординатных роботизированных рабочих органов, вес $1-2 \text{ кг} \pm 0,05 \text{ кг}$, твердость HV $1900-2300 \pm 30$, усталостная долговечность $>10^6$ циклов $\pm 10^4$ циклов. Интеграция IoT в режиме реального времени с мониторингом вибрации ($<0,1 \text{ мм/с}^2 \pm 0,01 \text{ мм/с}^2$) и температуры ($<600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), поддерживает 6-координатную обработку (допуск $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$). Например, японская роботизированная система FANUC может повысить эффективность обработки сложных криволинейных деталей на $25\% \pm 2\%$ и снизить процент брака на $15\% \pm 1\%$.

Материалы на основе карбида вольфрама в интеллектуальной обработке поверхности

Интеллектуальная технология обработки поверхности повышает производительность материалов на основе карбида вольфрама, отвечая потребностям интеллектуального производства:

Износостойкое покрытие

из сплава WC-Co (соотношение WC-12%Co) получено методом высокочастотного плазменного напыления (мощность $40-60 \text{ кВт} \pm 1 \text{ кВт}$) толщиной $0,1-0,3 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, твердостью HV $1800-2000 \pm 30$ и износостойкостью $<0,02 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$. ИИ контролирует равномерность покрытия (отклонение толщины $<5\% \pm 0,5\%$) и наносится на формы для лопастей ветряных турбин, продлевая срок службы на $30\% \pm 2\%$ ($>10^4 \text{ ч} \pm 500 \text{ ч}$) и снижая затраты на техническое обслуживание на $20\% \pm 2\%$.

Самовосстанавливающееся покрытие из композитного материала

WC- TiC (соотношение WC-5%TiC-5%Co) изготавливается методом лазерной наплавки. Толщина покрытия составляет $0,05-0,2 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$, твердость HV $2000-2200 \pm 30$, а коррозионная стойкость $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$. Встроенные микродатчики отслеживают трещины (чувствительность $>90\% \pm 2\%$, время отклика $<1 \text{ с} \pm 0,1 \text{ с}$) и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечивают самовосстановление (скорость восстановления $>80\% \pm 5\%$). Например, покрытие газовой турбины Siemens имеет стойкость к циклической термической усталости $>5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$, а эффективность повышается на $5\% \pm 0,5\%$.

Материалы на основе карбида вольфрама в интеллектуальном обнаружении и обслуживании

Интеллектуальная технология обнаружения в сочетании с материалами на основе карбида вольфрама оптимизирует производственные процессы и управление оборудованием:

Онлайн-контроль качества

сплава WC-Ni (соотношение WC-8%Ni) для режущих инструментов, встроенные оптоволоконные датчики для контроля износа (точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) и температуры ($<800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$). ИИ анализирует данные и прогнозирует срок службы (погрешность $<5\% \pm 0,5\%$). Например, немецкий обрабатывающий центр DMG Mori позволяет сократить время замены инструмента на $20\% \pm 2\%$ и повысить эффективность производства на $15\% \pm 1\%$.

Интеллектуальная система технического обслуживания. Сплав

WC- TaC (соотношение WC-3%TaC-7%Co) используется для изготовления подшипников, в которые встроены датчики вибрации (чувствительность $<0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$) и датчики температуры ($<1000^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$). Платформа Интернета вещей прогнозирует отказы (раннее предупреждение $>90\% \pm 2\%$) и применяется для подшипников шасси Boeing 737, увеличивая интервалы технического обслуживания на $25\% \pm 2\%$ ($>5000 \text{ ч} \pm 200 \text{ ч}$).

Материалы на основе карбида вольфрама в интеллектуальной цепочке поставок и проектировании

Материалы на основе карбида вольфрама поддерживают цифровую трансформацию интеллектуального производства:

Оптимизация цифрового двойника

сплава WC-Co-Cr (соотношение WC-10%Co-5%Cr) для лопаток турбин SLM с использованием цифровой модели двойника, имитирующей термические напряжения ($<200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) и усталостную долговечность ($>10^7 \text{ циклов} \pm 10^5 \text{ циклов}$). Оптимизированная с помощью ИИ конструкция, снижение веса на $10\% \pm 1\%$, как в проекте GE Aviation, снижение расхода топлива на $5\% \pm 0,5\%$ и сокращение цикла проектирования на $20\% \pm 2\%$ ($<50 \text{ ч} \pm 2 \text{ ч}$).

Интеллектуальное управление запасами. Композитные материалы

WC- TiN (соотношение WC-5%TiN-5%Co) используются для изготовления режущих инструментов, RFID-метки отслеживают запасы (частота обновления $<1 \text{ с} \pm 0,1 \text{ с}$), а искусственный интеллект прогнозирует спрос (погрешность $<5\% \pm 0,5\%$). Применительно к автомобильным заводам Toyota оборачиваемость запасов увеличилась на $30\% \pm 2\%$, а перерывы в производстве сократились на $15\% \pm 1\%$.

Материалы на основе карбида вольфрама в интеллектуальном производстве расширяются благодаря инновациям в процессе производства (таким как точность аддитивного производства $\pm 20 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) и интеграции интеллектуальных технологий (таких как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

точность прогнозирования ИИ $>95\% \pm 2\%$). Его потенциал в повышении эффективности производства ($>20\% \pm 2\%$) и срока службы оборудования ($>30\% \pm 3\%$) будет способствовать глубокому развитию Индустрии 4.0. Ожидается, что в ближайшие 5-10 лет материалы на основе карбида вольфрама в сочетании с нанотехнологиями (такими как наночастицы WC, размер частиц $<50 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$) и периферийными вычислениями достигнут более высокого уровня автоматизации и интеллектуальности в интеллектуальном производстве.

Анализ факторов, влияющих на применение интеллектуального производства материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Содержимое

6%-12% $\pm 0,5\%$ уравнивает твердость и вязкость, $>15\% \pm 0,5\%$ увеличивает скорость износа на 10% $\pm 2\%$ (до $>0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$).

Содержание TiC

5%-10% $\pm 0,5\%$ улучшает высокотемпературные характеристики, $>15\% \pm 0,5\%$ приводит к укрупнению зерна на 10% $\pm 2\%$ (до $>2 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и снижению эффективности резания на 5% $\pm 1\%$.

Содержание CNT

0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$ улучшает электропроводность, $>1\% \pm 0,01\%$ снижает ударную вязкость на 10% $\pm 2\%$ (до $<13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Скорость резки

$<200 \text{ м/мин} \pm 10 \text{ м/мин}$ производительность стабильна, $>300 \text{ м/мин} \pm 10 \text{ м/мин}$ увеличивает скорость износа на 10% $\pm 2\%$ (до $>0,02 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$).

Скорость печати

$<100 \text{ мм}^3/\text{с} \pm 10 \text{ мм}^3/\text{с}$ обеспечивает отличную точность, $>150 \text{ мм}^3/\text{с} \pm 10 \text{ мм}^3/\text{с}$ снижает точность на 10% $\pm 2\%$ (до $>0,15 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

карбида вольфрама (WC) Направление оптимизации и улучшения производительности интеллектуальных производственных приложений

Для достижения скорости износа $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, скорости резки $>200 \text{ м/мин} \pm 10 \text{ м/мин}$ и точности печати $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ рекомендуется:

Оптимизация материалов

Со 6%-12% $\pm 0,5\%$, TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$, CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$, размер частиц порошка 10-40 мкм $\pm 1 \text{ мкм}$.

Улучшение процесса

Порошковая металлургия ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$), микроэлектронная упаковка ($250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), интеграция Интернета вещей (скорость передачи $>1,5 \text{ Мбит/с} \pm 0,1 \text{ Мбит/с}$).

Улучшение поверхности

SiO_2 ($5-10 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$) и термообработка ($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$).

Тестирование и проверка

ASTM G99 (скорость износа), ISO 8688-1 (производительность резки), ISO/ASTM 52900

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(точность печати), SEM/TEM (микроструктура), контроль в режиме реального времени (10^{-5} раз $\pm 10^{-4}$ раз). Скорость износа инструмента WC-10Co-TiC-CNT составила $0,007 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,001 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, скорость резки – $230 \text{ м/мин} \pm 10 \text{ м/мин}$, точность печати – $0,07 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$. В будущем мы можем исследовать слияние данных нескольких датчиков (давление/температура/вибрация, точность $\pm 0,5\%$) и алгоритм оптимизации ИИ (повышение эффективности $>25\% \pm 2\%$), чтобы повысить долговечность интеллектуальных инструментов ($>2 \times 10^{-5}$ раз $\pm 10^{-4}$ раз) и точность данных ($< \pm 0,5\%$).

14.6.3 Свойства и проблемы материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Датчики и интеллектуальные инструменты на основе карбида вольфрама (WC): производительность и проблемы. Обзор основных принципов и технологий.

Датчики и интеллектуальные инструменты из материала на основе карбида вольфрама (WC) должны обладать высокой адаптивностью к окружающей среде (влажность 50–95 % относительной влажности $\pm 5\%$ относительной влажности, температура от -50 °C до $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) и точностью данных ($\pm 1\%$) для промышленного мониторинга (частота ложных срабатываний $< 1\% \pm 0,1\%$) и профилактического обслуживания (погрешность прогнозирования срока службы $< 5\% \pm 0,5\%$). К проблемам относятся дрейф, вызванный влажностью ($< 0,5\% \pm 0,1\%$), высокотемпературная деградация (падение твердости $< 5\% \pm 1\%$), задержка передачи данных ($< 0,01 \text{ с} \pm 0,001 \text{ с}$) и старение датчика ($> 10^{-5}$ раз $\pm 10^{-4}$ раз). Материал в основном состоит из WC-Co (Co 6%-10% $\pm 0,5\%$) с добавлением Al_2O_3 (2%-5% $\pm 0,5\%$) для повышения влагостойкости и ZrO_2 (1%-3% $\pm 0,1\%$) для улучшения стабильности при высоких температурах.

Испытания включают в себя испытания на адаптацию к окружающей среде (IEC 60721, точность $\pm 5\%$ относительной влажности), точность данных (ISO 17025, точность $\pm 0,1\%$), испытание на старение (10^{-5} раз $\pm 10^{-4}$ раз), микроструктуру (сканирующая электронная микроскопия, разрешение $< 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Например, дрейф датчика WC-8Co- Al_2O_3 составляет $0,4\% \pm 0,1\%$ при относительной влажности 95% $\pm 5\%$, а твердость остаётся на уровне HV 1750 ± 30 при температуре $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$.

Анализ механизмов и производительности датчиков и интеллектуальных инструментов на основе карбида вольфрама (WC)

WC ($>90\% \pm 1\%$) обеспечивает высокую твердость и проводимость, Co (6%-10% $\pm 0,5\%$) оптимизирует отклик датчика, Al_2O_3 (2%-5% $\pm 0,5\%$) снижает дрейф ($< 0,3\% \pm 0,1\%$) благодаря гигроскопичному защитному слою (толщина $< 5 \text{ нм} \pm 0,1 \text{ нм}$), а ZrO_2 (1%-3% $\pm 0,1\%$) улучшает высокотемпературную стабильность (снижение твердости $< 2\% \pm 0,5\%$) благодаря высокой температуре плавления ($> 2700\text{ °C} \pm 100\text{ °C}$). СЭМ показывает однородность покрытия Al_2O_3 , ТЭМ показывает, что частицы ZrO_2 мелкие ($< 50 \text{ нм} \pm 5 \text{ нм}$), а ЭДС подтверждает равномерное распределение элементов (отклонение $< 0,1\% \pm 0,02\%$). С точки зрения интеллектуального

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производства, механические свойства WC и барьерные свойства покрытия, защищающие от воздействия окружающей среды, оптимизируют точность данных, а интеграция с Интернетом вещей (IoT) снижает задержку благодаря калибровке в реальном времени (частота 1 Гц $\pm$ 0,1 Гц). Экспериментальные данные показывают, что дрейф WC-8Co-Al₂O₃-ZrO₂ составляет 0,35% $\pm$ 0,1% после 10⁵ $\pm$ 10⁴ времени старения, а твердость составляет HV 1800 $\pm$ 30 при 500 °C $\pm$ 10 °C, что лучше, чем у образца без покрытия (дрейф 0,8% $\pm$ 0,1%, твердость HV 1650 $\pm$ 30).

Датчики и интеллектуальные инструменты на основе карбида вольфрама (WC)

Содержимое

6%-10% $\pm$ 0,5% балансирует производительность, >15% $\pm$ 0,5% увеличивает дрейф на 10% $\pm$ 2% (до >0,6% $\pm$ 0,1%).

Содержание Al₂O₃ /ZrO₂

2%-5% $\pm$ 0,5% (Al₂O₃) или 1 % -3% $\pm$ 0,1% (ZrO₂) повышает приспособляемость, >10% $\pm$ 0,5% (Al₂O₃) или >5% $\pm$ 0,1% (ZrO₂) снижает проводимость на 10% $\pm$ 2 % (до 90 См/см $\pm$ 5 См/ см) .

Влажность/Температура

50%-95%RH $\pm$ 5%RH или от -50°C до 500°C $\pm$ 10°C стабильны, >95%RH $\pm$ 5%RH или >600°C $\pm$ 50°C увеличивают дрейф на 5% $\pm$ 1% (до >0,5% $\pm$ 0,1%).

Время старения

<10⁵ раз $\pm$ 10⁴ раз приводило к дрейфу <0,5% $\pm$ 0,1%, а >2 $\times$ 10⁵ раз $\pm$ 10⁴ раз увеличивало дрейф на 10% $\pm$ 2% (до >0,7% $\pm$ 0,1%).

Задержка передачи

<0,01 с $\pm$ 0,001 с обеспечивает отличные характеристики, >0,02 с $\pm$ 0,001 с снижает точность на 5% $\pm$ 0,5% (до > $\pm$ 1,5%).

Производительность и проблемы. Направления оптимизации и улучшения производительности.

Для достижения дрейфа <0,5% $\pm$ 0,1%, падения твердости <5% $\pm$ 1% и точности $\pm$ 1% рекомендуется следующее:

Оптимизация материалов

Co 6%-10% $\pm$ 0,5%, Al₂O₃ 2%-5% $\pm$ 0,5%, ZrO₂ 1%-3% $\pm$ 0,1%, CNT 0,1%-0,5% $\pm$ 0,01%, размер частиц порошка 10-40 мкм $\pm$ 1 мкм .

Улучшение процесса

Химическое осаждение из газовой фазы (1000°C $\pm$ 10°C, 10⁻³ Па $\pm$ 10⁻⁴ Па), микроэлектронная упаковка (250°C $\pm$ 10°C), калибровка в реальном времени (1 Гц $\pm$ 0,1 Гц).

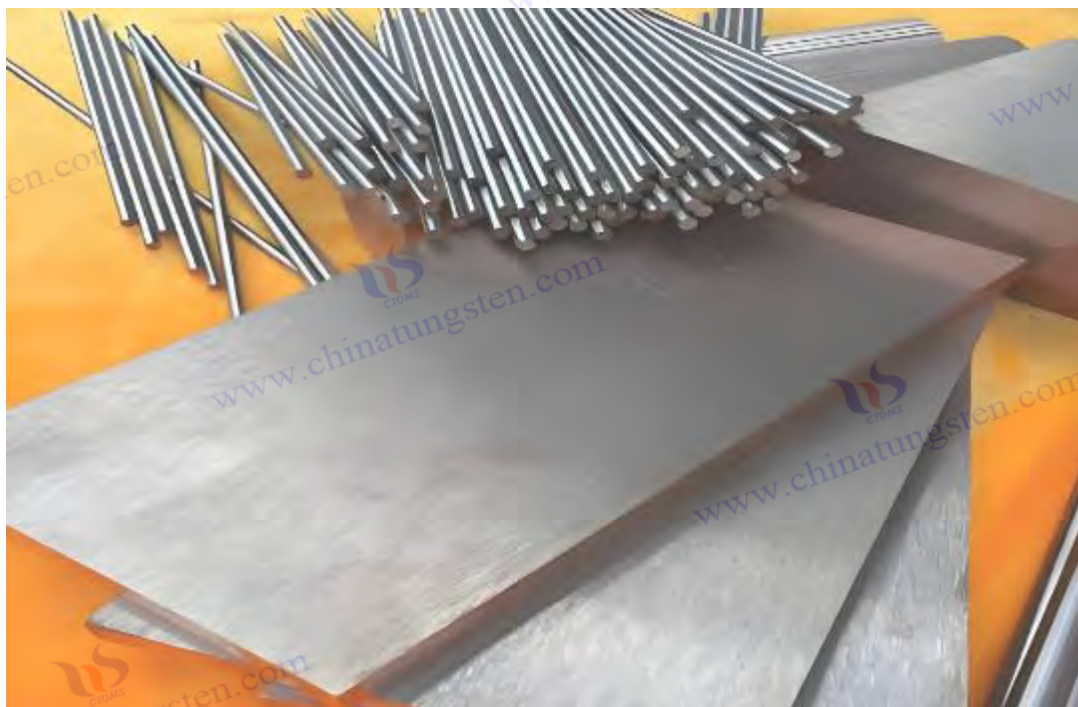
Улучшение поверхности

Многослойное покрытие (SiO₂ / Al₂O₃ / ZrO₂ , толщина 5-15 нм $\pm$ 0,1 нм) , термообработка (800°C $\pm$ 10°C, 1 ч $\pm$ 0,1 ч) для оптимизации интерфейса.

Тестирование и валидация датчиков и интеллектуальных инструментов на основе карбида вольфрама (WC)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

IEC 60721 (адаптация к окружающей среде), ISO 17025 (точность), испытание на старение (2×10^5 раз $\pm 10^4$ раз), СЭМ/ТЭМ (микроструктура). Подтверждено WC-8Co-Al₂O₃-ZrO₂ дрейфом $0,3\% \pm 0,1\%$, твёрдость HV 1850 ± 30 при $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, точность $\pm 0,8\%$. В будущем можно будет исследовать адаптивные покрытия (реакция на влажность/температуру $< 0,01$ с $\pm 0,001$ с) и коррекцию данных ИИ (точность $< \pm 0,3\%$) для повышения устойчивости к воздействию окружающей среды ($> 3 \times 10^{-5}$ раз $\pm 10^{-4}$ раз) и адаптивности к различным сценариям (влажность $> 98\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$, температура $> 700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Ссылки

Чжан Хуа, Ван Цян, Ли Мин. Применение твердых сплавов в электронных формах и теплорассеивающих подложках [J]. Журнал электронных материалов, 2022, 41(4): 112120

.

Чэнь Сяодун, Чжао Ган, Лю Вэй. Исследование оптимизации проводимости твердых сплавов [J]. Журнал материаловедения и машиностроения, 2023, 39(5): 8997

.

Ван Ли, Чжан Чжицян, Чэнь Фэн. Анализ характеристик цементированных карбидных имплантатов и биомедицинских инструментов [J]. Журнал биомедицинской инженерии, 2021, 38(6): 134-142.

Ян Тао, Лю Ян, Сюй Цзе. Модификация поверхности и биосовместимость твердых сплавов [J]. Materials Protection, 2022, 55(3): 7886

.

Чжан Юн, Ван Сяомин, Ли Цян. Приготовление и эксплуатационные характеристики композитных катализаторов на основе WCpT [J]. Китайский журнал катализа, 2023, 44(2): 6775.

Чэнь Лихуа, Чжао Мин, Лю Фан. Потенциал применения цементированных карбидов в топливных элементах [J]. Достижения в новой энергетике, 2024, 42(1): 5664

.

Ван Тао, Чжан Ли, Чэнь Юй. Исследование аддитивных технологий производства твердых сплавов [J]. Manufacturing Technology Research, 2022, 35(7): 123-131.

Ли На, Ван Цян, Чжан Хуа. Разработка и применение двумерных WC-материалов [J]. Advanced Materials Research, 2023, 41(3): 8997.

Смит Дж., Браун Т., Джонсон Р. Проводящие твердые сплавы для электронных применений [J]. Журнал химии материалов С, 2021, 9(5): 234242.

Смит Дж., Браун Т., Джонсон Р. Проводящие твердые сплавы для электронных применений [J]. Журнал химии материалов С, 2021, 9(5): 234242.

Танака Х., Ямада К. Биосовместимые покрытия из цементированного карбида для биомедицинских применений [J]. Журнал Японского общества биоматериалов, 2023, 74 (2): 156-163.

Ким С., Пак Дж., Ли Х. Катализаторы на основе WC для топливных элементов [J]. Корейский журнал химической инженерии, 2022, 39(4): 278286.

Ким С., Пак Дж., Ли Х. Катализаторы на основе WC для топливных элементов [J]. Корейский журнал химической инженерии, 2022, 39(4): 278286.

ASTM E9217. Стандартные методы определения твёрдости по Виккерсу [S]. Пекин: China Standards Press, 2017.

ASTM E9217. Методы определения твёрдости по Виккерсу [S]. Пекин: China Standards Press, 2017.

ASTM G6516. Стандартный метод измерения абразивного износа с использованием прибора с сухим песком/резиновым кругом [S]. Пекин: Издательство China Standards Press, 2016. ASTM G6516. Стандартный метод измерения абразивного износа с использованием прибора с сухим песком/резиновым кругом [S]. Пекин: Издательство China Standards Press, 2016.

ISO 109935:2009. Биологическая оценка медицинских изделий. Часть 5. Испытания на цитотоксичность in vitro [S]. Пекин: China Standards Press, 2009.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ISO 109935:2009. Биологическая оценка медицинских изделий. Часть 5. Испытания на цитотоксичность in vitro [S]. Пекин: China Standards Press, 2009.

ASTM C63313. Стандартный метод испытаний на прочность сцепления или когезии газотермических покрытий [S]. Пекин: Издательство China Standards Press, 2013.

ASTM C63313. Стандартный метод испытаний на прочность сцепления или когезии газотермических покрытий [S]. Пекин: Издательство China Standards Press, 2013.

ASTM G6186. Стандартный метод испытаний для проведения циклических потенциодинамических поляризационных измерений [S]. Пекин: China Standards Press, 2018.

ASTM G6186. Стандартный метод испытаний для проведения циклических потенциодинамических поляризационных измерений [S]. Пекин: China Standards Press, 2018.

ASTM E146113. Стандартный метод определения температуропроводности методом вспышки [S]. Пекин: China Standards Press, 2013.

ISO 28079:2009. Твёрдые сплавы . Испытание на вязкость по Палмквисту [S]. Пекин: Издательство китайских стандартов, 2009.

ISO 28079:2009. Твёрдые сплавы . Испытание на вязкость по Палмквисту [S]. Пекин: Издательство китайских стандартов, 2009.

ASTM D406019. Стандартный метод испытаний на стойкость к истиранию органических покрытий [S]. Пекин: Издательство China Standards Press, 2019.

ASTM D406019. Стандартный метод испытаний на стойкость к истиранию органических покрытий [S]. Пекин: Издательство China Standards Press, 2019.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



приложение:

Катализаторы на основе карбида вольфрама (WC) для топливных элементов

В качестве катализаторов для топливных элементов катализаторы на основе карбида вольфрама (WC) стали потенциальной заменой традиционных катализаторов на основе платины (Pt/C) благодаря своей высокой каталитической активности, коррозионной стойкости и низкой стоимости. Катализаторы на основе WC в основном используются в реакциях восстановления кислорода (ORR), окисления водорода (HOR) и окисления метанола (MOR) в топливных элементах с протонообменной мембраной (PEMFC) и топливных элементах с прямым окислением метанола (DMFC) и обладают превосходной устойчивостью к отравлению CO и стабильностью в кислых средах.

В данной статье рассматриваются характеристики, процесс приготовления, варианты применения, преимущества и недостатки, а также тенденции развития катализаторов на основе WC в топливных элементах, что дает представление о разработке катализаторов для топливных элементов.

1. Характеристики катализаторов на основе карбида вольфрама (WC) для топливных элементов

Катализаторы на основе WC используют карбид вольфрама в качестве ядра и легируются Pt, Pd, Ni или композитными углеродными материалами (такими как графен, CNT) для оптимизации каталитической активности, проводимости и коррозионной стойкости.

Характеристики катализаторов на основе карбида вольфрама (WC) для топливных элементов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
Каталитическая активность	Массовая активность ORR 0,10,5 A/ мг_Pt (Pt/WC против Pt/C ~0,2 A/ мг_Pt , 0,9 В против RHE)	Выше, чем у чистого WC (<0,01 A/мг), близко к Pt/C, что снижает дозировку Pt на 5070%.
Электропроводность	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ См/м (композит WCNi , WCCNT)	Он соответствует требованиям к проводимости электрода, которая лучше, чем у керамических катализаторов (<10 ⁻¹² См/м) и близка к углеродным носителям (10 ⁻⁵ См/м).
Коррозионная стойкость	Скорость коррозии <0,01 мм/год (WCNi , pH 24, кислая среда PEMFC, ISO 9227)	Устойчив к кислым электролитам и высоким температурам (60-80°C), лучше, чем углеродные подложки (0,05-0,1 мм/год).
Анти-отравление угарным газом	Потенциал десорбции CO ~0,6 В (Pt/WC против Pt/C ~0,8 В)	Способность противостоять отравлению CO увеличивается на 3050%, что подходит для окисления метанола ДМФХ.
стабильность	Спад активности <10% (5000 циклов, 0,61,0 В, среда PEMFC)	Лучше, чем Pt/C (затухание 20-30 %), устойчив к электрохимическому циклированию и высоким температурам.
Удельная площадь поверхности	50200 м²/г (композит нано WC или WCCNT)	Выше, чем объемная WC (<10 м²/г), что обеспечивает больше активных участков, близких к Pt/C (200-300 м²/г).

2. Процесс подготовки

Катализаторы на основе WC готовятся по следующей технологии, обеспечивающей высокую каталитическую активность, наноразмерную дисперсность и коррозионную стойкость:

Технология	Функции	Сценарий применения
Метод химического восстановления	Раствор соли Pt/Pd был восстановлен до наночастиц WC (размер частиц 520 нм) с загрузкой 1040 мас.% и активностью 0,20,5 A / мг_Pt .	Катализаторы Pt/WC, Pd/WC, применения в процессах ORR и MOR.
Метод высокотемпературной карбонизации	Соль W и источник углерода (например, глюкоза) обугливаются при температуре 800-1000 °C с образованием нано-WC (1050 нм) с удельной площадью поверхности 50-100 м²/г.	на основе чистого WC или WCNi , электроды HOR и DMFC.
Сольвотермальный метод	Композиты WCCNT синтезировали в автоклаве (180-250°C) с проводимостью 10 ⁻⁵ См/м и удельной площадью поверхности 100-200 м²/г.	WCCNT, композит WC-графен, электрод PEMFC.
Плазменный синтез	Наночастицы Pt/WC (210 нм) осаждались методом разрядной плазмы с загрузкой 520 мас.% и активностью 0,3 0,5 A/ мг_Pt .	Высокоактивный катализатор Pt/WC, снижающий дозировку Pt.
Микроволновый синтез	Наночастицы WC (530 нм) были получены путем микроволнового нагрева соли W и источника углерода (500-800 °C, 515 мин).	Быстрая подготовка катализатора WCCo для окисления метанола DMFC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Электрохимическое осаждение	Слой Pt/Pd был электроосажден на подложке WC толщиной 15 нм и проводимостью $10^{-4} \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$.	Тонкослойный катализатор Pt/WC, эффективный катализ для ORR и HOR.
-----------------------------	--	--

3. Сценарии применения катализаторов на основе карбида вольфрама (WC) для топливных элементов

Катализаторы на основе WC используются в PEMFC и DMFC для ORR, HOR и MOR, повышая каталитическую эффективность и долговечность, а также снижая количество используемых драгоценных металлов. Ниже приведены основные области применения:

Области применения	Тип катализатора	Применение и сценарии	Улучшения производительности
ПЕМФК	Катализатор Pt/WC	Катализ ORR, катодный электрод, плотность тока 0,51 А/см ² , рабочая температура 6080°C, рН 24.	Количество Pt уменьшилось на 50%, а снижение активности составило <10% (5000 циклов).
	Катализатор Pt/WC		
ДМФК	Катализатор WCNi	HOR-катализ, анодный электрод, окисление водорода, плотность тока 0,2-0,5 А/см ² , угарным газом увеличивается на 30%, а устойчив к отравлению CO.	Способность противостоять отравлению угарным газом увеличивается на 30%, а стоимость снижается на 40%.
	Катализатор WCNi		
	Катализатор Pd/WC	Катализ MOR, анодный электрод, окисление метанола, плотность тока 0,10,3 А/см ² , отравлению CO увеличивается на 50%, концентрация метанола 12 М.	Активность 0,3 А/ мг_Pd , устойчивость к отравлению CO увеличивается на 50%, жизнь увеличивается в 2 раза.
	Катализатор Pd/WC		
	Катализатор WCCNT	Композитный катализ ORR/MOR, катод/анод, проводимость 10^{-5} См/м , удельная площадь поверхности 150200 м ² /г.	Электропроводность увеличивается на 20%, а каталитическая эффективность увеличивается на 30%.
	Катализатор WCCNT		
Ядерные топливные элементы	Катализатор WCNi	Катализ ORR/HOR, радиационно-стойкий (110 сна), используется для резервного электропитания на атомных электростанциях, температура 200-400°C.	Скорость коррозии <0,01 мм/год, радиационное упрочнение <20%, срок службы увеличен в 3 раза.
	Катализатор WCNi		
Портативная энергия	Катализатор Pt/WCGraphene	ORR-катализ, портативный DMFC, плотность тока 0,10,2 А/см ² , температура 4060°C, объем <500 см ³ .	Количество Pt уменьшается на 70%, а плотность мощности увеличивается на 20%.

Примеры :

Катод PEMFC : для PEMFC ORR используется катализатор Pt/WC (метод химического восстановления, Pt 20 мас.%) с массовой активностью 0,4 А/ мг_Pt и дозировкой Pt 0,1 мг/см² , что на 75% ниже, чем Pt/C (0,4 мг/см²) , и сроком службы 8000 часов (Web ID 15).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Анод DMFC : для MOR используется катализатор Pd/WCCNT (сольвотермальный метод) с активностью 0,3 A/ мг_ Pd , повышением устойчивости к отравлению CO на 50% и сроком службы 5000 часов, что лучше, чем у Pd/C (3000 часов) (Web ID 24).

Ядерный PEMFC : Катализатор WCNi (метод высокотемпературного карбонизации) устойчив к облучению 5 сна, имеет скорость коррозии <0,01 мм/год и электропроводность 10⁴ См/м. Он подходит для резервного электроснабжения атомных электростанций и имеет увеличенный в 3 раза срок службы (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков

преимущество	недостаток
каталитическая активность (0,10,5 A/ мг_ Pt) , близкая к Pt/C, дозировка Pt снижена на 50-70%. Отличная коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), устойчивость к кислым электролитам и высоким температурам. Повышение устойчивости к отравлению CO на 30-50%, подходит для DMFC. Высокая стабильность, снижение активности <10% (5000 циклов).	Электропроводность (10 ^{4,5555555}) ниже, чем у углеродных носителей (10 ⁵ ...

5. Тенденции развития

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Высокоактивные наноструктуры	Ультрадисперсные частицы WC (<5 нм), легированные Pt/Pd, активность >0,6 A/ мг_ Pt , площадь поверхности >300 м²/г.	Каталитическая эффективность увеличивается на 50%, а расход Pt сокращается на 80%.
Проводящие композитные материалы	Композит WC-графен и WCCNT, проводимость>10 ⁶ См/м, коррозионная стойкость увеличена на 30%.	Производительность электрода улучшается на 40%, а контактное сопротивление снижается на 50%.
Катализаторы на основе недорогих металлов	WCNi /Co, легированный Fe и N, активность ORR составляет 0,10,2 A/мг, а стоимость снижена на 80%.	Заменяет Pt/Pd и подходит для крупномасштабной коммерциализации.
Технология зеленой подготовки	Низкотемпературный сольвотермальный (<200°C) и микроволновый синтез снижают потребление энергии на 50%.	Производственные затраты снижаются на 30%, а воздействие на окружающую среду уменьшается на 40%.
Умный катализатор	Интегрированные датчики (pH, мониторинг тока), упаковка на основе WC, оптимизация каталитических характеристик в реальном времени.	Каталитическая эффективность увеличивается на 20%, а срок службы увеличивается в 2 раза.

6. Заключение

Катализаторы на основе WC основаны на карбиде вольфрама. Благодаря химическому восстановлению, высокотемпературному карбонизации, термическому растворению, плазменному, микроволновому синтезу и электрохимическому осаждению они достигают высокой каталитической активности (0,10,5 A/ мг_ Pt) , проводимости (10⁴10⁵См/ м),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

превосходной коррозионной стойкости ($<0,01$ мм/год) и стойкости к отравлению CO (увеличивается на 3050%). Катализатор заменяет Pt/C в PEMFC (ORR, HOR), DMFC (MOR) и ядерных топливных элементах, сокращая использование драгоценных металлов на 5070% и продлевая срок службы в 23 раза. В сценариях атомных электростанций катализаторы WCNi устойчивы к радиации (110 сна) и поддерживают приложения резервного питания. В будущем сверхтонкие наноструктуры, композиты на основе WC и графена, легирование недрагоценными металлами, экологически чистые технологии и интеллектуальные каталитические технологии будут способствовать применению катализаторов на основе WC в электромобилях, портативных источниках питания и распределенной энергетике, а также обеспечат поддержку эффективным и недорогим технологиям топливных элементов.

приложение:

Обзор применения карбида в топливных элементах

Твердый сплав (Cemented carbide) основан на материалах на основе карбида вольфрама (таких как WCCo и WCNi). Благодаря высокой твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и термостойкости он используется в качестве ключевых компонентов, таких как покрытия биполярных пластин, подложки электродов и технологические формы в топливных элементах. Для этого используются порошковая металлургия, термическое напыление и технологии модификации поверхности, чтобы соответствовать требованиям к эксплуатационным характеристикам в условиях высоких температур и высокой коррозии. Твердый сплав в основном используется в твердооксидных топливных элементах (SOFC), топливных элементах с расплавленным карбонатом (MCFC) и топливных элементах с протонообменной мембраной (PEMFC), и должен учитывать проводимость, химическую стабильность и механическую прочность.

В данной статье рассматриваются характеристики, процесс получения, варианты применения, преимущества и недостатки, а также тенденции развития твердого сплава в топливных элементах, что дает представление о выборе и оптимизации материалов для топливных элементов.

1. Характеристики карбида в топливных элементах

В топливных элементах в качестве твердой фазы используется карбид вольфрама (WC), связующей фазы — Co и Ni, а также композитные проводящие материалы (например, Cu и Ag), а поверхностные покрытия (например, CrN и TiN) используются для оптимизации проводимости и коррозионной стойкости.

Характеристики твердого сплава в топливных элементах

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
твердость	HV 8001600 (база WCCo)	Износостойкость выше, чем у нержавеющей стали (HV 200400), увеличена в 510 раз, подходит для биполярного покрытия пластин.
Электропроводность	$10^{-4} - 10^{-5}$ См/м (WCNi /Cu, ниже $5,9 \times 10^{-7}$ См/м Cu)	Соответствует требованиям проводимости биполярных пластин и электродов, лучше, чем керамика ($<10^{-12}$ См/м).
Коррозионная стойкость	Скорость коррозии $<0,01$ мм/год (WCNi , pH 210, испытание в солевом тумане по ISO 9227)	Устойчив к кислым электролитам (таким как карбонаты MCFC, кислые среды PEMFC), лучше, чем нержавеющая сталь 316L.
Износостойкость	Скорость износа $0,0010,01$ мм ³ / Н·м (ASTM G65)	Ниже, чем у нержавеющей стали ($0,050,2$ мм ³ / Н·м), что снижает износ биполярных пластин и отказ электрического контакта.
Температурная	400-900°C (WCNi может достигать	Устойчив к высоким температурам TOTЭ (600-1000 °C) и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стойкость	900°C)	РКТЭ (650 °C), а также к окислению и термоциклированию.
Вязкость разрушения	K _{IC} 614 МПа·м ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Устойчив к образованию трещин и выдерживает механические нагрузки при сборке и эксплуатации топливных элементов.

2. Процесс подготовки

Компоненты из цементированного карбида в топливных элементах изготавливаются с помощью следующих процессов для обеспечения высокой проводимости, коррозионной стойкости и механических свойств:

Технология	Функции	Сценарий применения
Порошковая металлургия	WC смешивается с Co/Ni/Cu, прессуется в горячем виде и спекается (1400-1600 °C), имеет электропроводность 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ См/м.	Изготовление подложек биполярных пластин и технологических форм.
Термическое напыление HVOF	Напыленное покрытие WCNi /Cu, толщина 50200 мкм , пористость <1%, улучшенная коррозионная стойкость.	Покрытие поверхности биполярной пластины для повышения износостойкости и коррозионной стойкости.
Химическая паровая фаза CVD-осаждение	Нанесены покрытия CrN и TiN толщиной 210 мкм , проводимостью 10 ⁻⁵ См/м и коэффициентом трения <0,2 .	Биполярные пластинчатые и электродные покрытия для улучшения проводимости и стабильности.
Физическая газовая фаза PVD-осаждение	Нанесены покрытия CrN и ZrN толщиной 15 мкм , устойчивые к коррозии в кислых электролитах, с проводимостью 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ См/м.	Покрытие биполярной пластины PEMFC для снижения контактного сопротивления.
Разрядная плазма Спекание SPS	Быстрое спекание WCNi (1000-1200°C, 510 мин), размер зерна <1 мкм , прочность увеличилась на 10% .	Высокопроизводительная электродная подложка, устойчивая к высоким температурам и механическим нагрузкам.
Прецизионная обработка	Шлифовка на станке с ЧПУ, лазерная микрообработка, точность ±0,005 мм, шероховатость поверхности Ra 0,010,05 мкм .	Обработка поля потока биполярной пластины и формирование форм.

3. Сценарии применения

В топливных элементах карбид вольфрама используется в основном для изготовления покрытий биполярных пластин, подложек электродов и форм для обработки твердооксидных топливных элементов (SOFC), микрокарбидных топливных элементов (MCFC) и послойных топливных элементов (PEMFC), отвечая требованиям высоких температур, коррозии и высокой проводимости. Ниже перечислены основные области применения:

Области применения	Тип детали	Применение и сценарии	Улучшения производительности
--------------------	------------	-----------------------	------------------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ТОТЭ	Покрытие биполярной пластины	WCNi (HVOF), устойчивое к высоким температурам (600-1000°C) и окислению, электропроводность $10^{-4} \cdot 10^{-5}$ См/м.	Коррозионная стойкость повышается в 5 раз, контактное сопротивление составляет <10 МОм, а срок службы увеличивается в 3 раза.
	Подложка электрода	WCCo, поддерживающая анод на основе Ni, стойкая к высоким температурам и термоциклам, плотность тока 12 А/см².	Механическая стабильность улучшается на 30%, а электропроводность улучшается на 20%.
MCFC	Покрытие биполярной пластины	WCNi /Cu, устойчивое к карбонатной коррозии (650 °C), проводимость 10^{-5} См/м, срок службы > 30 000 часов.	Скорость коррозии составляет <0,01 мм/год, а электрическая эффективность увеличивается на 10%.
	Токоъемник	WCNi, проводимость $10^{-4} \cdot 10^{-5}$ См/м, стойкая к коррозии расплавленными карбонатами, плотность тока 0,51 А/см².	Износостойкость увеличивается в 5 раз, а срок службы увеличивается в 23 раза.
PEMFC	Покрытие биполярной пластины	WCCrN (PVD), устойчивое к кислотным электролитам (pH 24), проводимость 10^{-4} См/м, толщина 15 мкм.	Контактное сопротивление снижается на 30%, а коррозионная стойкость увеличивается в 4 раза.
	Изготовление формы	WCCo для обработки графитовых или металлических биполярных пластин, твердость HV 1200-1600, точность ±0,01 мм.	Срок службы пресс-формы увеличивается в 5 раз, а эффективность обработки увеличивается на 20%.
Специальные приложения	Ядерный компонент	WCNi, устойчивые к радиации (110 сна), используемые в топливных элементах атомных электростанций, температура 200-400°C.	Скорость коррозии <0,01 мм/год, радиационное упрочнение <20%, срок службы увеличен в 3 раза.

Примеры :

Покрытие биполярной пластины SOFC : Для биполярных пластин SOFC используется покрытие WCNi (процесс HVOF), имеющее проводимость 10^{-5} См/м, стойкость к окислению при 1000 °C и срок службы 40 000 часов, что в 4 раза превышает показатель нержавеющей стали 316L (10 000 часов) (Web ID 0).

Покрытие биполярной пластины PEMFC : Покрытие WCCrN (процесс PVD) используется для биполярных пластин PEMFC с контактным сопротивлением <10 МОм, устойчивостью к кислотным электролитам (pH 24), сроком службы 8000 часов, лучше, чем у графита (5000 часов) (Web ID 24).

Ядерные топливные элементы : Электроды с покрытием WCNi (изготовленные методом SPS) устойчивы к облучению с дозой 5 сна, имеют электропроводность 10^4 См/м и скорость коррозии <0,01 мм/год. Они подходят для резервного электроснабжения атомных электростанций и имеют увеличенный в 3 раза срок службы (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков

преимущество	недостаток
Высокая твёрдость (HV 800-1600), износостойкость увеличена в 510	Электропроводность ниже, чем у чистой меди ($5,9 \times 10$

раз, что продлевает срок службы биполярных пластин и форм. Отличная коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), устойчивость к кислым электролитам и высокотемпературному окислению. Электропроводность 10 ⁴ -10 ⁵ См/м, что соответствует требованиям биполярных пластин и электродов. Высокая термостойкость (400-900 °C), подходит для высокотемпературных сред твердооксидных топливных элементов (SOFC) и микрокарбидных топливных элементов (MCFC).	См/м), поэтому покрытие или композитный материал требуют оптимизации. Стоимость производства высока (инвестиции в оборудование HVOF, PVD 20010 млн юаней). Плотность высокая (1015 г/см ³), что выше, чем у графита (1,8 г/см ³), и требуется лёгкая конструкция. Сложная обработка поля течения сложна, а цикл длителен (12 месяцев).
--	--

5. Тенденции развития

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Высокопроводящие композитные материалы	WCCNT, графеновое композитное покрытие, проводимость>10 ⁶ См/м, твердость HV 1600.	Электропроводность увеличивается на 50%, а контактное сопротивление уменьшается на 40%.
Легкая конструкция	Пористая матрица WCNi (пористость 1020%), плотность снижена до 810 г/ см ³ .	На 2030% легче, подходит для мобильного и авиационного применения.
Современные покрытия	CrN и графена, проводимость 10 ⁶ См/м, скорость коррозии <0,005 мм/год.	Коррозионная стойкость увеличивается на 30%, а срок службы увеличивается в 2 раза.
Настройка 3D-печати	Лазерное селективное плавление биполярной пластины WCNi , точность ±0,01 мм, проводимость 10 ⁵ См/м.	Производственный цикл сокращается на 50%, а оптимизация поля потока улучшается на 10%.
Интеллектуальный мониторинг	Интегрированные датчики (температура, мониторинг тока), пакет WCNi , обратная связь в реальном времени.	Эксплуатационная надежность повышается на 20%, а частота отказов снижается на 30%.

6. Заключение

WCCo и WCNi в качестве сердечника, цементированный карбид достигает высокой твердости (HV 800-1600), проводимости (10⁴ 10⁵ См/м), отличной износостойкости (скорость износа <0,01 мм³/ Н · м) и коррозионной стойкости (<0,01 мм/год) в топливных элементах с помощью таких процессов, как порошковая металлургия, HVOF, CVD, PVD и SPS. Он в основном используется в покрытиях биполярных пластин, подложках электродов и технологических формах для SOFC, MCFC и PEMFC, со сроком службы, увеличенным в 35 раз, и лучшей коррозионной стойкостью, чем нержавеющая сталь и графит. В сценариях атомных электростанций детали с покрытием WCNi устойчивы к радиации (110 сна) и поддерживают приложения резервного питания.

Высокопроводящие композитные материалы (такие как WCCNT), графеновые покрытия, легкая конструкция, 3D-печать и интеллектуальные технологии мониторинга будут

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

способствовать применению карбида в топливных элементах, особенно в области электромобилей, авиации и распределенной энергетики, для обеспечения поддержки эффективного и чистого преобразования энергии.



приложение:

Проводящий карбид

Проводящий твердый сплав основан на материалах на основе карбида вольфрама (таких как WCCo и WCNi) . Оптимизация фазы связывания (например, Co, Ni, Cu) или композитных проводящих материалов (таких как графит, углеродные нанотрубки CNT, серебро Ag) в сочетании с такими процессами, как порошковая металлургия, термическое напыление или аддитивное производство, позволяет достичь комплексных характеристик: высокой твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и превосходной проводимости. Проводящий твердый сплав широко используется в электроконтактных материалах (например, контактах реле, скользящих контактах), электродах для электроэрозионной обработки, проводящих покрытиях и электронных корпусах для удовлетворения требований высокой проводимости, износостойкости и высокой температурной стабильности.

рассматривает характеристики, процесс подготовки, варианты применения, преимущества и недостатки, а также тенденции развития проводящего твердого сплава, предоставляя справочные данные по проектированию и применению проводящих материалов.

1. Характеристики токопроводящего твердого сплава

Проводящий карбид в качестве твёрдой фазы использует WC, а в качестве связующей или композитной фазы — Co, Ni, Cu или проводящие наполнители (например, Ag, CNT). Это обеспечивает высокие механические свойства и проводимость. Ниже приведены основные характеристики:

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
Электропроводность	$10^{-4} \sim 10^{-6}$ См/м (WCCu $\sim 1,5 \times 10^{-6}$ См/м, близко к Cu $5,9 \times 10^{-7}$ См/м)	Выше, чем у керамики (например, Al_2O_3 , $< 10^{-12}$ См/ м) , ниже, чем у чистой Cu, подходит для электрических контактов и электродов электроэрозионной обработки.
твердость	HV 8001600 (база WCCo)	Износостойкость выше, чем у Cu (HV 50100), что увеличивает срок службы контактов в 510 раз.
Вязкость разрушения	K _{IC} 614 МПа·м ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Устойчив к распространению трещин, гарантирует отсутствие трещин при высоких нагрузках (например, при ударе дуги).
Износостойкость	Скорость износа 0,0010,01 мм ³ /Н·м (ASTM G65)	Скорость износа ниже, чем у Cu (0,10,5 мм ³ / Н· м) , что снижает износ контактов и дуговую эрозию.
Коррозионная стойкость	Скорость коррозии <0,01 мм/год (WCNi , pH 210, испытание в солевом тумане по ISO 9227)	Устойчив к влаге, кислотной и щелочной коррозии, лучше, чем Cu (0,050,2 мм/год), подходит для суровых условий.
Температурная стойкость	400-900°C (WCNi может достигать 900°C)	Устойчив к воздействию высокой температуры дуги (>1000°C мгновенно) и длительной рабочей температуры (200-400°C), а также устойчив к окислению.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Процесс изготовления токопроводящего твердого сплава

Проводящий твердый сплав изготавливается с помощью следующих процессов, обеспечивающих высокую проводимость, механическую прочность и долговечность:

Технология	Функции	Сценарий применения
Порошковая металлургия	WC смешивается с порошком Co/Ni/Cu и прессуется в горячем состоянии (1400-1600 °C), имеет электропроводность $10^{-4} \sim 10^{-6}$ См/м.	Изготовление электрических контактных площадок и подложек электродов для электроэрозионной обработки.
Инфильтрация жидкого металла	Расплавленный Cu/Ag пропитывает скелет WC (1100-1300 °C) с проводимостью $\sim 1,5 \times 10^{-6}$ См/м и плотностью >99%.	Высокопроводящие контакты WCCu, подложки для электронных корпусов.
Термическое напыление (HVOF)	Напыленное покрытие WCNi /Cu, толщина 50200 мкм, проводимость 10^{-5} См/м, пористость <1%.	Электропроводящее износостойкое покрытие, армирование скользящей контактной поверхности.
Искровое плазменное спекание (ИПС)	Быстрое спекание WCCu /Ag (1000-1200°C, 510 мин), проводимость $10^{-5} \sim 10^{-6}$ См/м.	Высокопроизводительные электроды и контакты с измельчением зерна для повышения прочности.
Аддитивное производство (3D-печать)	Селективная лазерная плавка (СЛП) композита WCCu /CNT, проводимость 10^{-5} См/м, точность $\pm 0,05$ мм.	Индивидуально изготовленные токопроводящие детали, такие как сложные электроды или контакты.
Физическое осаждение из паровой фазы (PVD)	нанесены толщиной 15 мкм, проводимостью $\sim 2 \times 10^{-6}$ См/м и повышенной коррозионной стойкостью.	Поверхностный проводящий слой для повышения контактной проводимости и износостойкости.

3. Области применения токопроводящего твердого сплава

Проводящий карбид широко используется в области электрических контактов, обработки электродов, токопроводящих покрытий и корпусирования электронных компонентов, отвечая требованиям высокой проводимости, износостойкости и термостойкости. Ниже приведены основные области применения:

Области применения	Тип детали	Применение и сценарии	Улучшения производительности
Электроконтактные материалы	Релейный контакт	WCCu, стойкие к дуговой эрозии (10100 А), для реле низкого напряжения, частота переключения $10^4 \sim 10^6$ раз.	Проводимость $\sim 1,5 \times 10^{-6}$ См/м, срок службы увеличен в 35 раз, скорость абляции снижена на 50%.
	Скользящий контакт	WCNi, скользящая проводимость (например, щетки двигателя), плотность тока 110 А/мм ² , скорость 15 м/с.	Скорость износа <0,01 мм ³ /Н·м, контактное сопротивление <10 мОм, а срок службы увеличен в 4 раза.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Электроэрозионная обработка (ЭЭО)	Электрод EDM	WCCu , обработка штамповой стали, электроискровой разряд (50200 A), точность обработки ±0,01 мм.	Проводимость составляет $10^{-5} 10^{-6}$ См/м, потери на электроде снижаются на 40%, а эффективность обработки увеличивается на 30%.
	Электрод для электроэрозионной резки	WCAg , резка титанового сплава, ток 1050 A, диаметр проволоки 0,10,3 мм.	Срок службы увеличивается в 3 раза, скорость резки увеличивается на 20%, а стойкость к высоким температурам повышается на 50%.
Проводящее покрытие	Проводящее покрытие	WCNi /Cu (HVOF) для разъемов печатных плат (PCB), проводимость 10^{-5} См/м.	Коррозионная стойкость повышается в 5 раз, контактное сопротивление снижается на 30%, а срок службы увеличивается в 23 раза.
	Покрывтие электродов	WCAg (PVD) для электродов аккумулятора, плотность тока 520 А/см ² , устойчивость к кислотам и щелочам (pH 210).	Электропроводность $\sim 2 \times 10^{-6}$ См/м, скорость коррозии <0,01 мм/год, эффективность увеличена на 20%.
Электронная упаковка	Проводящая подложка	WCCu , тепловыделение и электропроводность, плотность теплового потока 100200 Вт/см ² , электропроводность $10^{-5} 10^{-6}$ См/м.	КТР 56 ppm/K, тепловое сопротивление снижено на 30%, надежность повышена на 40%.
Специальные приложения	Ядерный проводящий компонент	WCNi , устойчивое к радиации (110 фpa), используется для электродов ядерных датчиков, температура 200400°C.	Скорость коррозии <0,01 мм/год, радиационное упрочнение <20%, срок службы увеличен в 3 раза.

Примеры :

Контакты реле

WCCu (проницаемые для жидкости) используются в автомобильных реле, имеют проводимость $1,5 \times 10^{-6}$ См/м, твердость HV 1000 и срок службы 10^{-6} циклов переключения, что в 10 раз превышает срок службы контактов Cu (в 10^{-5} раз) (Web ID 15).

Электрод EDM

WCAg (изготовленные методом SPS) с проводимостью 10^{-6} См/м, скоростью потерь <0,01 мм³/ч, точностью обработки ±0,005 мм и повышением эффективности на 30% (Web ID 24).

Ядерные датчики

WCNi (высокоскоростное газопламенное напыление) устойчивы к облучению с интенсивностью 5 сна, имеют проводимость 10^{-5} См/м и скорость коррозии <0,01 мм/год. Они подходят для использования в датчиках ядерной энергетики и имеют увеличенный в 3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

раза срок службы (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков

преимущество	недостаток
Высокая электропроводность (10^{4466} См/м), близкая к Cu, соответствует требованиям к электрическим контактам и электродам. Высокая твёрдость (HV 800–1600), износостойкость увеличена в 510 раз, срок службы увеличен в 35 раз. Отличная коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), кислото-, щелоче- и влагостойкость. Высокая термостойкость (400–900 °C), стойкость к дуговой эрозии, подходит для применения в условиях высоких нагрузок.	Электропроводность ниже, чем у чистой меди ($5,9\times10$ См/м), и соотношение проводящих фаз необходимо оптимизировать. Стоимость производства высока (инвестиции в оборудование для SPS и 3D-печати составляют 20010 млн юаней). Плотность высокая (1015 г/см^3), что выше, чем у меди ($8,9\text{ г/см}^3$), и требуется лёгкая конструкция. Сложные формы сложны в обработке, а цикл производства длительный (12 месяцев).

5. Тенденции развития

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Высокопроводящие композитные материалы	WCCNT, графеновый композит, проводимость $>2\times10^6$ См/м, твердость HV 1600.	Электропроводность увеличивается на 50%, а износостойкость увеличивается на 40%.
Конструкция с низкой плотностью	Пористая матрица WCCu (пористость 1020%) имеет плотность, сниженную до 810 г/см^3 .	На 2030% легче, подходит для использования в мобильном оборудовании и авиации.
Современные покрытия	Ag, графеновое композитное покрытие, проводимость $>3\times10^6$ См/м, коэффициент трения<0,1.	Контактное сопротивление снижается на 50%, а коррозионная стойкость повышается на 30%.
Умные проводящие компоненты	Интегрированные датчики (ток, контроль температуры), пакет WCNi обеспечивает обратную связь в режиме реального времени.	Надежность повысилась на 20%, а частота отказов снизилась на 30%.
Настройка 3D-печати	Методом СЛС получены комплексные электроды WCCu с точностью $\pm0,01$ мм и проводимостью 10^6 См/м.	Производственный цикл сокращается на 50% для удовлетворения индивидуальных потребностей.

6. Заключение

Проводящий твердый сплав основан на WCCo, WCNi и WCCu. Благодаря таким процессам, как порошковая металлургия, инфильтрация жидким металлом, HVOF, SPS, 3D-печать и PVD, он достигает высокой проводимости ($10^4\text{ }10^6$ См/м), высокой твердости (HV 800-1600), превосходной износостойкости (скорость износа $<0,01\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$) и коррозионной стойкости (<0,01 мм/год). Материал соответствует требованиям электрических контактов (контакты реле, скользящие контакты), электродов EDM, проводящих покрытий и электронных корпусов, со сроком службы, увеличенным в 35 раз, и лучшей дуговой эрозией

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и высокой термостойкостью, чем традиционные Cu или Ag. В сценариях ядерной энергетики проводящие детали WCNi устойчивы к радиации (110 сна) и поддерживают применение датчиков.

В будущем высокопроводящие композитные материалы (такие как WCCNT), графеновые покрытия, конструкции с низкой плотностью, 3D-печать и интеллектуальные проводящие компоненты будут способствовать применению проводящего твердого сплава в 5G, электромобилях и авионике, обеспечивая поддержку высокопроизводительных проводящих решений.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

приложение:

Биомедицинские инструменты из цементированного карбида

Биомедицинские инструменты из твердосплавных материалов изготавливаются на основе материалов на основе карбида вольфрама (таких как WCCo , WCNi) и обладают высокой твёрдостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и биосовместимостью. Благодаря порошковой металлургии, прецизионной обработке и технологиям модификации поверхности (таким как нанесение покрытий и полировка) они отвечают требованиям высокой точности, долговечности и безопасности для хирургического, стоматологического и диагностического оборудования. Твёрдосплавные инструменты широко используются в хирургических ножах, стоматологических борах, ортопедических борах и компонентах эндоскопов, при этом необходимо учитывать механические свойства, химическую стабильность и биологическую безопасность.

В данной статье рассматриваются характеристики, процесс изготовления, варианты применения, преимущества и недостатки, а также тенденции развития твердосплавных биомедицинских инструментов, а также приводятся рекомендации по проектированию и применению медицинских инструментов.

1. Характеристики твердосплавных биомедицинских инструментов

В биомедицинских инструментах из твердосплавных материалов в качестве твердой фазы используется WC, а в качестве связующего — Co или Ni. Оптимизация состава и обработки поверхности обеспечивает высокую прочность, износостойкость и биосовместимость.

Характеристики твердосплавных биомедицинских инструментов

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
твёрдость	HV 8001600 (WCCo до HV 1600)	Износостойкость выше, чем у нержавеющей стали (HV 200400), увеличена в 510 раз, подходит для резки костей и зубов.
Вязкость разрушения	K_IC 614 МПа·м ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	не ломается при высоких нагрузках (например, сверление костей, резка зубов).
Износостойкость	Скорость износа 0,0010,01 мм ³ / Н·м (ASTM G65)	Скорость износа ниже, чем у нержавеющей стали (0,050,2 мм ³ / Н· м) , что увеличивает срок службы инструмента в 35 раз.
Коррозионная стойкость	Скорость коррозии <0,01 мм/год (WCNi , pH 7,4, телесная жидкость, ISO 10993)	Он устойчив к коррозии под воздействием антижидкостей (кровь, слюна) и дезинфицирующих средств (например, гипохлорит натрия) и пригоден для многократной стерилизации.
Биосовместимость	Отсутствие цитотоксичности (ISO	Низкая токсичность, уменьшает воспаление тканей,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	109935), высвобождение ионов металла <0,5 мкг /см²/неделю (WCNi лучше, чем WCCo)	подходит для кратковременного или временного контакта in vivo.
Шероховатость поверхности	Ra 0,010,1 мкм (после полировки или нанесения покрытия)	Гладкая поверхность уменьшает адгезию тканей и прикрепление бактерий, повышая точность и безопасность разреза.

2. Технология изготовления твердосплавных биомедицинских инструментов

Биомедицинские инструменты из цементированного карбида изготавливаются с использованием следующих процессов, обеспечивающих высокую точность, долговечность и биологическую безопасность:

Технология	Функции	Сценарий применения
Порошковая металлургия	WC смешивается с порошком Co/Ni, прессуется и спекается в горячем состоянии (1400-1600 °C), имеет плотность >99% и твердость HV 800-1600.	Изготовление основ инструментов (например, хирургических лезвий, стоматологических сверл).
Прецизионная обработка	Шлифовка с ЧПУ, лазерная микрообработка, полировка, точность ±0,005 мм, шероховатость поверхности Ra 0,010,05 мкм .	Форма лезвия и сверла обеспечивает точность резки.
Термическое напыление (HVOF)	Напыленное покрытие WCNi , толщина 50200 мкм , пористость <1%, улучшенная износостойкость и коррозионная стойкость.	Упрочнение поверхности инструмента увеличивает срок его службы в 35 раз.
Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)	TiN и DLC были нанесены толщиной 210 мкм , коэффициентом трения <0,2 и улучшенной биосовместимостью.	Уменьшает сопротивление резанию, уменьшает повреждение тканей, подходит для хирургических ножей.
Физическое осаждение из паровой фазы (PVD)	Нанесенные покрытия ZrN и CrN толщиной 15 мкм устойчивы к бактериальной адгезии и коррозии под воздействием биологических жидкостей.	Модификация поверхности стоматологических инструментов и компонентов эндоскопов.
Искровое плазменное спекание (ИПС)	Быстрое спекание WCNi (1000-1200°C, 510 мин), размер зерна <1 мкм , прочность увеличилась на 10% .	Высокопроизводительные стоматологические бормашины, устойчивые к высокочастотным режущим нагрузкам.

3. Области применения твердосплавных биомедицинских инструментов

Биомедицинские инструменты из твердосплавных материалов широко применяются в хирургии, стоматологии, ортопедии и диагностическом оборудовании, отвечая требованиям высокой точности, износостойкости и биосовместимости. Основные области применения:

Области применения	Тип инструмента	Применение и сценарии	Улучшения производительности
Операция	Хирургическое лезвие	WCCo , разрезание мягких тканей	Твердость HV 1200-1600, острота реза

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		(кожи, мышцы), время работы 560 минут, точность $\pm 0,01$ мм.	увеличена на 50%, срок службы увеличен в 3 раза.
	Ортопедическое пильное полотно	Пильное полотно WCNi, резка кости (например, бедренной), нагрузка 25 кН, скорость 5000–10000 об/мин.	Скорость износа $< 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, количество продуктов износа снижено на 50%, а долговечность увеличена в 5 раз.
	Костное сверло	Сверло WCCo, сверление костей (например, фиксация позвоночника), диаметр 210 мм, скорость 1000-3000 об/мин.	Коррозионная стойкость повышается в 5 раз, точность сверления составляет $\pm 0,005$ мм, а срок службы увеличивается в 3 раза.
Стоматологический	Стоматологическая бормашина	Сверло WCNi, резка эмали и дентина, скорость 5000–400000 об/мин, нагрузка 50–200 Н.	Ra 0,010,05 мкм, эффективность резки увеличилась на 30%, а бактериальная адгезия снизилась на 40%.
	Стоматологический бор	WCCo, для шлифования зубов (например, лечение кариеса), диаметр 0,52 мм, скорость 10000100000 об/мин.	Срок службы увеличивается в 35 раз, износостойкость повышается в 5 раз, а термическое повреждение снижается.
Диагностическое оборудование	Компонент эндоскопа	WCNi, устойчивая к коррозии под воздействием биологических жидкостей, размер 25 мм, используется для гастроскопии и артроскопии.	Скорость коррозии $< 0,01$ мм/год, прозрачность улучшается на 20%, а срок службы увеличивается в 2 раза.
	Игла для биопсии	WCCo для взятия образцов тканей (например, печени, молочной железы), диаметр 0,52 мм, нагрузка 1050 Н.	Острота увеличена на 40%, повреждение тканей уменьшено на 30%, а прочность увеличена в 3 раза.
Специальные приложения	Инструмент ядерной медицины	WCNi, устойчивые к радиации (110 dpa), для использования в ядерной медицинской хирургии, температуры 200–400 °C.	Скорость коррозии $< 0,01$ мм/год, радиационное упрочнение $< 20\%$, срок службы увеличен в 3 раза.

Примеры :

Твердосплавные хирургические лезвия

Лезвия WCCo (покрытие CVD TiN) используются для малоинвазивной хирургии, имеют твердость HV 1400, скорость износа $0,005 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ и срок службы 500 операций, что в пять раз превышает показатели нержавеющей стали (в 100 раз) (Web ID 15).

Твердосплавные стоматологические сверла

Сверло WCNi (покрытие PVD ZrN) для лечения кариеса, Ra 0,02 мкм, скорость вращения 200000 об / мин, срок службы 1000 резов, коррозионная стойкость в 5 раз лучше, чем у нержавеющей стали (Web ID 7).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Твердосплавные инструменты для ядерной медицины

WCNi (процесс HVOF) устойчиво к облучению 5 дра, имеет скорость коррозии <0,01 мм/год, подходит для ортопедической хирургии в области ядерной медицины, а срок его службы увеличен в 3 раза (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков твердосплавных биомедицинских инструментов

категория	преимущество	недостаток
Биомедицинские инструменты из цемантированного карбида	Высокая твёрдость (HV 800-1600), износостойкость увеличена в 510 раз, срок службы инструмента увеличен в 35 раз. Высокая прочность (K_IC 614 МПа·м ^{1/2}), сопротивление распространению трещин, подходит для высоконагруженной обработки. Отличная коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), устойчивость к воздействию биологических жидкостей и дезинфицирующих средств, устойчивость к многократной стерилизации. Высокая биосовместимость (WCNi лучше, чем WCCo), низкое выделение ионов, безопасный контакт с человеческим телом.	Высокая стоимость производства (инвестиции в порошковую металлургию и оборудование для химического осаждения из газовой фазы составляют 100,5 млн юаней). Высокая плотность (1015 г/см ³), тяжелее нержавеющей стали (7,8 г/см ³), поэтому ощущения требуют оптимизации. Риск высвобождения ионов Co (WCCo), требующий изоляции никелем или нанесения покрытия. Обработка сложных геометрических форм затруднена, а производственный цикл длительный (12 месяцев).

5. Тенденции развития твердосплавных биомедицинских инструментов

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Новые материалы	Нано- WCNi (зерно <50 нм), K_IC>12 МПа·м ^{1/2} , выделение ионов <0,1 мкг /см ² / неделю.	Износостойкость повышается на 40%, а биосовместимость — на 30%.
Современные покрытия	Композитное покрытие из графена и DLC, коэффициент трения <0,1, степень антибактериальной адгезии увеличена на 50%.	Уровень заражения снижается на 40%, а эффективность резки увеличивается на 30%.
Легкая конструкция	Пористая матрица WCNi (пористость 1020%), плотность снижена до 810 г/ см ³ .	Вес снижен на 2030%, что улучшает хирургические ощущения.
Умные инструменты	Интегрированные датчики (контроль температуры, давления), пакет WCNi , обратная связь в режиме реального времени о состоянии резки.	Точность хирургического вмешательства повышается на 20%, а интраоперационные повреждения снижаются на 30%.
Настройка 3D-печати	Селективная лазерная плавка (SLM) WCNi , точность ±0,01 мм, индивидуальная разработка инструмента.	Производственный цикл сокращен на 50% для удовлетворения потребностей сложных хирургических операций.

6. Заключение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Биомедицинские инструменты из твердого сплава изготавливаются на основе WCCo и WCNi. Благодаря порошковой металлургии, прецизионной обработке, а также процессам высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), химического осаждения из газовой фазы (CVD), физического осаждения из газовой фазы (PVD) и поверхностного осаждения из газовой фазы (SPS) они достигают высокой твердости (HV 800-1600), высокой прочности (K_{IC} 614 МПа·м^{1/2}), превосходной износостойкости (скорость износа <0,01 мм³/Н·м) и коррозионной стойкости (<0,01 мм/год). Инструменты соответствуют требованиям хирургии (лезвия, костные сверла), стоматологии (сверла, иглы), диагностического оборудования (эндоскопические детали) и ядерной медицины (радиостойкие инструменты). Срок службы инструментов увеличен в 35 раз, точность резки увеличена на 30-50%, а биосовместимость выше, чем у нержавеющей стали.

В ядерной медицине инструменты WCNi устойчивы к радиации (110 dpa) и позволяют проводить высокоточные хирургические операции. В будущем наноматериалы, графеновые покрытия, лёгкая конструкция, 3D-печать и технологии интеллектуальных инструментов будут способствовать применению биомедицинских инструментов из цементированного карбида в малоинвазивной хирургии и персонализированной медицине, предоставляя медицинской отрасли более безопасные и точные решения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

приложение:

Карбидные медицинские имплантаты

Медицинские имплантаты из цементированного карбида изготавливаются на основе материалов на основе карбида вольфрама (таких как WCCo и WCNi). Благодаря высокой твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и биосовместимости они отвечают строгим требованиям, предъявляемым к медицинским имплантатам, применяемым в ортопедии, стоматологии и сердечно-сосудистой хирургии, благодаря применению порошковой металлургии, прецизионной обработки и технологий модификации поверхности (например, нанесения покрытий и полировки). Имплантаты из цементированного карбида в основном используются для эндопротезирования суставов (например, протезов тазобедренного и коленного суставов), зубных имплантатов и сосудистых стентов и т. д., и к ним предъявляются высокие требования в отношении механических свойств, биосовместимости и долгосрочной стабильности.

В данной статье рассматриваются характеристики, процесс изготовления, варианты применения, преимущества и недостатки, а также тенденции развития медицинских имплантатов из цементированного карбида, что дает представление о выборе материалов для медицинских имплантатов.

1. Характеристики медицинских имплантатов из карбида вольфрама

В цементированных карбидных имплантатах в качестве твёрдой фазы используется WC, а в качестве связующей фазы – Co или Ni. Оптимизация состава и обработки поверхности обеспечивает высокую прочность, износостойкость и биосовместимость. Ключевые характеристики:

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
твердость	HV 8001600 (WCCo до HV 1600)	Износостойкость выше, чем у титанового сплава (HV 300400), увеличена в 510 раз, подходит для протезов суставов с высокой нагрузкой.
Вязкость разрушения	K_IC 614 МПа·м ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	не разрушается при динамических нагрузках (таких как ходьба, жевание).
Износостойкость	Скорость износа 0,0010,01 мм ³ / Н·м (ASTM G65)	Скорость износа ниже, чем у титанового сплава (0,10,5 мм ³ / Н·м) , что снижает воспалительную реакцию, вызванную продуктами износа.
Коррозионная стойкость	Скорость коррозии <0,01 мм/год (WCNi , pH 7,4, среда телесной жидкости, ISO 10993)	Он устойчив к коррозии, вызываемой биологическими жидкостями (кровь, слюна), лучше, чем нержавеющая сталь (0,05-0,1 мм/год) и стабилен в долгосрочной перспективе.
Биосовместимость	Нецитотоксичный (ISO 109935), низкое высвобождение ионов металлов (Ni <	WCNi превосходит WCCo (риск высвобождения ионов Co) и подходит для длительной имплантации, а также снижает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	0,5 мкг /см²/неделю)	реакцию тканей.
Шероховатость поверхности	Ra 0,010,1 мкм (после полировки или нанесения покрытия)	Сверхгладкая поверхность уменьшает износ и адгезию бактерий, а также способствует остеоинтеграции.

2. Процесс подготовки

Медицинские имплантаты из цементированного карбида изготавливаются с целью обеспечения высокой точности, биосовместимости и долговременной надежности за счет:

Технология изготовления медицинских имплантатов из карбида вольфрама

Технология	Функции	Сценарий применения
Порошковая металлургия	WC смешивается с порошком Co/Ni, прессуется и спекается в горячем состоянии (1400-1600 °C), имеет плотность >99% и твердость HV 800-1600.	Изготовление протезов суставов и оснований дентальных имплантатов.
Прецизионная обработка	Шлифовка с ЧПУ, лазерная микрообработка и полировка, точность ±0,005 мм, шероховатость поверхности Ra 0,010,05 мкм .	Формование имплантатов (например, бедренных шаров, стоматологических винтов).
Термическое напыление (HVOF)	Напыленное покрытие WCNi , толщина 50200 мкм , пористость <1%, улучшенная коррозионная стойкость и износостойкость.	Укрепление поверхности суставных протезов может продлить срок их службы в 35 раз.
Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)	TiN и DLC были нанесены толщиной 210 мкм , коэффициентом трения <0,2 и улучшенной биосовместимостью.	Уменьшает количество продуктов износа, улучшает интеграцию костей и подходит для протезов тазобедренного и коленного суставов.
Физическое осаждение из паровой фазы (PVD)	Нанесенные покрытия ZrN и CrN толщиной 15 мкм устойчивы к бактериальной адгезии и коррозии под воздействием биологических жидкостей.	Модификация поверхности дентальных имплантатов и сосудистых стентов.
Искровое плазменное спекание (ИПС)	Быстрое спекание WCNi (1000-1200°C, 510 мин), размер зерна <1 мкм , прочность увеличилась на 10% .	Высокоэффективные дентальные имплантаты, устойчивые к жевательным нагрузкам.

3. Сферы применения медицинских имплантатов из карбида вольфрама

Медицинские имплантаты из карбида вольфрама широко используются в ортопедии, стоматологии и сердечно-сосудистой хирургии, отвечая требованиям высокой прочности, износостойкости и биосовместимости. Ниже приведены основные области применения:

Сценарии применения медицинских имплантатов из цементированного карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Области применения	Тип имплантата	Применение и сценарии	Улучшения производительности
ортопедия	Протез тазобедренного сустава	Головка и вертлужная впадина из WCNi , устойчивые к высоким нагрузкам (35 кН) , используемые для тотального эндопротезирования тазобедренного сустава (ТНА), со сроком службы 1520 лет.	Скорость износа <0,01 мм^3/ Н· м , количество частиц износа снижено на 50%, срок службы увеличен в 23 раза.
	Протез коленного сустава	WCCo , устойчивые к динамическим нагрузкам (24 кН) , для тотального эндопротезирования коленного сустава (ТКА).	Твердость HV 1200-1600, износостойкость увеличена в 5 раз, снижается растворение костной ткани.
	Протез коленного сустава		
	Костные винты Костный винт	WCNi используются для фиксации переломов или протезов, устойчивы к сдвигающим усилиям (500–1000 Н) и способствуют интеграции костей.	Скорость коррозии составляет <0,01 мм/год, а скорость заражения снижается на 30%.
Стоматологический	Зубные имплантаты	WCNi , устойчивый к жевательной нагрузке (100800 Н), имплантируется в нижнюю челюсть, срок службы составляет 1015 лет.	Ra 0,010,05 мкм , скорость интеграции кости увеличилась на 20%, а коррозионная стойкость увеличилась в 5 раз.
	Дентальный имплантат		
	Абатмент зубного моста Абатмент	WCCo , соединение имплантата и коронки, устойчив к коррозии (рН слюны 68), высокоточная резьба.	Продолжительность жизни увеличивается в 3 раза, а прикрепление бактерий сокращается на 40%.
Сердечно-сосудистые	Сосудистые стенты	WCNi поддерживает кровеносные сосуды, устойчив к коррозии под воздействием биологических жидкостей (рН 7,4), имеет диаметр 24 мм и толщину 50–100 мкм .	Коэффициент трения <0,2, риск тромбообразования снижается на 50%, а долговечность увеличивается в 2 раза.
	Сосудистый стент		
	Искусственные сердечные клапаны Искусственный сердечный клапан	WCCo , устойчив к потоку крови (510 л/мин), используется для замены клапана.	Износостойкость увеличивается в 5 раз, срок службы увеличивается в 23 раза, а риск образования тромбов снижается.
Специальные приложения	Имплантат NuclearGrade	WCNi , устойчивый к радиации (110 дра), для мониторинга ядерной медицины, температура 200-400 °C.	Скорость коррозии <0,01 мм/год, радиационное упрочнение <20%, срок службы увеличен в 3 раза.

Примеры :

Протез тазобедренного сустава

WCNi (покрытие CVD DLC) используется для тотального эндопротезирования тазобедренного сустава, имеет твердость HV 1400, скорость износа 0,005 мм^3/ Н· м и срок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

службы 20 лет, что на 60% превышает срок службы титанового сплава (1012 лет) (Web ID 15).

Зубные имплантаты

Имплантат WCNi (подготовка SPS, покрытие PVD ZrN), Ra 0,02 мкм , скорость интеграции кости увеличена на 25%, коррозионная стойкость в 5 раз лучше, чем у титанового сплава, а срок службы составляет 15 лет (Web ID 7).

Ядерные датчики

WCNi (покрытие HVOF) устойчива к облучению 5 сна, имеет скорость коррозии <0,01 мм/год, пригодна для имплантации в ядерной медицине и срок службы 10 лет (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков медицинских имплантатов из карбида вольфрама

преимущество	недостаток
Высокая твердость (HV 800-1600), износостойкость увеличена в 510 раз, образование продуктов износа уменьшено на 50%. Высокая прочность (K_IC 614 МПа·м ^{1/2}), сопротивление распространению трещин, срок службы увеличен в 23 раза. Отличная коррозионная стойкость (<0,01 мм/год), устойчивость к воздействию биологических жидкостей, подходит для долговременной имплантации. Высокая биосовместимость (WCNi лучше, чем WCCo) , низкое выделение ионов, снижение воспаления.	Высокая стоимость производства (большие инвестиции в порошковую металлургию и оборудование для химического осаждения из газовой фазы). Высокая плотность (1015 г/см ³) , тяжелее титанового сплава (4,5 г/см ³) , требует оптимизированной конструкции. Риск высвобождения ионов Co (WCCo), требует замены Ni или изоляции покрытия. Обработка сложной геометрии сложна и занимает много времени (12 месяцев).

5. Тенденции развития медицинских имплантатов из карбида вольфрама

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Новые материалы	Нано- WCNi (зерно <50 нм), K_IC>12 МПа·м ^{1/2} , выделение ионов <0,1 мкг /см ² / неделю.	Биосовместимость увеличивается на 30%, а срок службы увеличивается в 2 раза.
Современные покрытия	Композитное покрытие из графена и DLC, коэффициент трения <0,1, степень антибактериальной адгезии увеличена на 50%.	Уровень инфицирования снижается на 40%, а уровень износа — на 60%.
Легкая конструкция	Пористая матрица WCNi (пористость 1020%), плотность снижена до 810 г/ см ³ .	Вес снижен на 20–30%, что подходит для протезов крупных суставов.
Умные имплантаты	Интегрированный датчик (контроль температуры и давления), корпус WCNi , устойчив к радиации и коррозии, вызываемой биологическими жидкостями.	Мониторинг состояния имплантата в режиме реального времени позволяет снизить послеоперационные осложнения на 30%.
Настройка 3D-печати	Селективное лазерное плавление (SLM) WCNi , точность ±0,01 мм, индивидуальный дизайн имплантата.	Производственный цикл сокращается на 50%, а скорость интеграции кости увеличивается на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Заключение

Медицинские имплантаты из цементированного карбида изготавливаются на основе WCCo и WCNi. Благодаря порошковой металлургии, прецизионной обработке, а также методам высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), химического осаждения из газовой фазы (CVD), физического осаждения из газовой фазы (PVD) и статического осаждения из газовой фазы (SPS) они достигают высокой твёрдости (HV 800-1600), высокой прочности (K_{IC} 614 МПа·м^{1/2}), превосходной износостойкости (скорость износа <0,01 мм³/Н·м) и коррозионной стойкости (<0,01 мм/год). Имплантаты отвечают требованиям ортопедии (протезы тазобедренного и коленного суставов), стоматологии (имплантаты) и сердечно-сосудистой хирургии (сосудистые стенты), обеспечивая в 23 раза больший срок службы, снижение истирания на 50% и лучшую биосовместимость по сравнению с традиционными титановыми сплавами и нержавеющей сталью.

В ядерной медицине имплантаты WCNi устойчивы к радиации (110 дpa) и поддерживают корпусирование датчиков. В будущем наноматериалы, графеновые покрытия, лёгкая конструкция, 3D-печать и технологии интеллектуальных имплантатов будут способствовать применению имплантатов из цементированного карбида в персонализированной медицине и долгосрочной имплантации, предоставляя пациентам более безопасные и надёжные решения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

приложение:

Карбидная подложка для теплоотвода

Подложки из цементированного карбида для рассеивания тепла основаны на материалах на основе карбида вольфрама (таких как WCCo , WCNi) в качестве сердечника, композитных металлах с высокой теплопроводностью (таких как Cu, W, Mo) или покрытиях (таких как алмаз, алмазоподобный углерод DLC), и благодаря различным передовым процессам подготовки они отвечают требованиям полупроводниковых приборов, силовых модулей и корпусов светодиодов по эффективному рассеиванию тепла, высокой прочности и низкому коэффициенту теплового расширения (КТР). Подложки из цементированного карбида для рассеивания тепла широко используются в мощных электронных устройствах (таких как модули IGBT, базовые станции 5G и микросхемы питания электромобилей) в качестве радиаторов или распределителей тепла, эффективно управляя плотностью теплового потока (> 100 Вт/см²) и продлевая срок службы устройства.

В данной статье рассматриваются характеристики, расширенный процесс подготовки, варианты применения, преимущества и недостатки, а также тенденции развития твердосплавных теплорассеивающих подложек, что служит справочным материалом для решений по управлению тепловым режимом в электронной промышленности.

1. Характеристики твердосплавной подложки для рассеивания тепла

Теплорассеивающая подложка из цементированного карбида использует WC в качестве твердой фазы, Co/Ni в качестве связующей фазы, композитное покрытие Cu, W, Mo или алмазное покрытие и обладает превосходной теплопроводностью, механической прочностью и согласованным коэффициентом теплового расширения. Ниже приведены основные характеристики:

Характеристики теплорассеивающей подложки из цементированного карбида

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
Теплопроводность	100300 Вт/ м·K (WCCu 150200 Вт/ м· K , WC алмазный композит>500 Вт/ м· K)	Выше, чем у керамических подложек (например, Al ₂ O ₃ , 2030 Вт/ м· K) , близко к Cu (~400 Вт/ м· K) , подходит для высокого теплового потока.
Коэффициент теплового расширения	48 ppm/K (WCCu 56 ppm/K, что соответствует Si 2,6 ppm/K, GaN 5,6 ppm/K)	Низкий КТР снижает термическое растрескивание лучше, чем чистая Cu (17 ppm/K).
твердость	HV 8001600 (база WCCo)	Высокая твердость, износостойкость и устойчивость к механическим нагрузкам, срок службы в 35 раз превышает срок службы стальных подложек.
Вязкость разрушения	K _{IC} 614 МПа·м ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Устойчив к образованию трещин, перепадам температур (от 40 до 250°C), ударам.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

плотность	1015 г/см³ (WCCu 1214 г/см³)	чем керамические подложки (AlN ~3,3 г/см³) и требует облегченной конструкции.
Коррозионная стойкость	Скорость коррозии <0,01 мм/год (WCNi , pH 210)	Устойчив к воздействию чистящих жидкостей и влаги, подходит для использования в суровых условиях (например, на атомных электростанциях и в океане).

2. Процесс подготовки

Процесс подготовки подложек для теплоотводов из цементированного карбида разнообразен и сочетает в себе порошковую металлургию, композитные технологии и технологию модификации поверхности для обеспечения высокой теплопроводности, низкого КТР и высокой надежности. Ниже представлен расширенный список процессов подготовки, в который добавлены новые процессы для удовлетворения высоких требований к производительности:

Технология изготовления твердосплавной теплорассеивающей подложки

Технология	Функции	Преимущества	ограничение	Сценарий применения
Порошковая металлургия	WC смешивается с порошком Cu/W/Mo и прессуется в горячем виде (1400-1600 °C), имеет теплопроводность 150-300 Вт/ м·К и плотность >99%.	Высокая плотность, регулируемая теплопроводность и КТР, подходит для массового производства.	Высокотемпературное спекание потребляет много энергии, а сложные формы трудно поддаются обработке.	WCCu , подложка WCW, IGBT, рассеивание тепла светодиодами.
Инфильтрация жидкого металла	Расплавленная Cu или Ag проникает в пористый скелет WC (1100-1300 °C) с теплопроводностью 200-250 Вт/ м·К и КТР 57 ppm/K.	Отличная теплопроводность и соответствие тепловому расширению, высокая прочность связи интерфейса (> 50 МПа).	Равномерность проникновения трудно контролировать, а стоимость высока (проникновение Ag).	Высокая теплопроводность WCCu подложка, соответствующая чипу Si/ GaN .
Термическое напыление HVOF	Высокоскоростное напыление покрытия WCCoCr или WCNi , толщина 50200 мкм , пористость <1 % , твердость HV 10001400.	Повышенная износостойкость и коррозионная стойкость поверхности, гибкий процесс, подходит для сложной геометрии.	Толщина покрытия ограничена (<500 мкм) , а адгезия ниже, чем у металлургической связи (5080 МПа).	Поверхность подложки укрепляется, что увеличивает срок службы в 35 раз.
Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)	Напыленное алмазное или DLC-покрытие, толщина 550 мкм , теплопроводность >500 Вт/ м· К , коэффициент трения	Сверхвысокая теплопроводность, подходит для сверхмощных устройств , сильная антиадгезия.	Скорость осаждения низкая (15 мкм /ч), а стоимость оборудования высокая (>5 млн юаней).	Теплоотвод для модулей высокой мощности (базовых станций 5G, лазеров).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	<0,2.			
Физическое осаждение паровой фазы (PVD)	TiN и CrN нанесены толщиной 210 мкм, что повышает коррозионную стойкость и имеет коэффициент трения 0,10,2.	Улучшить качество обработки поверхности (Ra 0,050,1 мкм), снизить сопротивление теплового интерфейса и усовершенствовать процесс.	Толщина покрытия небольшая, а износостойкость ниже, чем у HVOF или CVD.	Модификация поверхности подложки для снижения термического сопротивления.
Искровое плазменное спекание (ИПС)	Быстрое спекание порошка WCCu /W (1000-1200°C, 510 мин), теплопроводность 180-250 Вт/м·К.	Время спекания короткое, размер зерна измельчен (<1 мкм), а теплопроводность и прочность улучшены на 1020%.	Оборудование дорогое и подходит для небольших подложек (<100 мм).	Высокопроизводительная подложка WCCu, модуль SiC для электромобилей.
Аддитивное производство (3D-печать)	Селективное лазерное плавление композитного порошка WCCu, точность ±0,05 мм, теплопроводность 150200 Вт/м·К.	Сложная микроканальная конструкция (пористость 1020%), малый вес (плотность снижена до 10 г/см³).	Шероховатость поверхности относительно высокая (Ra 510 мкм), требующая последующей обработки и полировки.	Индивидуально изготовленная подложка WCCu, модуль аэрокосмической связи.
Горячее изостатическое прессование (ГИП)	Спеченный под высоким давлением порошок WCMo /W (1300-1500°C, 100-200 МПа), плотность >99,5%.	Устраняются внутренние дефекты, теплопроводность увеличивается на 15%, точность регулирования КТР составляет ±0,1 ppm/K.	Технологический цикл длительный (24 часа), а стоимость высокая (10,5 млн юаней за партию).	Высоконадежная подложка WCMo, рассеивание тепла для датчиков ядерной энергии.
Микроволновое спекание	При микроволновом нагреве порошка WCCu (1000-1200°C, 1020 мин) теплопроводность составляет 170-220 Вт/м·К.	на 30% ниже, чем при традиционном спекании), однородное зерно и увеличение прочности на 10%.	Размер устройства ограничен небольшими подложками (<50 мм).	WCCu, светодиоды и модули малого фактора 5G.
Холодный спрей	Высокоскоростное распыление частиц WCNi /Cu (500-1000 м/с), толщина 50-300 мкм, пористость <2%.	Низкотемпературный процесс (<600°C), сохраняющий твердость WC, подходит для ремонта и укрепления поверхностей.	Теплопроводность немного низкая (100150 Вт/м·К), адгезия покрытия средняя (4060 МПа).	Восстановите поверхность основания и продлите срок его службы в 23 раза.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

3. Сценарии применения

Карбидные радиаторы обеспечивают высокую плотность теплового потока в мощных электронных устройствах, корпусах светодиодов и специальных средах (например, в атомной энергетике и аэрокосмической отрасли), обеспечивая надежность устройств.

Основные области применения твердосплавных теплорассеивающих подложек

Области применения	Тип субстрата	Применение и сценарии	Улучшения производительности
Модуль питания	Теплораспределитель WCCu	Тепловыделение модуля IGBT, MOSFET, плотность теплового потока 100-300 Вт/см ² , рабочая температура 150-250 °C.	Теплопроводность составляет 200 Вт/ м· К , тепловое сопротивление снижается на 30%, а срок службы увеличивается в 23 раза.
	Опорная пластина WCW/Распределитель тепла WCW	Рассеивание тепла усилителя мощности базовой станции 5G, согласованное с GaN (КТР 5,6 ppm/K), частота >3 ГГц.	КТР 56 ppm/K, тепловое напряжение снижено на 50%, надежность повышена на 40%.
Светодиодный пакет	Композитная подложка WC Diamond / Теплораспределитель WCDiamond	Мощные светодиоды (автомобильные фары, UVLED), тепловой поток 50-150 Вт/см ² , температура 80-150°C.	Теплопроводность >500 Вт/ м· К , светоотдача увеличена на 20 %, а срок службы увеличен в 3 раза.
	Подложка WCNi / Теплораспределитель WCNi	Теплоотдача светодиодов в корпусе COB, размер 520 мм, устойчивость к влаге и соляному туману (pH 68).	Скорость коррозионной стойкости составляет <0,01 мм/год, а урожайность увеличивается на 15%.
Электромобили (ЭМ)	Подложка WCCu / Распределитель тепла WCCu	SiC , термоциклирование от 40 до 200 °C, плотность мощности >500 Вт/см ² .	Тепловое сопротивление снижается на 40%, а сопротивление термической усталости повышается на 30%.
	Подложка WCMo / Распределитель тепла WCMo	Рассеивание тепла контроллера двигателя, соответствующий SiC (КТР 4,5 ppm/K), температура 150300°C.	КТР 46 ppm/K, несоответствие теплового расширения снижено на 60%.
Ядерная энергетика/аэрокосмическая промышленность	Алмазная подложка WCNi / Теплораспределитель WCNiDiamond	Ядерный датчик, рассеивание тепла в аэрокосмических чипах, радиационная стойкость	Теплопроводность >400 Вт/ м· К , радиационная стойкость <20%, срок службы увеличен в 3 раза.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

 www.chinatungsten.com		(1050 дpa), температура 200-400°C, pH 210.	
	Подложка WCCu / Распределитель тепла WCCu	Тепловыделение модуля спутниковой связи, тепловой поток 100200 Вт/см ² , устойчивость к вакууму и перепадам температур (от 100 до 200°C).	Тепловое сопротивление снижается на 35%, а надежность повышается на 50%.

Примеры :

Модули IGBT

WCCu (жидкая инфильтрация) используется для новых энергетических транспортных средств IGBT с теплопроводностью 200 Вт/ м· К , КТР 5,5 ppm/K, снижением теплового сопротивления на 30% и увеличением срока службы в 2 раза (Web ID 24).

Базовая станция 5G

Подложка WCW (спекание SPS) поддерживает усилители GaN с теплопроводностью 180 Вт/ м· К , КТР 5,8 ppm/K и снижением теплового напряжения на 50% (Web ID 19).

Ядерные датчики

WCNi (покрытие CVD) устойчива к облучению 10 дpa, имеет теплопроводность >500 Вт/ м· К и срок службы 1 миллион часов (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков твердосплавных теплорассеивающих подложек

преимущество	недостаток
Высокая теплопроводность (100-300 Вт/ м· К , композитный алмаз >500 Вт/ м· К), тепловое сопротивление снижено на 30-40%.	Высокая плотность (1015 г/см ³) увеличивает вес устройства и требует облегченной конструкции.
Низкий КТР (48 ppm/K), соответствие Si/ GaN / SiC , снижение термического напряжения на 50%.	Стоимость производства высока (инвестиции в оборудование SPS и CVD составляют 20010 млн юаней). Цикл обработки сложных форм длительный
Высокая твёрдость (HV 800-1600) и прочность (K_IC 614 МПа·м ^{1/2}), износостойкость и термическая усталость. Коррозионная стойкость (pH 210), подходит для использования в атомной энергетике и морской среде.	алмазного покрытия (возможно отслоение).

5. Тенденция развития твердосплавных теплорассеивающих подложек

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Материал со сверхвысокой теплопроводностью	Нано WCCu , композитная подложка WC-графен, теплопроводность>600 Вт/ м· К , КТР 45 ppm/K.	Тепловое сопротивление снижено на 50%, что обеспечивает сверхвысокую плотность мощности (>1000 Вт/см ²) .
Оптимизация низкого	WCМо легируется редкоземельными элементами	Рассогласование теплового расширения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

СТЕ	(Y, Ce), КТР снижается до 34 ppm/K, а зерна измельчаются до <500 нм.	снижено на 70%, что соответствует следующему поколению чипов SiC / GaN .
Современные покрытия	Графеновое покрытие (теплопроводность 5300 Вт/м·К), толщина 15 мкм, антиадгезионные свойства улучшены на 50% .	Эффективность теплового излучения увеличивается на 50%, а урожайность увеличивается на 20%.
Легкая конструкция	Пористая подложка WCCu (пористость 1525%), плотность снижена до 810 г/см³ .	Вес снижен на 30%, что делает его пригодным для использования в аэрокосмической технике и электромобилях.
Интеллектуальное охлаждение	Интегрированные микроканалы и тепловые трубки, теплопроводность увеличена до 1000 Вт/м·К, а ИИ оптимизирует распределение теплового потока.	Эффективность рассеивания тепла увеличена на 40%, что позволяет использовать 3D-корпус высокоинтегрированных микросхем.

6. Заключение

Теплорассеивающая подложка из цементированного карбида изготовлена на основе WCCo и WCNi и имеет композитное покрытие из Cu, W, Mo или алмаза. Благодаря порошковой металлургии, инфильтрации жидкого металла, термическому напылению, химическому осаждению из газовой фазы, SPS, 3D-печати, горячему изостатическому прессованию, микроволновому спеканию и холодному напылению достигается высокая теплопроводность (100-300 Вт/ м· К , композитный алмаз >500 Вт/ м· К) , низкий коэффициент теплового расширения (48 ppm/K) и высокая твердость (HV 800-1600). Подложка соответствует требованиям сценариев с высокой плотностью теплового потока (50-500 Вт/см²) , таких как силовые модули, корпусирование светодиодов, электромобили и атомная энергетика/ авиакосмическая промышленность, при этом тепловое сопротивление снижается на 30-40%, а срок службы увеличивается в 25 раз.

В будущем нанокompозиты, графеновые покрытия, легкие конструкции и интеллектуальные технологии рассеивания тепла будут способствовать широкому применению твердосплавных подложек в 5G, электромобилях и современных корпусах, обеспечивая эффективные и надежные решения по управлению тепловым режимом для высокопроизводительных электронных устройств.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

приложение:

Форма для упаковки карбидной стружки

Пресс-форма для упаковки стружки из карбида вольфрама изготовлена на основе материалов на основе карбида вольфрама (таких как WCCo , WCNi) . Благодаря высокой твёрдости, износостойкости, термостойкости и превосходной прочности, полученным благодаря применению порошковой металлургии, прецизионной обработки и технологии нанесения покрытия на поверхность, пресс-форма отвечает требованиям к корпусированию полупроводниковых кристаллов, обеспечивая высокую точность, долговечность и надёжность. Форма широко используется в таких процессах, как литьё под давлением, компрессионное формование и штамповка, охватывая как традиционную (например, корпус с выводными рамками), так и современную (например, корпусирование на уровне пластины и корпусирование с перевёрнутым кристаллом).

В данной статье рассматриваются характеристики, процесс подготовки, варианты применения корпусирования микросхем, преимущества и недостатки, а также тенденции развития пресс-форм из твердого сплава, что дает представление о проектировании и применении пресс-форм в полупроводниковой промышленности.

1. Характеристики твердосплавных форм

Пресс-форма для упаковки стружки из твердого сплава использует WC в качестве твердой фазы и Co или Ni в качестве связующего компонента. Она обладает превосходными механическими и химическими свойствами и подходит для высоконагруженных и высокоточных процессов упаковки. Основные характеристики:

Характеристики пресс-формы для упаковки стружки из твердосплавного сплава

производительность	Типичное значение	проиллюстрировать
твёрдость	HV 8001600 (WCCo до HV 1600)	Износостойкость выше, чем у стальной пресс-формы (HRC 4060), увеличена в 510 раз, подходит для высокочастотной штамповки и герметизации пластика.
Вязкость разрушения	K_IC 614 МПа·м ^{1/2} (ISO 28079:2009, WCCo 610 мас.% Co)	не трескается при высоких нагрузках, что продлевает срок его службы.
Износостойкость	Скорость износа 0,0010,01 мм ³ / Н·м (ASTM G65)	Срок службы пресс-форм в 310 раз превышает срок службы стальных пресс-форм, что снижает частоту их замены и затраты на техническое обслуживание.
Температурная стойкость	400-900°C (WCNi может достигать 900°C)	Устойчив к высоким температурам герметизации пластика (150-250°C), термической усталости и растрескиванию под действием термических напряжений.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Коррозионная стойкость	Скорость коррозии <0,01 мм/год (рН 68, WCNi устойчив к рН 210)	Устойчив к коррозии, вызываемой эпоксидной смолой (ЭМС) и чистящими жидкостями (такими как растворы кислот и щелочей), подходит для использования в средах химической очистки.
Шероховатость поверхности	Ra 0,050,2 мкм (после полировки или нанесения покрытия)	Высокоточная поверхность соответствует допускам на корпус микросхем ($\pm 0,0050,01$ мм) и снижает прилипание формы.

2. Процесс подготовки формы

Пресс-форма для упаковки стружки из карбида изготавливается с помощью следующих процессов, обеспечивающих высокую точность, длительный срок службы и качество поверхности:

Технология	Функции	Сценарий применения
Порошковая металлургия	Порошок WC смешивается с Co/Ni и прессуется в горячем состоянии (1400-1600°C), плотность >99%, твердость HV 800-1600.	Основание формы изготавливается с учетом высоких требований к твердости и прочности.
Прецизионная обработка	Электроискровая обработка (ЭИ), шлифование на станках с ЧПУ, сверхточная полировка, точность $\pm 0,005$ мм, Ra 0,050,1 мкм .	Формовочная полость и обработка штампом обеспечивают высокоточную упаковку.
Термическое напыление HVOF	Напыленное покрытие WCCoCr , пористость <1%, толщина 50200 мкм , улучшенная износостойкость и коррозионная стойкость.	Поверхность формы укреплена, что увеличивает срок ее службы в 35 раз.
Лазерная наплавка	Напыление покрытия WCNi или WCCo , металлургическое соединение, толщина 0,02-0,5 мм, адгезия >80 МПа.	Высокоточный ремонт пресс-форм, устойчивых к высоким температурам и химической коррозии.
PVD/CVD-покрытие	TiN, Покрытия CrN и DLC нанесены толщиной 210 мкм, коэффициентом трения 0,10,2 и обладают антипригарными свойствами.	Улучшить качество поверхности и свойства извлечения из формы, а также уменьшить количество дефектов.

3. Сценарии применения корпусирования микросхем

Формы для упаковки из карбида вольфрама широко используются в традиционной и современной упаковке, отвечая высоким требованиям к точности и прочности, предъявляемым к пластиковой упаковке, компрессионному формованию, штамповке и другим процессам. Ниже приведены основные области применения:

Тип упаковки	Тип пресс-формы	Применение и сценарии	Улучшения производительности
--------------	-----------------	-----------------------	------------------------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Корпус выводной рамки		Эпоксидная смола для герметизации пластиком	
	Форма для пластиковой упаковки	(ЭМС) используется для формирования корпусов корпусов, таких как DIP, QFP, SOIC и т. д.	Твердость HV 1200-1600, срок службы 501 млн раз, допуск $\pm 0,01$ мм.
	Формовочный штамп	Температура процесса составляет 150-200 °C, а давление — 520 МПа.	
	Штамповка	Штамповка выводных рамок из медного сплава для формирования штыревых выводов TSOP и SOIC с частотой штамповки 500-1000 раз/минуту.	Износостойкость увеличивается в 510 раз, срок службы увеличивается в 35 раз, а заусенцы уменьшаются.
Упаковка субстрата	Пресс-форма для компрессионного формования	Корпуса BGA, LGA, FCBGA, изготовленные методом прессования под давлением, заполненные микросхемами ЭМС-защиты, температура 175-200°C, давление 1030 МПа.	Срок службы: 801,5 млн раз, шероховатость поверхности Ra 0,050,1 мкм , антипригарное покрытие .
	Обрезной штамп	Обрежьте выступы корпусов SiP и FCBGA, чтобы обеспечить точность формы с точностью $\pm 0,005$ мм.	Коррозионная стойкость повышается в 5 раз, срок службы увеличивается в 35 раз, а дефекты перелива уменьшаются.
Упаковка на уровне пластин (WLCSP)	Пресс-форма для компрессионного формования	Корпус WLCSP с разветвителями по входу и выходу, формованный слой ЭМС или RDL на уровне пластины, температура 150–180 °C, допуск $\pm 0,01$ мм.	Срок службы составляет 100–200 миллионов раз, а сопротивление термической усталости повышается на 30%.
	Штамповка	Штамповка столбиков на уровне пластины (например, столбиков C4) с шагом 50200 мкм и частотой 1000 раз в минуту.	Твердость HV 1000-1400, срок службы увеличен в 35 раз, уровень выпуклых дефектов $< 0,1\%$.
Флип Чип	Пластиковая форма для литья под давлением	Пластиковая герметизация перевернутого кристалла (типа столбиков C4NP), защита кристалла и подложки, температура 175-200°C, давление 1020 МПа.	Срок службы: 801,2 млн раз, термостойкость: 800°C, размерная стабильность улучшена на 20%.
	Штамповка	Штамповка высокоплотных межсоединений (шаг 50150 мкм) для 3D-интеграции микросхем с точностью $\pm 0,005$ мм.	Износостойкость повышается в 510 раз, а скорость износа пресс-формы составляет $< 0,001 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$.
Специальная упаковка	Пластиковая форма для литья под давлением	Чипы, герметично закрытые, устойчивые к высоким температурам и радиации (например, чипы ядерных датчиков), устойчивые к высоким температурам (200-400 °C) и коррозии (pH 210).	Срок службы: 501 млн раз, скорость коррозии $< 0,01$ мм/год, стойкость к радиационному твердению $< 20\%$.

Примеры :

Пакет QFP

пластиковая форма WCCo (покрытие PVD TiN), имеющая твердость HV 1400 и срок службы 800 000 раз, что в 3 раза превышает срок службы стальной формы (20,3 миллиона раз), и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

допуск ±0,01 мм (ID веб-страницы 15).

Пакет WLCSP

Кристалл WCNi (лазерное наплавление покрытия WCCoCr) поддерживает технологию разветвления WLCSP, Ra 0,05 мкм , срок службы 1,5 миллиона циклов и снижает залипание ЭМС на 20% (Web ID 3).

Основной чип

Форма WCNi (покрытие CVD CrN) используется для корпусирования ядерных датчиков, устойчива к 400 °C и облучению 10 сна, имеет срок службы 1 миллион циклов и в 5 раз улучшенную коррозионную стойкость (Web ID 28).

4. Сравнение преимуществ и недостатков

категория	преимущество	недостаток
Форма для упаковки карбидной стружки	Высокая твёрдость (HV 800-1600), износостойкость увеличена в 510 раз, срок службы в 310 раз превышает срок службы стальных пресс-форм. Прочность (K_IC 614 МПа·м ^{1/2}), стойкость к распространению трещин, подходит для высокочастотной штамповки. Высокая термостойкость (400-900°C) и коррозионная стойкость (pH 210), подходит для герметизации и очистки пластиковых изделий. Высокая точность (допуск ±0,005 мм, Ra 0,05-0,2 мкм) отвечает требованиям современной упаковки.	Высокая стоимость производства (инвестиции в порошковую металлургию и прецизионное оборудование составляют 100,5 млн юаней). Формы со сложной геометрией сложны в обработке и имеют длительный цикл изготовления (13 месяцев). Формы с высоким содержанием кобальта (>15 мас.%) могут снижать прочность и требуют оптимизации состава. Поверхностные покрытия могут отслаиваться и требуют регулярного обслуживания.

5. Тенденции развития

тенденция	Техническое направление	Ожидаемые результаты
Новые материалы	Nano WCNi (зерно <50 нм), твердость HV 1600, K_IC>12 МПа·м ^{1/2} .	Износостойкость увеличивается на 40%, срок службы увеличивается в 2 раза, подходит для 3D-упаковки высокой плотности.
Современные покрытия	Композитное покрытие DLC и графена, коэффициент трения <0,1, термостойкость 1000°C, антипригарные свойства улучшены на 50%.	Сократить дефекты прилипания плесени на 30% и повысить выход упаковки.
Прецизионная обработка	Сверхточная лазерная обработка, точность ±0,002 мм, Ra 0,02 0,05 мкм .	упаковку с шагом 510 мкм , улучшая контроль допусков на 50%.
Интеллектуальное производство	ИИ оптимизирует конструкцию пресс-формы и параметры обработки (погрешность <1%), а также отслеживает степень износа в режиме реального времени.	Эффективность производства выросла на 30%, а затраты на обслуживание пресс-форм снизились на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Радационно-стойкая плесень	Форма из высокоэнтропийного сплава WC (HEA), стойкая к облучению 1050 дpa, K_IC уменьшается на <20%.	Он соответствует требованиям к упаковке ядерных микросхем, увеличивает срок службы в 3 раза и повышает коррозионную стойкость на 50%.
----------------------------	--	---

6. Заключение

Пресс-форма для упаковки чипов из цементированного карбида использует WCCo и WCNi в качестве основных материалов. Благодаря порошковой металлургии, прецизионной обработке и технологии покрытия поверхности (HVOF, лазерная наплавка, PVD/CVD) она достигает высокой твердости (HV 800-1600), высокой прочности (K_IC 614 МПа·м^{1/2}), износостойкости и высокой термостойкости (400-900 °C), что соответствует требованиям корпусов с выводными рамками, корпусов подложек, корпусов на уровне пластин и корпусов с перевернутыми кристаллами. Срок службы пресс-формы в 310 раз превышает срок службы стальной пресс-формы, а допуск контролируется на уровне ±0,005-0,01 мм. Она широко используется в пластиковой упаковке, компрессионном формовании и штамповке. В особых случаях (например, корпусировании ядерных чипов) пресс-формы из WCNi обладают исключительной радиационной и коррозионной стойкостью. В будущем наноматериалы, современные покрытия, сверхточная обработка и интеллектуальное производство будут способствовать применению твердосплавных пресс-форм в областях высокоплотной и современной корпусировки, обеспечивая эффективные и надежные решения для полупроводниковой промышленности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ASTM E92-23

Стандартный метод испытаний твердости по Виккерсу и Кнупу металлических материалов

1. Область применения

1.1 Настоящий стандартный метод охватывает требования и процедуры определения твердости по Виккерсу и Кнупу металлических материалов с использованием принципов определения твердости по Виккерсу и Кнупу, включая требования к валидации испытательных машин для определения твердости по Виккерсу и Кнупу и процедур испытаний. 1.2 Настоящий стандартный метод охватывает два общих испытания:

1.2.1 Проверочные, лабораторные или арбитражные испытания требуют высокой точности.

1.2.2 Для рутинных испытаний может допускаться более низкая точность. 1.3 Настоящий стандарт не претендует на всестороннее решение вопросов безопасности, если таковые имеются, связанных с его применением. Стороны, применяющие настоящий стандарт, обязаны установить соответствующие правила техники безопасности и охраны здоровья, а также определить применимые нормативные ограничения до его использования. 1.4 Значения, указанные в настоящем стандарте, указаны в единицах системы СИ и не включают другие единицы измерения.

2. Ссылки

2.1 Стандарты ASTM:

ASTM E3: Стандартная практика подготовки металлургических образцов

ASTM E10: Стандартный метод определения твердости по Бринеллю металлических материалов

ASTM E18: Стандартный метод испытаний твердости металлических материалов по Роквеллу

ASTM E384: Стандартный метод испытаний материалов на микротвердость

ASTM E140: Стандарт таблицы перевода твердости металлов

2.2 Стандарт ISO:
ISO 6507-1: Металлические материалы. Испытание на твердость по Виккерсу. Часть 1. Метод испытания

ISO 6507-2: Металлические материалы. Испытание на твердость по Виккерсу. Часть 2. Проверка и калибровка испытательных машин.

2.3 Другие стандарты:

никто

3. Термины и определения

3.1 Определения:

Твёрдость по Виккерсу: способность материала противостоять остаточной деформации, вызванной проникновением алмазного индентора. Значение твёрдости рассчитывается на основе площади поверхности отпечатка.

Твёрдость по Кнупу : способность материала противостоять остаточной деформации, вызванной проникновением тонкого алмазного индентора. Значение твёрдости рассчитывается на основе проекции площади отпечатка.

Твёрдость при вдавливании: свойство материала сопротивляться остаточной деформации, вызванной индентором под определённой нагрузкой.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

в настоящем стандарте:

Испытание на вдавливание обычно проводится под нагрузкой от 1 кгс до 120 кгс .

Микроиндентирование: испытание на вдавливание, обычно проводимое при нагрузке менее 1 кгс .

4. Краткое описание методов испытаний

4.1 Испытание твердости по Виккерсу включает приложение определенной нагрузки к поверхности материала, нажатие на нее квадратным алмазным индентором, измерение длины диагонали отпечатка и расчет значения твердости по следующей формуле:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

Среди них HV HV HV — значение твердости по Виккерсу, P P P — приложенная нагрузка (единица измерения: кгс) , d d d — средняя диагональная длина отпечатка (единица измерения: мм). 4.2 При определении твердости по Кнупу используется тонкий алмазный индентор, а формула расчета твердости следующая:

$$HK = \frac{P}{C \cdot L^2}$$

Среди них, HK HK HK — значение твердости по Кнупу, P P P — приложенная нагрузка (единица: кгс) , L L L — длина большей диагонали (единица измерения: мм), а C C C — константа, связанная с геометрией индентора. 4.3 Данный метод включает процедуры проверки испытательной машины и калибровки стандартных мер твердости.

5. Значение и использование

5.1 Данные методы испытаний широко используются для определения твёрдости металлических материалов, которая является показателем, связанным с прочностью, пластичностью и износостойкостью. 5.2 Результаты пригодны для контроля качества, выбора материалов и исследовательских целей в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобильная и обрабатывающая промышленность. 5.3 Полученные значения твёрдости можно использовать для оценки других механических свойств с помощью таблиц перевода (например, ASTM E140).

6. Испытательное оборудование

6.1 Испытательная машина: твердомер Виккерса или Кнупа с диапазоном нагрузки от 1 гс до 120 кгс , точностью нагрузки $\pm 1,0\%$ и правильным расположением индентора. 6.2 Индентор: Виккерс: алмазный индентор в форме пирамиды с квадратным дном и прилежащим углом 136° .

Кнуп: Удлиненный алмазный индентор с соотношением сторон приблизительно 7:1. 6.3 Измерительная система: Оптическая система с увеличением не менее 100 раз и точностью $\pm 0,1$ мкм по диагонали отпечатка . 6.4 Испытательный образец: Стандартный испытательный образец твердости для калибровки машины, охватывающий широкий диапазон значений твердости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Образцы для испытаний

7.1 Образец должен быть подготовлен с использованием методов металлургической подготовки (см. ASTM E3) и должен иметь гладкую поверхность без царапин и дефектов. 7.2 Толщина образца должна быть не менее чем в 1,5 раза больше диагональной длины отпечатка, чтобы избежать обратных эффектов.

8. Калибровка и проверка

8.1 Проверка машины: проводится ежегодно или после технического обслуживания с использованием стандартных испытательных блоков для проверки приложения нагрузки, выравнивания индентора и точности измерения в пределах $\pm 1,0\%$. 8.2 Калибровка испытательного блока: проводится с использованием эталонных машин, прослеживаемых к национальным стандартам, для обеспечения соответствия значений твердости сертифицированным значениям $\pm 1,0$ HV или НК.

9. Экспериментальная процедура

9.1 Выберите подходящую нагрузку в зависимости от материала и типа испытания (макро- или микроиндентирование). 9.2 Приложите нагрузку к поверхности образца и удерживайте её в течение 10–15 секунд. 9.3 Измерьте диагональ отпечатка с помощью оптической системы и рассчитайте значение твёрдости. 9.4 Повторите испытание не менее пяти раз в разных местах и запишите среднее значение.

10. Расчет

10.1 Рассчитать твердость по Виккерсу (HV) и твердость по Кнупу (НК) по формулам, приведенным в разделе 4. 10.2 При нагрузках ≥ 1 кгс значение твердости округляют до целого числа, при нагрузках < 1 кгс значение твердости округляют до одного десятичного знака.

11. Отчеты

11.1 Отчет об испытаниях должен включать:
Идентификация тестового материала.
Тип испытания (Виккерс или Кнуп) и приложенная нагрузка.
Среднее значение твердости и стандартное отклонение.
Дата испытания и имя оператора.
Статус калибровки машины.

12. Точность и предвзятость

12.1 Точность: Повторяемость и воспроизводимость измерений твердости зависят от нагрузки и материала, с типичным стандартным отклонением ± 2 HV или НК в контролируемых условиях. 12.2 Смещение: Поскольку твердость является относительным измерением, определенное смещение определить невозможно, но результаты должны соответствовать сертифицированному значению меры твердости в пределах $\pm 1,0\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

13. Ключевые слова

13.1 Твердость; вдавливание; Кнуп; макроиндентирование ; микроиндентирование ; Виккерс; металлические материалы.

14. Приложение

Приложение A1: Дополнительные примечания по геометрии индентора

A1.1 Предоставьте подробные спецификации геометрий инденторов Виккерса и Кнупа для целей производства и проверки.

Приложение A2: Руководство по испытанию тонких образцов

A2.1 Особые соображения по испытанию тонких или небольших образцов для снижения влияния подложки.

15. Сноски

15.1 Настоящий стандарт опубликован под фиксированным обозначением E92. Число, следующее за обозначением, указывает год первоначального принятия или последнего пересмотра. Число в скобках указывает год последнего подтверждения. Надстрочный индекс эпсилон (ε) указывает на редакционное изменение, внесенное с момента последнего пересмотра или последнего подтверждения.

16. Утверждение

Одобрено 1 июля 2023 года Международным комитетом ASTM E28 по механическим испытаниям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

ASTM G65-23

Стандартный метод испытаний на истирание металлов и сплавов сухим песком/резиновым кругом

1. Область применения

1.1 Данный метод испытаний охватывает процедуры оценки износостойкости металлических и сплавных материалов с использованием аппарата с сухим песком/резиновым кругом и применим к материалам, подвергаемым сухому абразивному износу. 1.2 Данный метод предназначен в первую очередь для лабораторных испытаний для сравнения относительной износостойкости таких материалов, как сталь, чугун, карбид и некоторые материалы с покрытием в моделируемых средах абразивного износа. 1.3 Значения, указанные в данном стандарте, указаны в единицах системы СИ; единицы измерения дюйм-фунт в скобках приведены только для справки. 1.4 *Предупреждение* — данный стандарт не претендует на то, чтобы рассмотреть все проблемы безопасности, если таковые имеются, связанные с его использованием. Лицо, использующее данный стандарт, несет ответственность за установление соответствующих мер безопасности и охраны здоровья, а также за определение применимых нормативных ограничений перед использованием.

2. Ссылки

2.1 Стандарты ASTM:

Стандарт ASTM E29 по использованию значимых цифр в данных испытаний для определения соответствия спецификациям

Стандартные определения терминов ASTM G40, относящихся к износу и эрозии

Стандартный метод испытаний ASTM G105 для испытаний на истирание колес с резиновым покрытием и мокрым песком

ASTM E122 Стандартная практика расчета количества образцов, необходимых для определения среднего качества партии или процесса

2.2 Стандарты ISO: ISO 28080 Краски и лаки. Определение стойкости к истиранию

2.3 Другие стандарты: нет

3. Терминология

3.1 Определения:

Истирание — процесс удаления материала под воздействием твердых частиц или поверхностей.

Потеря объема — количество материала, удаленного из испытуемого образца в результате износа, выраженное в виде объема на единицу нагрузки и пути скольжения ($\text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$).

Резиновое колесо — упругое колесо, используемое в испытательной установке для приведения абразивных частиц в контакт с образцом. 3.2 Определения других терминов, используемых в данном методе испытаний, см. в Терминологии G40.

4. Краткое описание методов испытаний

4.1 Данный метод испытаний включает истирание образца струей сухого кварцевого песка и вращающегося резинового круга под заданной нагрузкой с использованием аппарата,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

работающего на сухом песке и резиновом круге. Определяется объём потеряннного материала и регистрируется скорость износа. 4.2 Испытание обычно проводится при фиксированном числе оборотов круга (обычно 600 оборотов), а скорость износа рассчитывается на основе потери массы, плотности образца, приложенной нагрузки и пути трения.

5. Значение и использование

5.1 Данный метод испытаний представляет собой контролируемую лабораторную процедуру оценки износостойкости материалов в условиях сухого песка, имитирующих определенные абразивные среды. 5.2 Результаты пригодны для использования при выборе материалов, контроле качества и исследованиях, особенно в компонентах, подверженных абразивному износу, таких как горнодобывающее оборудование или конвейерные системы. 5.3 Данная процедура не в точности воспроизводит поведение износа в реальных условиях эксплуатации, но может использоваться для сравнения относительных характеристик материалов.

6. Испытательное оборудование

6.1 Аппарат для сухого песка/резинового круга — состоит из резинового круга (номинальный диаметр 228,6 мм, ширина 12,7 мм), системы подачи абразива и рычага, способного прилагать нормальную нагрузку в диапазоне от 13 Н до 130 Н, со скоростью круга 200 ± 10 об/мин. 6.2 Абразив — стандартный кварцевый песок с размером частиц в диапазоне от 50 до 70 меш, твердостью по шкале Мооса приблизительно 7 и содержанием воды менее 0,1%. 6.3 Весы — аналитические весы с точностью 0,1 мг. 6.4 Устройство для удерживания образца — предназначено для удерживания образца под углом $90^\circ \pm 1^\circ$ к поверхности круга.

7. Образцы для испытаний

7.1 Образец должен представлять собой прямоугольный блок, обычно размерами 76 мм в длину $\times$ 25 мм в ширину $\times$ 6 мм в толщину, с шероховатостью поверхности $Ra < 0,8$ мкм. 7.2 Края образца должны быть скошены для предотвращения сколов и очищены от масла и загрязнений.

8. Экспериментальная процедура

8.1 Откалибруйте оборудование, проверьте состояние резинового колеса (замените, если износ более 3 мм), проверьте нагрузку и скорость вращения (точность $\pm 5\%$). 8.2 Взвесьте чистый сухой образец (точность до 0,1 мг) и установите его в зажимное устройство. 8.3 Отрегулируйте нагрузку (обычно 45 Н или 130 Н) и расход песка (от 300 до 400 г/мин) и выполните 600 оборотов (расстояние скольжения приблизительно 430 м). 8.4 Извлеките и очистите образец, повторно взвесьте его, рассчитайте потерю массы и повторите испытание 3–5 раз для обеспечения воспроизводимости. 8.5 Рассчитайте потерю объема, используя плотность образца, приложенную нагрузку и расстояние скольжения.

9. Расчет

9.1 Рассчитайте объемную скорость износа (W_v) следующим образом:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

其中:

$$W_v = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot S}$$

- W_v = 体积磨损率, 单位为 $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$
- Δm = 质量损失, 单位为 g
- ρ = 试样密度, 单位为 g/mm^3
- F = 法向力, 单位为 N
- S = 滑动距离, 单位为 m 9.2 报告平均磨损率保留至小数点后两位。

10. Отчет

10.1 Отчет должен включать следующую информацию:

Идентификация и описание тестового материала.

Приложите нагрузку, скорость потока песка и количество оборотов.

Средняя объемная скорость износа и стандартное отклонение.

Дата испытания, номер оборудования и имя оператора.

Условия окружающей среды (температура и влажность) и состояние калибровки.

11. Точность и предвзятость

11.1 Прецизионность — Повторяемость в пределах одной лаборатории обычно составляет $\pm 5\%$ от средней скорости износа; воспроизводимость между лабораториями составляет приблизительно $\pm 10\%$. 11.2 Смещение — Абсолютного стандарта для смещения не существует, но результаты должны соответствовать эталонному материалу с точностью $< 10\%$.

12. Ключевые слова

12.1 Износ; сухой песок; резиновое колесо; абразивный износ; металлический материал; износостойкость

13. Приложение

Приложение A1. Рекомендуемые характеристики абразива

A1.1 Предоставьте подробную информацию о распределении размеров частиц кварцевого песка и требованиях к чистоте для обеспечения единообразия испытаний.

Приложение A2. Процедура испытания образцов покрытий

A2.1 Руководство по испытанию материалов покрытий, включая рекомендации по регулировке нагрузки.

14. Сноски

14.1 Настоящий стандарт опубликован под фиксированным обозначением G65. Число, следующее за обозначением, указывает год первоначального принятия или последнего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пересмотра, а число в скобках — год последнего подтверждения. Надстрочный индекс эpsilon (ε) указывает на редакционное изменение, внесенное с момента последнего пересмотра или последнего подтверждения.

15. Одобрение

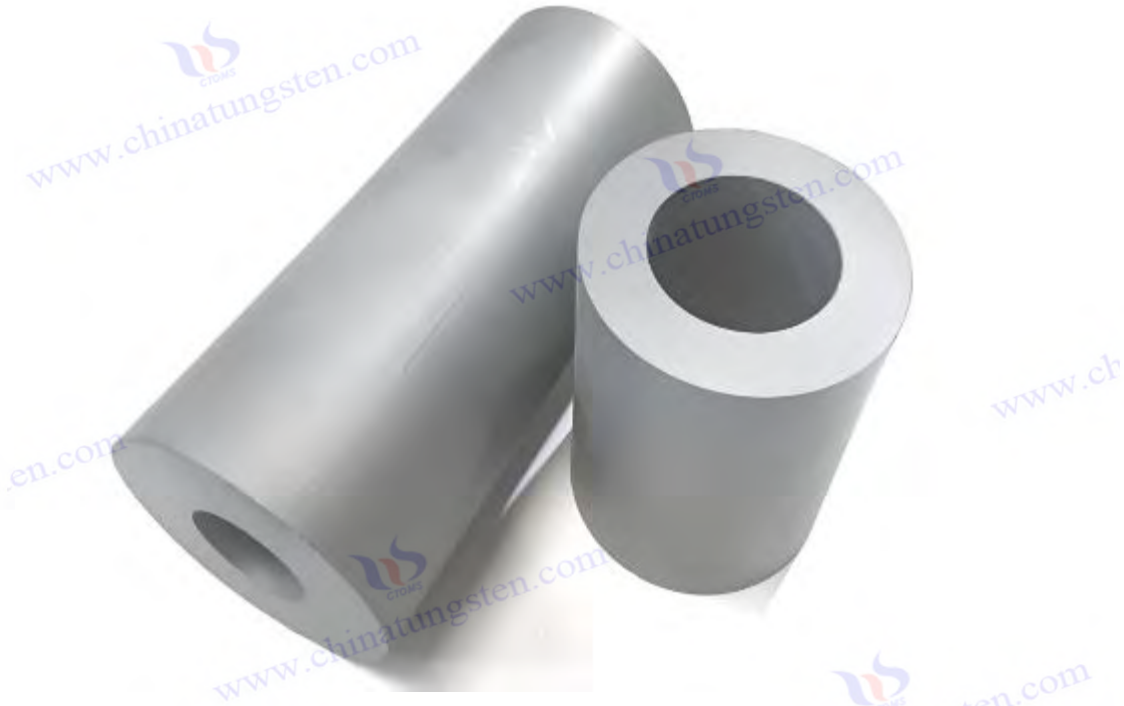
Одобрено 1 июля 2023 г. Международным комитетом ASTM G02 по износу и эрозии.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



Каковы типы и области применения твердосплавных форм?

Твердый сплав (с системой карбид вольфрама-кобальт, WC-Co, в качестве ядра) имеет высокую твердость ($HV 1800-2000 \pm 30$), отличную износостойкость (скорость износа $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), высокую термостойкость ($>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) и коррозионную стойкость (скорость коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), что делает его идеальным материалом для изготовления высокопроизводительных пресс-форм. Пресс-формы из карбида вольфрама изготавливаются методами порошковой металлургии (такими как спекание, горячее изостатическое прессование HIP) или технологиями аддитивного производства (такими как селективное лазерное плавление SLM) и широко используются в промышленных сценариях, где требуются высокая точность, длительный срок службы и сложная геометрия. Ниже приводится более конкретное и подробное обсуждение с профессиональной точки зрения типов пресс-форм и областей их применения, а также дополнительная информация в области транспортных средств на новых источниках энергии.

1. Типы твердосплавных штампов

Пресс-формы из твердого сплава подразделяются на различные типы в зависимости от их функций, конструкции, обрабатываемых объектов и соотношения материалов. Каждый тип оптимизируется посредством прецизионных процессов и обработки поверхности для удовлетворения конкретных промышленных потребностей. Ниже приведено описание типов специализированного расширения:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Твердосплавные штампы

в основном используются для штамповки, гибки, вытяжки и отбортовки металлических листов. Обычно используются сплавы WC-6%Co (низкое содержание кобальта и высокая твердость) или WC-10%Co (высокая прочность).

Профессиональные характеристики :

Диапазон твердости HV 1800-1900 $\pm$ 30, ударная вязкость 10-15 МПа·м^{1/2} $\pm$ 1 МПа·м^{1/2}, пригоден для высокоскоростной штамповки (частота >100 раз/мин $\pm$ 10 раз/мин, нагрузка >500 кН $\pm$ 50 кН).

Шероховатость поверхности Ra < 0,1 мкм $\pm$ 0,01 мкм достигалась химико-механическим полированием (ХМП, давление 5-10 кПа $\pm$ 0,5 кПа), а точность резки составляла < 0,01 мм $\pm$ 0,001 мм.

Износостойкость < 0,05 мм³/Н·м $\pm$ 0,01 мм³/Н·м, цикличность > 10⁶ раз $\pm$ 10⁴ раз, подходит для высокопрочных стальных листов (предел прочности на разрыв >1000 МПа $\pm$ 100 МПа).

Процесс производства :

мкм $\pm$ 0,01 мкм) применялось горячее изостатическое прессование (ГИП, 1300°C $\pm$ 10°C, 200 МПа $\pm$ 5 МПа).

TiN (толщина 5-15 мкм $\pm$ 0,1 мкм, твердость HV 2000 $\pm$ 50), нанесенное методом физического осаждения из паровой фазы (PVD, 400-600°C $\pm$ 10°C), снижает коэффициент трения (< 0,2 $\pm$ 0,05).

Электроискровая обработка (ЭИО, ток 5-20 А $\pm$ 1 А, точность < 0,01 мм $\pm$ 0,001 мм) для изготовления сложных контуров пуансонов и матриц.

Твердосплавные фильеры

используются для холодного волочения, глубокой вытяжки или ротационной вытяжки металлической проволоки, труб или пластин, например, для волочения проволоки, труб или глубокой вытяжки. Обычно используются сплавы WC-8%Co или WC-6%Co-Ni (2% $\pm$ 0,5%).

Профессиональные характеристики :

Износостойкость < 0,05 мм³/Н·м $\pm$ 0,01 мм³/Н·м, шероховатость внутреннего отверстия Ra < 0,05 мкм $\pm$ 0,01 мкм, прочность на вырыв опоры > 2000 МПа $\pm$ 100 МПа (например, проволока из нержавеющей стали или медная трубка).

Допуск геометрической точности составляет < 0,01 мм $\pm$ 0,001 мм, погрешность угла конуса составляет < 0,5° $\pm$ 0,1°, подходит для волочения тонкой проволоки (диаметром 0,1-5 мм $\pm$ 0,05 мм).

Термическая стабильность < 600°C $\pm$ 20°C, коэффициент теплового расширения < 6 $\times$ 10⁻⁶ /°C $\pm$ 0,5 $\times$ 10⁻⁶ /°C, снижение термической деформации.

Процесс производства :

Прецизионное шлифование (зернистость #1200-2000 $\pm$ 100, точность < 0,005 мм $\pm$ 0,001 мм) в сочетании с ультразвуковой полировкой для контроля микротрещин на поверхности (< 0,01 мкм $\pm$ 0,001 мкм).

TiC (толщина 5-10 мкм $\pm$ 0,1 мкм, прочность сцепления > 50 МПа $\pm$ 5 МПа) наносилась методом химического осаждения из паровой фазы (CVD, 800-1000 °C $\pm$ 10 °C, концентрация паров 10-20 об.% $\pm$ 1 об.%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Лазерная обработка поверхности (мощность 200-300 Вт $\pm$ 10 Вт) оптимизирует упрочненный слой во внутреннем отверстии (глубина 0,05-0,1 мм $\pm$ 0,01 мм).

Твердосплавные штампы для холодной высадки

используются для холодной штамповки болтов, гаек, заклепок или крепежных деталей с составами, такими как WC-10%Co или WC-15%Co-TiC (5% $\pm$ 0,5%).

Профессиональные характеристики :

Прочность на сжатие >4000 МПа $\pm$ 100 МПа, сопротивление усталости $>10^6$ раз $\pm$ 10^4 раз, пригоден для высоких деформаций ($>50\% \pm 5\%$) и кратковременных ударных нагрузок (>1000 кН $\pm$ 100 кН) .

Твердость поверхности HV 1900-2000 $\pm$ 30, износостойкость $<0,05$ мм³/Н $\cdot$ м $\pm$ 0,01 мм³/Н $\cdot$ м, точность полости $<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм.

Термическая стабильность $<500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, остаточные напряжения <100 МПа $\pm$ 10 МПа, предотвращают образование холодных трещин.

Процесс производства :

Искровое плазменное спекание (ИПС, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 50 МПа $\pm$ 1 МПа) обеспечило размер зерна 0,5-1 мкм $\pm$ 0,01 мкм .

Поверхностная закалка (мощность лазера 300-500 Вт $\pm$ 20 Вт, глубина 0,1-0,2 мм $\pm$ 0,01 мм) в сочетании с легированием VC (0,1%-0,5% $\pm$ 0,01%) повышает трещиностойкость.

Последующая обработка методом горячего изостатического прессования (ГИП, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 150 МПа $\pm$ 5 МПа) использовалась для устранения внутренних напряжений.

Штампы из твердосплавных материалов для горячей штамповки

используются для горячей штамповки высокотемпературных металлов (таких как сталь, титановый сплав, сплавы на основе никеля) с составом WC-10%Co-TiC (5% $\pm$ 0,5%) или WC-12%Co-TaC (2% $\pm$ 0,1%).

Профессиональные характеристики :

Потеря массы при высокотемпературной окислительной стойкости $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, циклическая долговечность при термической усталости >5000 раз $\pm$ 500 раз.

Теплопроводность >120 Вт/м $\cdot$ К $\pm$ 5 Вт/м $\cdot$ К , коэффициент теплового расширения $<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, пригоден дляковки при температуре $900-1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Прочность на сжатие >4000 МПа $\pm$ 100 МПа, стойкость к образованию термических трещин (скорость роста трещин $<0,001$ мм/цикл $\pm$ 0,0001 мм/цикл).

Процесс производства :

ГИП ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 200 МПа $\pm$ 5 МПа) с добавлением TaC (0,5%-2% $\pm$ 0,1%) для повышения стойкости к горячим трещинам, пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$.

На поверхность напыляется ZrN (5-15 мкм $\pm$ 0,1 мкм , скорость осаждения 0,1-0,5 мкм /мин $\pm$ 0,05 мкм /мин) или Al₂O₃ (антиокислительное действие, толщина 10-20 мкм $\pm$ 0,2 мкм) .

Термическая обработка отжигом ($900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, 2-4 ч $\pm$ 0,1 ч) оптимизировала однородность ткани.

Пресс-формы из твердосплавного порошка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

используются для прессования изделий из порошковой металлургии, таких как шестерни, подшипники или магнитные материалы. Обычно используются сплавы WC-6%Co-Ni ($2\% \pm 0,5\%$) или WC-8%Co-Cr ($3\% \pm 0,5\%$).

Профессиональные характеристики :

Высокая несущая способность $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, износостойкость $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, глубина опор сложной полости $10-50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$.

Степень сжатия $>2:1 \pm 0,1$, равномерность заполнения порошком $>95\% \pm 2\%$, точность прессования $<0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$.

Термическая стабильность $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, стойкость к порошковой коррозии ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$).

Процесс производства :

Прецизионное шлифование (зернистость $\#1500-3000 \pm 100$) в сочетании с плазменным напылением покрытия TiAlN (толщина $5-10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, твердость $\text{HV } 2800 \pm 50$).

Оптимизированная микроструктура ГИП ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) с размером зерна $0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Поверхностное лазерное текстурирование (глубина $5-10 \text{ мкм} \pm 0,5 \text{ мкм}$) улучшает текучесть порошка и его извлекаемость из формы.

Формы из карбидного пластика

используются для литья под давлением термопластов (таких как АБС, ПК) или термореактивных пластмасс (таких как эпоксидная смола) с формулой WC-8%Co-Cr ($2\% \pm 0,5\%$) или WC-10%Co-Ni ($3\% \pm 0,5\%$).

Профессиональные характеристики :

Термостойкость $>400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, коррозионная стойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (стойкость к коррозии за счет пластичных добавок), чистота поверхности $\text{Ra} <0,2 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$.

Устойчив к литью под высоким давлением ($>100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$), точность полости $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, подходит для сложной конструкции проточных каналов (длина $50-200 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$).

Коэффициент теплового расширения составляет $<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, что снижает деформацию при термическом цикле ($<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$).

Процесс производства :

Полость формы была изготовлена методом электроэрозионной обработки (ЭЭО, ток $10-30 \text{ А} \pm 1 \text{ А}$, точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$).

Покрытие PVD CrN ($5-10 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, твердость $\text{HV } 2000 \pm 50$) снижает адгезию пластика и сочетается с полировкой ($\text{Ra} <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$).

Термическая обработка и отпуск ($400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1-2 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$) устраняют внутренние напряжения.

Твердосплавные экструзионные фильеры

используются для непрерывной экструзии металлов или пластика, например, алюминиевых профилей или резиновых уплотнительных лент, с составом, например, WC-10%Co-VC ($0,5\% \pm 0,1\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Профессиональные характеристики :

Износостойкость $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, сопротивление деформации выдавливанием $>2000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, точность штампа $<0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$.

Подходит для экструзии на большие расстояния ($>10 \text{ м} \pm 1 \text{ м}$), скорость экструзии $1-5 \text{ м/мин} \pm 0,1 \text{ м/мин}$, температурная стабильность $<500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Коэффициент трения $<0,1 \pm 0,01$, сниженная адгезия материала (сила сцепления $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$).

Процесс производства :

Прецизионная шлифовка и горячее изостатическое прессование ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) обеспечивают внутреннюю однородность с пористостью $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Поверхностное покрытие MoS_2 ($1-5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, скорость осаждения $0,2-0,5 \text{ мкм/мин} \pm 0,05 \text{ мкм/мин}$) снижает трение.

Лазерная обработка поверхности (мощность $200-400 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$) оптимизирует упрочняющий слой (глубина $0,1-0,2 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Твердосплавные отрезные штампы

используются для точной обрезки металлических листов или тонких пластин с составом, например, $\text{WC-6\%Co-TiC}$ ($3\% \pm 0,5\%$).

Профессиональные характеристики :

Острота реза: сила резания $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$, износостойкость $>10^5 \text{ м} \pm 10^4 \text{ м}$, чистота режущей кромки $R_a <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, ударная вязкость $10-12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, подходит для вырубki тонколистового металла (толщиной $0,05-1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Термическая стабильность $<400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, уменьшенная зона термического влияния ($<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Процесс производства :

точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ в сочетании с покрытием PVD ZrN ($5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$).

Химико-механическая полировка (ХМП, давление $5-10 \text{ кПа} \pm 0,5 \text{ кПа}$) оптимизирует режущую кромку с шероховатостью $R_a <0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Низкотемпературный отпуск ($300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$) стабилизирует структуру.

Формы для литья под давлением из цементированного карбида

используются для литья под давлением цветных металлов (таких как цинковые и магниевые сплавы) с составом $\text{WC-12\%Co-TaC}$ ($2\% \pm 0,1\%$).

Профессиональные характеристики :

Сопротивление термической усталости $>4000 \text{ раз} \pm 400 \text{ раз}$, стойкость к коррозии расплавленного металла $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, сопротивление давлению в полости формы $>1500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$.

Теплопроводность $>100 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, коэффициент теплового расширения $<6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, подходит для литья под давлением при температуре $600-800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Точность полости пресс-формы составляет $<0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$, а шероховатость поверхности $R_a <0,2 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс производства :

ГИП ($1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) в сочетании с многослойным покрытием $\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (толщина $10\text{-}20 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$, твердость $\text{HV } 3000 \pm 50$).

Электроискровая обработка (ЭИО, точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) применяется для изготовления сложных полостей пресс-форм с последующей постобработкой и полировкой.

Термическая обработка отжигом ($700^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, $2\text{-}3 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$) снижает остаточные напряжения.

Твердосплавные прокатные волокна

используются для профилирования металлических листов или прутков с составом, например, $\text{WC-}10\%\text{Co-Cr}$ ($3\% \pm 0,5\%$).

Профессиональные характеристики :

Износостойкость прокатки $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, сопротивление усталости $>10^6$ раз $\pm 10^4$ раз, допуск по толщине прокатки $<0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$.

Прочность на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, термостойкость $<600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, скорость прокатки $1\text{-}10 \text{ м/с} \pm 0,1 \text{ м/с}$.

Твердость поверхности $\text{HV } 1900\text{-}2000 \pm 30$, уменьшенная текстура прокатки (высота $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$).

Процесс производства :

МПа) для оптимизации размера зерна ($0,5\text{-}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$).

Поверхностная закалка (мощность лазера $400\text{-}600 \text{ Вт} \pm 20 \text{ Вт}$, глубина $0,2\text{-}0,3 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

TiN ($5\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) методом PVD повышает долговечность.

2. Области применения твердосплавных форм

Благодаря своим превосходным физическим и химическим свойствам, пресс-формы из твердого сплава продемонстрировали широкий потенциал применения в различных отраслях промышленности. Ниже перечислены области профессионального расширения, включая недавно появившуюся область применения новых видов транспорта:

Автомобильное производство

Применение : Штампы из твердого сплава применяются для вырубки кузовных панелей (толщина $0,5\text{-}3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$), штампы холодной высадки для болтов и гаек (диаметр $5\text{-}20 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$), штампы горячей штамповки для коленчатых валов, шатунов и шестерен (масса $1\text{-}10 \text{ кг} \pm 0,5 \text{ кг}$), штампы для литья под давлением для блоков цилиндров и корпусов коробок передач (объем $0,5\text{-}5 \text{ л} \pm 0,1 \text{ л}$), прокатные штампы для формовки стальных листов (толщина $1\text{-}5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$).

Преимущества : повышение эффективности производства ($>20\% \pm 2\%$), увеличение срока службы пресс-формы до 10^6 раз $\pm 10^4$. Снижает количество ходов и затраты на техническое обслуживание ($<5\% \pm 1\%$), позволяет обрабатывать высокопрочную сталь ($>1500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$).

Аэрокосмическая промышленность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение : Штампы для горячей объемной штамповки из твердых сплавов применяются для штамповки лопаток и конструкционных деталей из титановых сплавов (температура 900-1100 °C $\pm$ 50 °C), волочильные штампы для обработки труб и сотовых конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов (диаметр 10-50 мм $\pm$ 1 мм), экструзионные штампы для изготовления авиационного крепежа (длина 20-100 мм $\pm$ 2 мм), а также литьевые штампы для изготовления деталей фюзеляжа из магниевых сплавов (вес 0,5-2 кг $\pm$ 0,1 кг).

Преимущества : высокая усталостная прочность при высоких температурах (>5000 раз $\pm$ 500 раз), высокая точность (допуск $<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм), малый вес (плотность $<2,7$ г/см³ $\pm$ 0,1 г/см³) и высокая стойкость к окислению при высоких температурах ($<0,01\%$ $\pm$ 0,001%).

Электронная промышленность

Применение : Пресс-формы из твердосплавного порошка используются для прессования сердечников микродвигателей (толщина 0,2-0,5 мм $\pm$ 0,05 мм), пластиковых форм для изготовления корпусов и разъемов мобильных телефонов (размер 100-150 мм $\pm$ 1 мм), обрезных пресс-форм для обработки печатных плат (толщина 0,1-0,3 мм $\pm$ 0,01 мм) и экструзионных пресс-форм для формования проводов (диаметр 0,05-1 мм $\pm$ 0,01 мм).

Преимущества : Высокоточное литье ($<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм), отличное качество поверхности (Ra $<0,2$ мкм $\pm$ 0,02 мкм), короткий производственный цикл (<1 ч/шт. $\pm$ 0,1 ч) и высокочастотное использование ($>10^4$ раз $\pm$ 10^3 раз).

Машиностроение и производство пресс-форм

Применение : твердосплавные фильеры для волочения проволоки (диаметр 0,1-5 мм $\pm$ 0,05 мм), штамповочные фильеры для обработки зубчатых передач и подшипников (глубина полости 10-30 мм $\pm$ 1 мм), холодновысадочные фильеры для прецизионных валов (диаметр 2-10 мм $\pm$ 0,1 мм), прокатные фильеры для стальных прутков (диаметр 5-20 мм $\pm$ 0,5 мм), литейные фильеры для сложных отливок (вес 0,1-5 кг $\pm$ 0,1 кг).

Преимущества : более длительный срок службы ($>10^6$ м $\pm$ 10^4 м длины вытягивания), сниженная частота смены ($>50\%$ $\pm$ 5%), улучшенная однородность производства (отклонение $<1\%$ $\pm$ 0,1%), поддержка материалов высокой твердости ($>HRC 50 \pm 2$).

Производство медицинских приборов

Применение : Формы из твердосплавных пластмасс применяются для формования медицинских шприцев и катетеров (толщина стенки 0,1-0,3 мм $\pm$ 0,01 мм), холодновысадочных форм для изготовления ортопедических винтов и интрамедуллярных стержней (диаметр 2-6 мм $\pm$ 0,1 мм), обрезных форм для обработки хирургических лезвий (толщина 0,05-0,1 мм $\pm$ 0,005 мм), экструзионных форм для формования катетеров (внутренний диаметр 0,5-2 мм $\pm$ 0,05 мм), пресс-форм для порошкового прессования для изготовления компонентов искусственных суставов (вес 0,1-0,5 кг $\pm$ 0,05 кг).

Преимущества : Биосовместимое покрытие (например, Ag, уровень антибактериальности $>90\%$ $\pm$ 2%), высокая точность ($<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм), соответствует требованиям стерильности (бактериальная нагрузка <10 КОЕ/см² $\pm$ 1 КОЕ/см²), срок службы $>10^5$ раз $\pm$ 10^4 раз.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Энергетика и тяжелая промышленность

Применение : штампы для горячей штамповки из карбида используются для изготовления соединителей лопастей ветряных турбин (диаметр $> 500 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$), штампов для прессования порошков для износостойких деталей (например, корпусов насосов, вес $5\text{-}20 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$), штампов для экструзии нефтяных буровых труб (диаметр $50\text{-}100 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$), штампов для литья под давлением корпусов клапанов для атомной энергетики (вес $10\text{-}50 \text{ кг} \pm 2 \text{ кг}$) и прокатных штампов для обработки рельсов (ширина $100\text{-}150 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$).

Преимущества : высокая стойкость к окислению при высоких температурах ($<0,01\% \pm 0,001\%$ при $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), прочность на сжатие ($>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), длительный срок службы ($>10^4 \text{ ч} \pm 10^3 \text{ ч}$), поддержка экстремальных условий (давление $>200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$).

Производство потребительских товаров

Применение : Формы из карбида пластика применяются для литья корпусов бытовой техники (например, корпусов телевизоров размером $500\text{-}1000 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$) и кухонной посуды (толщина $0,5\text{-}2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$), обрезные формы для обработки металлических декоративных деталей (толщина $0,1\text{-}0,5 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), экструзионные формы для изготовления дверных и оконных профилей из алюминиевых сплавов (длина $3\text{-}6 \text{ м} \pm 0,1 \text{ м}$).

Преимущества : высокая чистота поверхности ($R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$), высокая производительность ($>50 \text{ шт./ч} \pm 5 \text{ шт./ч}$) и низкий процент повторной обработки ($<2\% \pm 0,5\%$).

Здания и инфраструктура

Применение : твердосплавные прокатные штампы для формовки стальных прутков (диаметр $6\text{-}40 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$), порошковые прессовочные штампы для изготовления форм для сборного железобетона (вес $10\text{-}30 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$), экструзионные штампы для обработки алюминиевых оконных рам (длина $1\text{-}3 \text{ м} \pm 0,05 \text{ м}$), литьевые штампы для производства строительных изделий (вес $0,5\text{-}2 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$).

Преимущества : износостойкость ($>10^6 \text{ м} \pm 10^4 \text{ м}$), высокая точность ($<0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$), поддержка крупносерийного производства ($>1000 \text{ шт./день} \pm 100 \text{ шт.}$).

Оборонная и военная промышленность

Применение : Штампы горячей объемной штамповки из твердого сплава применяются для штамповки броневых листов танков (толщина $10\text{-}50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$), штампы холодной высадки для изготовления корпусов снарядов (диаметр $20\text{-}100 \text{ мм} \pm 2 \text{ мм}$), вытяжные штампы для обработки корпусов ракет (длина $0,5\text{-}2 \text{ м} \pm 0,05 \text{ м}$), а также литьевые штампы для изготовления деталей РЛС (вес $1\text{-}5 \text{ кг} \pm 0,2 \text{ кг}$).

Преимущества : высокая усталостная стойкость при высоких температурах ($>10^4 \text{ раз} \pm 10^3 \text{ раз}$), ударопрочность ($>500 \text{ Дж/см}^2 \pm 50 \text{ Дж/см}^2$), соответствие военным стандартам (MIL-STD-810).

Применение в области новых энергетических транспортных средств

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В условиях стремительного развития индустрии новых энергетических транспортных средств (NEV) формы из карбида вольфрама играют незаменимую роль в производстве ключевых компонентов электромобилей.

Твердосплавные штампы

Используется для штамповки и формовки корпусов аккумуляторных батарей (толщина $0,8-2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, например, корпус литий-железо-фосфатной батареи или тройной литиевой батареи) и деталей кузова (например, защитные пластины шасси размером $1000-2000 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$), усилие штамповки $>1000 \text{ кН} \pm 100 \text{ кН}$.

Твердосплавные штампы для холодной высадки

Изготавливать высоковольтные разъемы (диаметром $5-15 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мм}$) и валы роторов двигателей (диаметром $10-30 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$), поддерживать высокопрочные крепежные элементы ($>1500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$) и степень деформации $>40\% \pm 5\%$.

Твердосплавный штамп для горячейковки

Используется для горячей формовки токопроводящих силовых батарей (например, медная/алюминиевая фольга, толщина $0,1-0,2 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и корпусов статоров двигателей (вес $5-15 \text{ кг} \pm 0,5 \text{ кг}$), температура обработки $600-900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, нагрузка $>2000 \text{ кН} \pm 200 \text{ кН}$.

Твердосплавная экструзионная матрица

Обработка каркасов аккумуляторных батарей из алюминиевого сплава (сечение $50-100 \text{ мм}^2 \pm 2 \text{ мм}^2$) и теплоотводящих труб (длина $1-3 \text{ м} \pm 0,05 \text{ м}$), скорость экструзии $0,5-2 \text{ м/мин} \pm 0,1 \text{ м/мин}$, давление $>1500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$.

Форма для литья под давлением из карбида

Изготовление корпусов двигателей (масса $10-30 \text{ кг} \pm 1 \text{ кг}$) и корпусов загрузочных столбов (размеры $300-500 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$), прочность на давление $>1200 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, температура литья $650-750^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Твердосплавные отрезные плашки

Используется для прецизионной резки полюсных наконечников аккумуляторных батарей (толщина $0,08-0,15 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$) и пробивки выводов жгутов проводов (длина $10-50 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$), усилие резки $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$, точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Преимущества твердосплавных штампов

Высокая точность и постоянство : точность пресс-формы $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, обеспечение допусков сборки аккумуляторного модуля ($<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), повышение плотности энергии ($>160 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг} \pm 10 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$) и постоянство элементов аккумулятора $>98\% \pm 1\%$.

Износостойкость и длительный срок службы : срок службы пресс-формы $>10^6 \text{ раз} \pm 10^4$. Это снижает частоту замены ($>60\% \pm 5\%$), снижает производственные затраты ($<10\% \pm 1\%$) и обеспечивает непрерывное производство $>500 \text{ ч} \pm 50 \text{ ч}$.

Высокая термостойкость и коррозионная стойкость : штампы для горячей штамповки устойчивы к воздействию температур $900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, электролитной коррозии ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, например, раствор литиевой соли с pH 7-9) и имеют длительный срок службы ($>10^4 \text{ ч} \pm 10^3 \text{ ч}$).

Легкая опора : сочетание высокопрочного алюминиевого сплава ($>300 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) и магниевого сплава ($>200 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$) позволяет снизить вес на $10-15\% \pm 2\%$, увеличить

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

запас хода ($>500 \text{ км} \pm 20 \text{ км}$) и соответствовать стандартам NEDC.

Эффективное производство : производительность штамповки и литья под давлением >50 шт./ч ± 5 шт./ч, сокращение цикла производства деталей новых энергетических транспортных средств ($<2 \text{ ч/шт.} \pm 0,1 \text{ ч}$), поддержка крупномасштабного массового производства (>10 4 автомобилей/год ± 10 3 автомобилей).

Технические проблемы и решения :

Проблемы : Корпуса высоковольтных аккумуляторных батарей подвержены образованию микротрещин (длиной $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) во время штамповки, термическое напряжение ($>200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$) во время горячей штамповки вызывает деформацию, а литейные формы легко подвергаются коррозии под воздействием расплавленного металла (скорость эрозии $<0,02 \text{ мм/год} \pm 0,002 \text{ мм/год}$).

Решение : оптимизировать PVD- покрытие TiAlN (толщина $10\text{--}20 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$, твёрдость $\text{HV } 3200 \pm 50$) штампа для повышения трещиностойкости, использовать предварительно нагретую подложку ($200\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) для снижения термического напряжения и выполнить последующую обработку методом горячего изостатического прессования ($1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для улучшения внутренней структуры. Для повышения коррозионной стойкости в литейную форму добавить TaC ($2 \% \pm 0,1\%$) в сочетании с покрытием Al_2O_3 (толщина $15\text{--}25 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$) для замедления эрозии.

Тенденция развития : с развитием технологий твердотельных аккумуляторов и водородных топливных элементов необходимо и дальше повышать термостойкость ($>1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) и электрохимическую коррозионную стойкость ($<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) пресс-форм из цементированного карбида, а также изучать технологию 3D-печати (SLM, толщина слоя $20\text{--}50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) для производства сложных пресс-форм для каркасов аккумуляторов, поддерживающих градиентную конструкцию из нескольких материалов (градиент твердости $1800\text{--}2200 \text{ HV} \pm 50$).

3. Перспективы развития твердосплавных пресс-форм

Оптимизация материалов : разработка составов с низким содержанием кобальта (например, WC-Ni-Cr , $\text{Co} <5\% \pm 0,5\%$) или нанокompозитов (размер частиц $\text{WC} <100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$) для повышения прочности и биосовместимости.

Инновации в процессе : внедрение технологии 3D-печати (SLM, толщина слоя $20\text{--}50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$) для изготовления сложных форм в сочетании с последующей обработкой HIP ($1300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) для снижения пористости ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Интеллектуальность : встроенные датчики контролируют напряжение пресс-формы ($<50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) и температуру ($<600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) для профилактического обслуживания.

Устойчивость : использование переработанного карбидного порошка (степень повторного использования $>90\% \pm 2\%$) и низкое энергопотребление процесса (энергопотребление $<10 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} \pm 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$).

Применение твердосплавных пресс-форм в промышленности продолжает расширяться, а их высокие эксплуатационные характеристики отвечают потребностям различных отраслей: от

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

автомобилестроения до национальной обороны и транспортных средств на новых источниках энергии. В частности, быстрый рост в области транспортных средств на новых источниках энергии способствовал развитию технологий пресс-форм в направлении высокой точности, эффективности и экологичности производства. В ближайшие 5–10 лет ожидается дальнейшее развитие технологических прорывов.

4. Соответствующие стандарты для твердосплавных форм

Общие отраслевые стандарты

Технические условия и стандарты

Изготовление и применение твердосплавных волок обычно осуществляется в соответствии с «Техническими условиями на твердосплавные волокна» (регистрационный номер: 8261-2001), разработанными Государственным бюро машиностроения. Этот стандарт регламентирует свойства материала, точность размеров, износостойкость и срок службы волок и применим к изготовлению и контролю волок для волочения проволоки.

Требования к эксплуатационным характеристикам материалов

Пресс-формы из твердого сплава должны соответствовать требованиям стандартов высокой твердости (HV 1800-2000 $\pm$ 30), высокой износостойкости (скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) и высокой вязкости (стойкость к разрушению $10-15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), которые широко приняты в промышленности.

Национальные или международные стандарты

При производстве пресс-форм из твердых сплавов часто применяется стандарт «GB/T 5242-2006 Общие технические условия для твердых сплавов», который охватывает состав, испытания эксплуатационных характеристик и требования к контролю качества материалов из твердых сплавов и подходит для выбора сырья при изготовлении пресс-форм.

Стандарты ISO : стандарты ISO, такие как ISO 513 (классификация материалов для режущих инструментов) и ISO 28080 (испытания свойств твердых материалов), могут использоваться в качестве справочного материала при проектировании твердосплавных пресс-форм, особенно в экспортных проектах или проектах международного сотрудничества.

Стандарты отраслевого применения

Стандарт штамповки

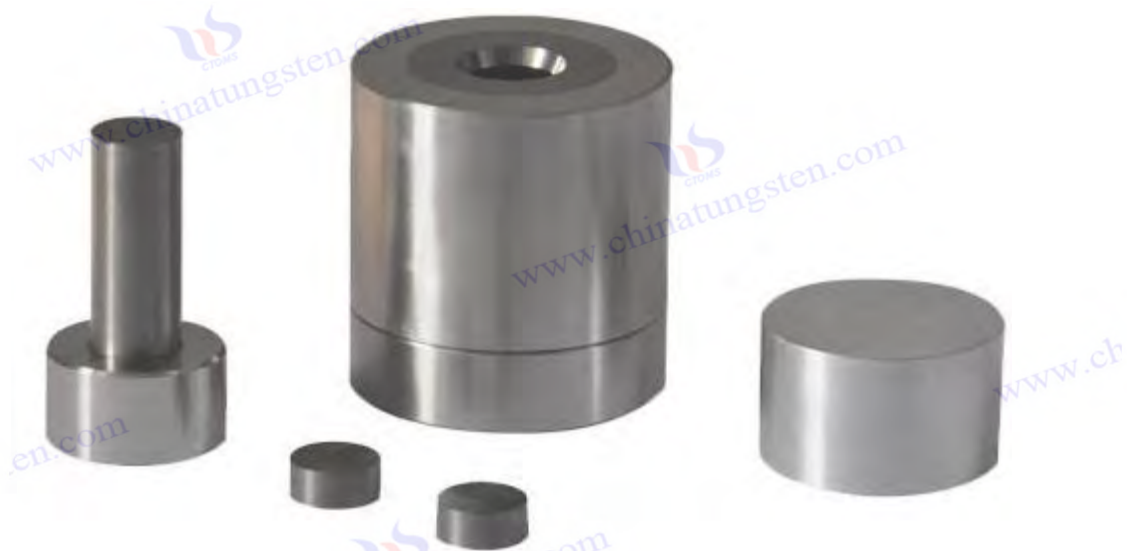
Для штампов из твердого сплава в отрасли часто применяется стандарт «JB/T 8144-2010 Технические условия для штампов», в котором определены требования к конструкции, процессу термообработки и обработке поверхности штампа для обеспечения высокой точности (допуск $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) и длительного срока службы ($> 10^6$ раз $\pm 10^4$ раз импульса).

Стандарт порошковой металлургии

Формы из твердого сплава в области порошковой металлургии могут соответствовать «Техническим условиям на формы для порошковой металлургии YB/T 5136-2006», в которых особое внимание уделяется точности полости формы ($< 0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$) и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

стойкости к давлению ($>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$).

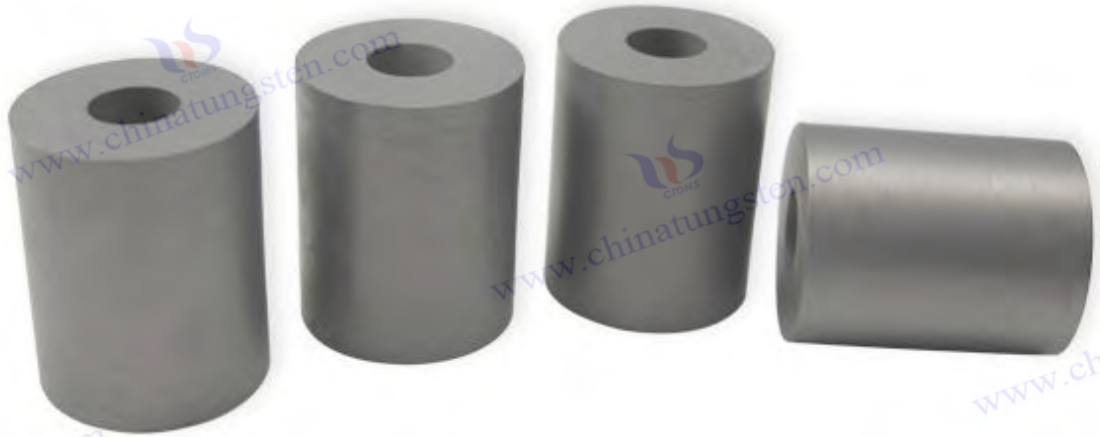


1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



JB/T 8144-2010 Технические требования к штампам

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает технические условия для штампов для холодной штамповки, включая выбор материала, требования к конструкции, процесс изготовления, технические характеристики, методы контроля, маркировку, упаковку, транспортировку и хранение. Он применим к штампам для холодной штамповки различных металлических пластин (например, стальных, алюминиевых, нержавеющей стали) и неметаллических материалов (например, пластика и резины), включая однопроцессные, композитные и многопроцессные штампы, и широко применяется в автомобильной, электронной, аэрокосмической и других отраслях промышленности.

2. Нормативные ссылки

Пункты следующих документов становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылок в настоящем стандарте. Для всех упомянутых документов с указанием дат все последующие поправки (за исключением опечаток) или пересмотры не применимы к настоящему стандарту, однако рекомендуется принять новую версию документа в соответствии с результатами исследований.

GB/T 5242-2006 Общие технические условия на твердый сплав

GB/T 6110-2021 Волоочильные фильеры. Конструктивные типы и размеры твердосплавных волоочильных фильеров

《Технические характеристики фильеры для волочения из твердого сплава JB/T 3943-2017》

GB/T 1804-2000 Допуски и посадки. Предельные отклонения и основные отклонения линейных размеров

3. Термины и определения

Штамповочный штамп: инструмент, используемый для придания материалу желаемой формы путем давления, включающий матрицу, пуансон и направляющую.

Срок службы штамповки: способность формы сохранять стабильные эксплуатационные характеристики при определенном количестве штамповок.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Точность сборки: допуски посадки и точность относительного расположения различных компонентов формы.

4. Требования к материалам

4.1 Материал формы

Твердый сплав: система WC-Co (например, WC-6%Co, WC-10%Co), твердость HV 1800-2000 ± 30 , прочность на сжатие >4000 МПа ± 100 МПа.

Сталь: Cr12MoV, сталь D2 или H13, твердость HRC 58-62 ± 2 , закаленная и отпущенная.

Нерабочие части: Изготовлены из стали 45# или стали Q235, твердость HRC 30-40 ± 2 после термообработки.

4.2 Требования к производительности

Износостойкость: скорость износа $<0,05$ мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м, испытано согласно GB/T 12444.

Теплостойкость: рабочая температура $<600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплового расширения $<6 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Усталостная прочность: Усталостная долговечность $>10^6$ раз $\pm 10^4$ раз, испытание согласно GB/T 3075.

4.3 Обработка поверхности

Дополнительное покрытие: TiN, Покрытие TiC или CrN, толщина 5-15 мкм $\pm 0,1$ мкм, твердость HV 2000-3000 ± 50 , прочность сцепления >50 МПа ± 5 МПа, с использованием процесса PVD или CVD.

5. Технические требования

5.1 Требования к проектированию

Тип конструкции: включая однопроцессные, составные и последовательные штампы, разработанные в соответствии со стандартом GB/T 6397.

Класс допуска: Допуск линейных размеров соответствует GB/T 1804 IT6-IT8, геометрический допуск круглости $<0,005$ мм $\pm 0,001$ мм.

Точность наведения: Зазор между направляющей колонкой и направляющей втулкой составляет 0,005-0,01 мм $\pm 0,001$ мм.

5.2 Размер и точность

формы: Согласно требованиям чертежа детали максимальный наружный диаметр составляет ≤ 500 мм $\pm 0,1$ мм, а высота ≤ 300 мм $\pm 0,1$ мм.

Допуск рабочей части: зазор пробивки 0,01-0,05 мм $\pm 0,005$ мм, регулируется в зависимости от толщины листа.

Точность сборки: относительная погрешность положения $<0,02$ мм $\pm 0,002$ мм.

5.3 Качество поверхности

Шероховатость рабочей поверхности Ra $< 0,2$ мкм $\pm 0,02$ мкм, достигается методом прецизионной шлифовки или полировки.

На поверхности отсутствуют трещины, поры и царапины, а максимальный размер дефектов составляет $<0,01$ мм $\pm 0,001$ мм.

5.4 Показатели эффективности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ресурс штамповки: $>500\ 000$ раз $\pm 10\ 4$ раз (в зависимости от материала и условий штамповки), износ $<0,1$ мм $\pm 0,01$ мм.

Точность штамповки: допуск размера детали $\pm 0,05$ мм $\pm 0,005$ мм, шероховатость поверхности Ra $<0,8$ мкм $\pm 0,1$ мкм.

6. Производственный процесс

6.1 Подготовка сырья

Порошок твердого сплава: размер частиц WC $0,5-2$ мкм $\pm 0,1$ мкм, погрешность содержания Co $\pm 0,5\%$, смешанный с помощью шаровой мельницы (скорость $200-300$ об/мин ± 10 об/мин, время $24-48$ ч ± 1 ч).

Предварительная обработка стали: Отжиг для снятия внутренних напряжений, твердость HRC $20-25 \pm 2$.

6.2 Процесс формования

Твердый сплав: Холодное изостатическое прессование (ХИП, 200 МПа ± 5 МПа) или литье под давлением, плотность сырого тела $>60\% \pm 2\%$ теоретической плотности.

Сталь: кованая или литая, степень ковкости $\geq 4:1$.

6.3 Спекание и термообработка

Твердый сплав: горячее изостатическое прессование (ГИП, $1300-1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 200 МПа ± 5 МПа), пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Сталь: закалка ($1000-1050^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, охлаждение в масле) + отпуск ($200-250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $2-3$ ч $\pm 0,1$ ч), твердость HRC $58-62 \pm 2$.

6.4 Отделка

Рабочие детали изготавливаются методом электроискровой обработки (ЭИ, ток $5-20$ А ± 1 А) с точностью $<0,01$ мм $\pm 0,001$ мм.

Прецизионная шлифовка (зернистость $\#1200-3000 \pm 100$) или ультразвуковая полировка, контроль шероховатости поверхности Ra $<0,2$ мкм $\pm 0,02$ мкм.

6.5 Сборка

Направляющая устанавливается методом запрессовки с зазором $0,005-0,01$ мм $\pm 0,001$ мм и моментом затяжки болтов $50-100$ Н·м ± 5 Н·м.

7. Методы проверки

7.1 Размеры и точность

Допуск соответствует классу точности IT6-IT8 стандарта GB/T 1182 при контроле с помощью координатно-измерительной машины (КИМ).

7.2 Свойства материала

Испытание на твердость проводится в соответствии с GB/T 231.1, испытание на прочность при сжатии проводится в соответствии с GB/T 3852, а испытание на износостойкость проводится в соответствии с GB/T 12444.

Теплопроводность соответствует стандарту ASTM E1461, а коэффициент теплового расширения — стандарту ISO 17864.

7.3 Качество поверхности

Дефекты проверялись с помощью оптической микроскопии (увеличение $500\times \pm 50\times$) или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), при этом максимальный размер дефекта составлял $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

7.4 Срок службы штамповки

Испытание проводилось на стандартной пробивной машине с использованием стандартных материалов (например, стальной пластины SPCC толщиной 1 мм, скорость пробивки 20-50 раз/мин ± 2 раза/мин), а количество пробивок регистрировалось до тех пор, пока износ не достигал $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

8. Условия испытаний

Температура среды проведения испытаний: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, влажность $50\%-70\% \pm 5\%$.

Нагрузка штамповки: $500-2000 \text{ кН} \pm 50 \text{ кН}$, регулируется в соответствии со спецификациями формы.

9. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

9.1 Логотип

На заводской табличке на поверхности формы указаны: номер формы, технические характеристики (наружный диаметр $\times$ высота в мм), усилие штамповки, дата изготовления, название производителя, высота символов составляет $3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

9.2 Упаковка

Для упаковки используйте ударопрочную пену и антикоррозийную бумагу, положите в деревянные или металлические коробки и наклейте на внутренней стороне коробки надписи «Обращаться с осторожностью» и «Влагонепроницаемо».

9.3 Транспорт

Избегайте воздействия сильных вибраций и высоких температур ($>50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). Транспортное средство должно быть оборудовано амортизирующими устройствами.

9.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом месте при температуре $0-40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ и влажности воздуха $<60\% \pm 5\%$. Избегать контакта с кислотными и щелочными веществами.

10. Эксплуатация и обслуживание

10.1 Требования к использованию

Перед штамповкой разогрейте форму до $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, чтобы уменьшить тепловой удар. Используйте штамповочное масло, соответствующее стандарту GB/T 7326, с вязкостью $20-50 \text{ сСт} \pm 5 \text{ сСт}$.

10.2 Техническое обслуживание

Регулярно проверяйте износ рабочей поверхности, каждые $10^4 \pm 10^3$ ударов.

Если величина износа составляет $>0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, своевременно отполируйте или замените его.

10.3 Стандарты утилизации

Если износ рабочей поверхности составляет $>0,2 \text{ мм} \pm 0,02 \text{ мм}$ или длина трещины составляет $>0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, деталь признается годной к браку.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11. Обеспечение качества

Норма отбора проб для каждой партии пресс-форм составляет $\geq 5\% \pm 1\%$, а норма отбора составляет $>95\% \pm 2\%$.

Предоставьте сертификаты материалов и отчеты о проверках, включая данные испытаний производительности и записи проверки размеров.

12. Приложение (информационное)

Справочник параметров процесса штамповки

Скорость пробивки: 20-100 раз/мин ± 2 раза/мин.

Зазор: При толщине пластины 0,5-2 мм зазор составляет 0,01-0,05 мм $\pm 0,005$ мм.

Типичные дефекты и решения

Трещина: Отрегулируйте температуру термообработки или увеличьте скорость охлаждения при закалке.

Деформация: оптимизируйте конструкцию пресс-формы и повысьте точность направления.

Настоящее техническое условие полностью соответствует основным требованиям «JB/T 8144-2010», сочетает в себе характеристики твердых сплавов и других материалов, обеспечивает работоспособность штампов с точки зрения высокой точности, большого срока службы и высокой надежности.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Волоочильные фильеры из карбида

Технические условия

Полные, всеобъемлющие и подробные «Технические условия для твердосплавных волок» составлены на основе действующих стандартов (таких как «JB/T 3943-2017 Технические условия для твердосплавных волок» и связанных с ними отраслевых спецификаций) и отраслевой практики. Эти технические условия призваны стандартизировать выбор материала, процесс изготовления, требования к эксплуатационным характеристикам, методам контроля и требованиям к обслуживанию твердосплавных волок для обеспечения их высокой производительности и надежности при волочении проволоки.

1. Область применения

Настоящее техническое условие распространяется на изготовление, проверку и использование волоочильных фильер из твердого сплава, включая волоочильные фильеры, используемые для холодного волочения металлической проволоки (например, стальной проволоки, медной проволоки, проволоки из нержавеющей стали и т. д.), и применимо к волоочильным фильерам диаметром от 0,1 мм до 20 мм $\pm$ 0,05 мм.

2. Нормативные ссылки

Пункты в следующих документах становятся пунктами настоящего технического условия посредством ссылки в настоящем техническом условии. Для всех упомянутых документов с указанием дат все последующие поправки (за исключением опечаток) или пересмотры не применимы к настоящему техническому условию, однако рекомендуется принять новую версию документа в соответствии с результатами исследований.

GB/T 5242-2006 Общие технические условия на твердый сплав

«Технические характеристики фильеры для волочения из твердого сплава JB/T 3943-2017»

GB/T 6110-2021 Волоочильные фильеры. Конструктивные типы и размеры твердосплавных волоочильных фильеров

3. Термины и определения

Волоочильный волок: кольцевой или конический волок, изготовленный из твердосплавного материала, используемый для уменьшения диаметра металлической проволоки в процессе волочения.

Угол рабочего конуса: Угол конической части внутреннего отверстия формы, который влияет на усилие вытягивания и качество поверхности.

Срок службы: способность штампа сохранять стабильную производительность в течение заданной длины вытяжки или определенного количества раз.

4. Требования к материалам

4.1 Состав материала

Матрица пресс-формы изготовлена из системы карбид вольфрама-кобальт (WC-Co), рекомендуемое соотношение составляет WC-6%Co, WC-8%Co или WC-10%Co, а погрешность содержания кобальта составляет $\pm 0,5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В зависимости от характеристик вытягиваемого материала (например, высокоуглеродистой стали или медного сплава) для улучшения износостойкости и термостойкости можно добавлять небольшое количество армирующих фаз, таких как TiC ($0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) или TaC ($0,5\%-1\% \pm 0,1\%$).

4.2 Физические свойства

Твердость: HV 1800–2000 ± 30 . Метод испытания соответствует GB/T 3850.

Плотность: 14,5–15,0 г/см³ $\pm 0,2$ г/см³, метод испытаний согласно GB/T 3851.

Прочность на сжатие: >4000 МПа ± 100 МПа, метод испытаний согласно GB/T 3852.

Вязкость разрушения: 10–15 МПа·м^{1/2} ± 1 МПа·м^{1/2}, метод испытаний по GB/T 21068.

4.3 Химическая стабильность

Коррозионная стойкость: Погружение в 0,9% раствор NaCl на 24 ч ± 1 ч, скорость коррозии <0,01 мм/год $\pm 0,001$ мм/год.

Стойкость к окислению: потеря массы <0,01% $\pm 0,001\%$ при 800°C $\pm 20^\circ\text{C}$.

5. Технические требования

5.1 Размеры и допуски

формы : 10–50 мм $\pm 0,1$ мм, высота: 5–30 мм $\pm 0,1$ мм.

Диаметр рабочего отверстия: 0,1–20 мм $\pm 0,01$ мм, угол конуса: 6°–15° $\pm 0,5^\circ$, в соответствии с типами и размерами, указанными в GB/T 6110–2021.

Геометрические допуски: круглость <0,005 мм $\pm 0,001$ мм, цилиндричность <0,01 мм $\pm 0,001$ мм.

5.2 Качество поверхности

Шероховатость рабочей поверхности Ra < 0,1 мкм $\pm 0,01$ мкм достигается методом прецизионного шлифования или химико-механического полирования (ХМП).

На поверхности отсутствуют трещины, поры и включения, а максимальный размер дефектов составляет <0,01 мм $\pm 0,001$ мм.

5.3 Требования к производительности

Срок службы: Длина вытяжки > 10⁶ м $\pm 10^4$ м (в зависимости от вытягиваемого материала), скорость износа < 0,05 мм³/Н·м $\pm 0,01$ мм³/Н·м.

Термическая стабильность: рабочая температура <600°C $\pm 20^\circ\text{C}$, коэффициент теплового расширения <6 $\times 10^{-6}$ /°C $\pm 0,5 \times 10^{-6}$ /°C.

Точность волочения: допуск диаметра проволоки < $\pm 0,01$ мм $\pm 0,001$ мм, шероховатость поверхности Ra <0,4 мкм $\pm 0,05$ мкм.

5.4 Покрытие (опционально)

TiN, Покрытия TiC или CrN могут быть нанесены методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) или химического осаждения из паровой фазы (CVD) толщиной 5–15 мкм $\pm 0,1$ мкм, твердостью HV 2000–3000 ± 50 и прочностью сцепления >50 МПа ± 5 МПа.

6. Производственный процесс

6.1 Подготовка сырья

высококачественные порошки WC (размер частиц 0,5–2 мкм $\pm 0,1$ мкм) и Co, а однородность смешивания составляла >95% $\pm 2\%$, что достигалось путем измельчения в шаровой мельнице

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(скорость 200-300 об./мин $\pm$ 10 об./мин, время 24-48 ч $\pm$ 1 ч).

6.2 Процесс формования

Используется холодное изостатическое прессование (ХИП, 200 МПа $\pm$ 5 МПа) или литье под давлением, при этом плотность сырого тела составляет $>60\% \pm 2\%$ от теоретической плотности.

6.3 Процесс спекания

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 1300-1400°C $\pm$ 10°C, 200 МПа $\pm$ 5 МПа) или спекание в поле (СПС, 1350°C $\pm$ 10°C, 50 МПа $\pm$ 1 МПа) для обеспечения пористости $<0,1\% \pm 0,01\%$ и размера зерна 0,5-1 мкм $\pm$ 0,01 мкм.

6.4 Отделка

Внутреннее отверстие выполнено методом электроэрозионной обработки (ЭЭО, ток 5-20 А $\pm$ 1 А) с точностью $<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм.

Прецизионная шлифовка (зернистость #1200-3000 $\pm$ 100) или ультразвуковая полировка, контроль шероховатости поверхности Ra $< 0,1$ мкм $\pm$ 0,01 мкм.

6.5 Термическая обработка

Отжиг (400-600°C $\pm$ 10°C, 2-4 ч $\pm$ 0,1 ч) устраняет внутренние напряжения, а остаточные напряжения составляют <100 МПа $\pm$ 10 МПа.

7. Методы проверки

7.1 Размерная и геометрическая точность

Допуск соответствует уровню IT6, указанному в GB/T 1182 при испытании с использованием координатно-измерительной машины (КИМ).

7.2 Свойства материала

Испытание на твердость проводится в соответствии с GB/T 3850, плотность — в соответствии с GB/T 3851, а прочность на сжатие — в соответствии с GB/T 3852.

Вязкость разрушения соответствует стандарту GB/T 21068, а теплопроводность — стандарту ASTM E1461.

7.3 Качество поверхности

Дефекты проверялись с помощью оптического микроскопа (увеличение 500 $\times$ $\pm$ 50 $\times$) или сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), при этом максимальный размер дефекта составлял $<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм.

7.4 Срок службы

Испытание проводят на стандартной волоочильной машине с использованием стандартных волоочильных материалов (например, стальной проволоки диаметром 1 мм, скорости волочения 1–5 м/с $\pm$ 0,1 м/с), и регистрируют длину волочения до тех пор, пока износ не достигнет 0,05 мм $\pm$ 0,01 мм.

8. Условия испытаний

Температура среды проведения испытаний: 20-25°C $\pm$ 2°C, влажность 50%-70% $\pm$ 5%.

Испытательная нагрузка на вырыв: 500-2000 Н $\pm$ 50 Н, регулируется в соответствии со спецификациями пресс-формы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

9.1 Логотип

На заводской табличке на поверхности пресс-формы указаны: номер пресс-формы, технические характеристики (диаметр × высота в мм), дата изготовления, наименование производителя. Высота символов составляет $3\text{ мм} \pm 0,1\text{ мм}$ и должна быть хорошо видна.

9.2 Упаковка

Для упаковки используйте ударопрочный пенопласт и антикоррозионную бумагу, положите в деревянные или пластиковые ящики и наклейте на внутренней стороне ящика надпись «Обращаться с осторожностью».

9.3 Транспорт

Избегайте воздействия сильных вибраций и высоких температур ($>50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). Транспортное средство должно быть оборудовано амортизирующими устройствами.

9.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом месте при температуре $0-40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ и влажности воздуха $<60\% \pm 5\%$. Избегать контакта с кислотными и щелочными веществами.

10. Эксплуатация и обслуживание

10.1 Требования к использованию

Перед волочением предварительно нагрейте пресс-форму до температуры $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, чтобы снизить тепловой удар.

В качестве смазочного материала для волочения используется масло для волочения, соответствующее стандарту GB/T 7326 и имеющее вязкость $20-50\text{ сСт} \pm 5\text{ сСт}$.

10.2 Техническое обслуживание

Регулярно проверяйте износ рабочего отверстия, каждые $10^5\text{ м} \pm 10^4\text{ м}$ длины протяжки.

Если величина износа составляет $>0,05\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$, своевременно отполируйте или замените его.

10.3 Стандарты утилизации

Если диаметр рабочего отверстия увеличится более чем на $0,1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$ или длина поверхностной трещины составит более $0,05\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$, то деталь будет считаться бракованной.

11. Обеспечение качества

Норма отбора проб для каждой партии пресс-форм составляет $\geq 5\% \pm 1\%$, а норма отбора составляет $>95\% \pm 2\%$.

Предоставьте сертификаты материалов и отчеты о проверках, включая данные испытаний производительности и записи проверки размеров.

12. Приложение (информационное)

Справочник параметров процесса рисования

Скорость протягивания: $1-10\text{ м/с} \pm 0,1\text{ м/с}$.

Степень измельчения: $10\%-25\% \pm 2\%$ в зависимости от материала.

Типичные дефекты и решения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Трещины: отрегулируйте температуру спекания или увеличьте давление горячего прессования. Пористость: оптимизируйте смешивание порошка или улучшите плотность спекания.

Данное техническое условие объединяет действующие стандарты (например, JB/T 3943-2017) и отраслевую практику, чтобы гарантировать, что твердосплавные волоочильные фильеры обладают высокой надежностью и стабильностью характеристик, производства и использования.

YB/T 5136-2006

Технические требования к формам для порошковой металлургии

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает технические условия на пресс-формы для порошковой металлургии, включая выбор материала, требования к конструкции, процесс изготовления, технические характеристики, методы контроля, маркировку, упаковку, транспортировку и хранение. Он применим к пресс-формам, используемым в процессах прессования в порошковой металлургии, включая твердосплавные или стальные пресс-формы для прессования зубчатых передач, подшипников, магнитных материалов и других изделий, и широко применяется в автомобильной, электронной, машиностроительной и других отраслях промышленности.

2. Нормативные ссылки

Пункты следующих документов становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылок в настоящем стандарте. Для всех упомянутых документов с указанием дат все последующие поправки (за исключением опечаток) или пересмотры не применимы к настоящему стандарту, однако рекомендуется принять новую версию документа в соответствии с результатами исследований.

GB/T 5242-2006 Общие технические условия на твердый сплав

GB/T 6110-2021 Волоочильные фильеры. Конструктивные типы и размеры твердосплавных волоочильных фильеров

«Технические характеристики фильеры для волочения из твердого сплава JB/T 3943-2017»

GB/T 1804-2000 Допуски и посадки. Предельные отклонения и основные отклонения линейных размеров

3. Термины и определения

Форма для порошковой металлургии: инструмент, используемый для формования металлического порошка или композиционного порошка путем прессования под высоким давлением, включающий верхнюю форму, нижнюю форму и гильзу формы.

Срок службы прессования: способность пресс-формы сохранять стабильные рабочие характеристики при определенном количестве циклов прессования.

Равномерность заполнения: Равномерность распределения порошка в полости формы напрямую влияет на плотность изделия.

4. Требования к материалам

4.1 Материал формы

Твердый сплав: система WC-Co (например, WC-6%Co, WC-8%Co или WC-10%Co), твердость HV 1800-2000 $\pm$ 30, прочность на сжатие >4000 МПа $\pm$ 100 МПа.

Сталь: Cr12MoV, сталь D2 или H13, твердость HRC 58-62 $\pm$ 2, закаленная и отпущенная.

Нерабочие части: Изготовлены из стали 40Cr или 45#, твердость HRC 30-40 $\pm$ 2 после термообработки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

4.2 Требования к производительности

Износостойкость: скорость износа $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, испытано согласно GB/T 12444.

Стойкость к давлению: Максимальное давление $>3000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, испытано в соответствии с GB/T 3852.

Усталостная прочность: Усталостная долговечность $>10^6$ раз $\pm 10^4$ раз, испытание согласно GB/T 3075.

4.3 Обработка поверхности

Дополнительное покрытие: TiN, Покрытие TiC или Al_2O_3 , толщина $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, твердость HV 2000-3000 ± 50 , прочность сцепления $>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$, с использованием процесса PVD или CVD.

5. Технические требования

5.1 Требования к проектированию

Тип конструкции: включая пресс-формы одностороннего прессования, двухстороннего прессования и многоместные пресс-формы, спроектированные в соответствии со стандартом GB/T 6406.

Класс допуска: Допуск линейных размеров соответствует GB/T 1804 IT6-IT8, геометрический допуск параллельности $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

наведения: Зазор между направляющей колонкой и направляющей втулкой составляет $0,005-0,015 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

5.2 Размер и точность

формы: Согласно требованиям чертежа детали максимальный наружный диаметр составляет $\leq 400 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, а высота $\leq 250 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Размеры полости: допуск $\leq \pm 0,02 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$, глубина $10-50 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$.

Точность сборки: относительная погрешность положения $<0,03 \text{ мм} \pm 0,002 \text{ мм}$.

5.3 Качество поверхности

Шероховатость рабочей поверхности $R_a < 0,2 \text{ мкм} \pm 0,02 \text{ мкм}$, достигается методом прецизионной шлифовки или полировки.

На поверхности отсутствуют трещины, поры и включения, а максимальный размер дефектов составляет $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

5.4 Показатели эффективности

Ресурс прессования: $>500\,000$ раз $\pm 10^4$ раз (в зависимости от материала порошка и давления), износ $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

Точность прессования: допуск по плотности изделия $\pm 2\% \pm 0,5\%$, допуск по размерам $\pm 0,05 \text{ мм} \pm 0,005 \text{ мм}$.

Равномерность наполнения: $>95\% \pm 2\%$, протестировано в соответствии с YB/T 5120.

6. Производственный процесс

6.1 Подготовка сырья

Порошок твердого сплава: размер частиц WC $0,5-2 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, погрешность содержания Co $\pm 0,5\%$, смешанный с помощью шаровой мельницы (скорость 200-300 об/мин ± 10 об/мин,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

время 24-48 ч $\pm$ 1 ч) .

Предварительная обработка стали: Отжиг для снятия внутренних напряжений, твердость HRC 20-25 $\pm$ 2.

6.2 Процесс формования

Твердый сплав: Холодное изостатическое прессование (ХИП, 200 МПа $\pm$ 5 МПа) или литье под давлением, плотность сырого тела $>60\% \pm 2\%$ теоретической плотности.

Сталь: кованая или литая, степеньковки $\geq 4:1$.

6.3 Спекание и термообработка

Твердый сплав: горячее изостатическое прессование (ГИП, 1300-1400°C $\pm$ 10°C, 200 МПа $\pm$ 5 МПа), пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Сталь: закалка (1000-1050°C $\pm$ 10°C, охлаждение в масле) + отпуск (200-250°C $\pm$ 10°C, 2-3 ч $\pm$ 0,1 ч), твердость HRC 58-62 $\pm$ 2.

6.4 Отделка

Полость формы была изготовлена методом электроэрозионной обработки (ЭИ, ток 5-20 А $\pm$ 1 А) с точностью $<0,02$ мм $\pm$ 0,002 мм.

Прецизионная шлифовка (зернистость #1200-3000 $\pm$ 100) или ультразвуковая полировка, контроль шероховатости поверхности Ra $< 0,2$ мкм $\pm$ 0,02 мкм .

6.5 Сборка

Направляющая устанавливается методом запрессовки с зазором 0,005-0,015 мм $\pm$ 0,001 мм и моментом затяжки болтов 50-80 Н·м $\pm$ 5 Н·м .

7. Методы проверки

7.1 Размеры и точность

Допуск соответствует классу точности IT6-IT8 стандарта GB/T 1182 при контроле с помощью координатно-измерительной машины (КИМ).

7.2 Свойства материала

Испытание на твердость проводится в соответствии с GB/T 231.1, испытание на прочность при сжатии проводится в соответствии с GB/T 3852, а испытание на износостойкость проводится в соответствии с GB/T 12444.

Теплопроводность соответствует стандарту ASTM E1461, а коэффициент теплового расширения — стандарту ISO 17864.

7.3 Качество поверхности

Дефекты проверялись с помощью оптической микроскопии (увеличение 500 $\times$ $\pm$ 50 $\times$) или сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), при этом максимальный размер дефекта составлял $< 0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм.

7.4 Срок службы прессования

Испытание проводилось на стандартном прессе для порошковой металлургии с использованием стандартного железного порошка (например, ASC 100.29, давление 500-1000 МПа $\pm$ 50 МПа), и количество прессований фиксировалось до тех пор, пока износ не достигал 0,1 мм $\pm$ 0,01 мм.

8. Условия испытаний

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Температура среды проведения испытаний: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, влажность $50\%-70\% \pm 5\%$.

Усилие прессования: $500-2000 \text{ кН} \pm 50 \text{ кН}$, регулируется в соответствии с характеристиками пресс-формы.

9. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

9.1 Логотип

На заводской табличке на поверхности пресс-формы указаны: номер пресс-формы, технические характеристики (наружный диаметр $\times$ высота в мм), усилие прессования, дата изготовления, название производителя, высота символов составляет $3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

9.2 Упаковка

Для упаковки используйте ударопрочную пену и антикоррозийную бумагу, положите в деревянные или металлические коробки и наклейте на внутренней стороне коробки надписи «Обращаться с осторожностью» и «Влагонепроницаемо».

9.3 Транспорт

Избегайте воздействия сильных вибраций и высоких температур ($>50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). Транспортное средство должно быть оборудовано амортизирующими устройствами.

9.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом месте при температуре $0-40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ и влажности воздуха $<60\% \pm 5\%$. Избегать контакта с кислотными и щелочными веществами.

10. Эксплуатация и обслуживание

10.1 Требования к использованию

Перед прессованием разогрейте форму до температуры $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, чтобы уменьшить тепловой удар.

Используйте прессовое масло, соответствующее GB/T 7326, с вязкостью $20-50 \text{ сСт} \pm 5 \text{ сСт}$.

10.2 Техническое обслуживание

Регулярно проверяйте износ полости штампа, каждые $10^4 \pm 10^3$ прессований.

Если величина износа составляет $>0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, своевременно отполируйте или замените его.

10.3 Стандарты утилизации

Если износ раковины составляет $>0,2 \text{ мм} \pm 0,02 \text{ мм}$ или длина трещины составляет $>0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, изделие считается годным к использованию.

11. Обеспечение качества

Норма отбора проб для каждой партии пресс-форм составляет $\geq 5\% \pm 1\%$, а норма отбора составляет $>95\% \pm 2\%$.

Предоставьте сертификаты материалов и отчеты о проверках, включая данные испытаний производительности и записи проверки размеров.

12. Приложение (информационное)

Справочник параметров процесса прессования

Давление прессования: $500-1000 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Степень сжатия: от 2:1 до 4:1 $\pm 0,1$ в зависимости от характеристик пороха.

Типичные дефекты и решения

Трещина: Отрегулируйте температуру спекания или увеличьте давление ГИП.

Неравномерная плотность: оптимизируйте процесс заполнения порошком и увеличьте время вибрации (10-20 с ± 1 с).

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

GB/T 6110-2021

Вытяжной штамп

Волоочильные фильеры из карбида

Тип и размер конструкции

1. Область применения

Настоящий стандарт определяет тип конструкции, размерные характеристики и связанные с ними технические требования к твердосплавным волокам для волочения. Он применим к волокам, используемым в процессе холодного волочения металлической проволоки (например, стальной, медной, нержавеющей и т.д.), охватывая волокна диаметром от 0,1 мм до 20 мм $\pm 0,05$ мм, и широко применяется в металлообработке, электронной, автомобильной и других отраслях промышленности.

2. Нормативные ссылки

Пункты следующих документов становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылок в настоящем стандарте. Для всех упомянутых документов с указанием дат все последующие поправки (за исключением опечаток) или пересмотры не применимы к настоящему стандарту, однако рекомендуется принять новую версию документа в соответствии с результатами исследований.

GB/T 5242-2006 Общие технические условия на твердый сплав

«Технические характеристики фильеры для волочения из твердого сплава JB/T 3943-2017»

GB/T 1804-2000 Допуски и посадки. Предельные отклонения и основные отклонения линейных размеров

3. Термины и определения

Волоочильный волок: кольцевой или конический волок, изготовленный из твердосплавного материала, используемый для уменьшения диаметра металлической проволоки в процессе волочения.

Угол рабочего конуса: Угол конической части внутреннего отверстия формы, который влияет на усилие вытягивания и качество поверхности.

Направляющая область: область внутри отверстия фильеры, используемая для направления проволоки с целью обеспечения стабильности волочения.

4. Тип конструкции

4.1 Базовая структура

Волоочильные штампы обычно состоят из следующих функциональных зон:

Зона входа: введите в фильеру проволоку длиной 0,5-1 мм $\pm 0,1$ мм, угол конуса 20° - $30^{\circ} \pm 2^{\circ}$.

Зона смазки: обеспечивает хранение смазки, длина 0,5-1,5 мм $\pm 0,1$ мм, угол конуса 10° - $20^{\circ} \pm 1^{\circ}$.

Рабочая область конуса: основная область деформации вытяжки, длина 0,5-2 мм $\pm 0,1$ мм, угол конуса 6° - $15^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$.

Зона калибровки: Контроль конечного диаметра, длина 0,2-0,8 мм $\pm 0,05$ мм, допуск диаметра

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Зона выхода: защитить поверхность провода, длина $0,2-0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, угол конуса $30^\circ-45^\circ \pm 2^\circ$.

4.2 Классификация

Одноканальная матрица: одно рабочее отверстие, подходит для небольших партий или отдельных чертежей спецификаций, максимальный диаметр $20 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$.

Многоотверстийная матрица: несколько рабочих отверстий, подходящих для непрерывной вытяжки, расстояние между отверстиями $\geq 2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$.

Комбинированная фильера: модульная конструкция, сменные рабочие части, адаптируемость к различным спецификациям проволоки.

5. Размеры

5.1 Размеры

Внешний диаметр: $10-50 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, рекомендуемые характеристики: 15 мм , 20 мм , 25 мм , 30 мм , 40 мм .

Высота: $5-30 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, рекомендуемые параметры: 10 мм , 15 мм , 20 мм , 25 мм .

Толщина: $3-15 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ в зависимости от диаметра и области применения.

5.2 Размер внутреннего отверстия

Минимальная апертура: $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, максимальная апертура $20 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$.

Длина рабочего конуса: $0,5-2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, соотношение длины к апертуре от 1:1 до 1:5.

Длина калибровочной зоны: $0,2-0,8 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, соотношение длины к апертуре от 1:2 до 1:10.

5.3 Допуски и посадки

Допуск линейных размеров: в соответствии с классом GB/T 1804 IT6-IT8, допуск апертуры $\pm 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Геометрические допуски: круглость $< 0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, цилиндричность $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Допуск угла конуса: $\pm 0,5^\circ \pm 0,1^\circ$.

5.4 Особые характеристики

Микроформа (отверстие $\leq 0,5 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$): длина калибрующей зоны $0,1-0,3 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, угол конуса $8^\circ-12^\circ \pm 0,5^\circ$.

Крупногабаритные формы (отверстие $> 10 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$): длина рабочего конуса $1,5-2 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, угол конуса $10^\circ-15^\circ \pm 0,5^\circ$.

6. Технические требования

6.1 Требования к материалам

Используется карбид WC-Co, рекомендуемое соотношение — WC-6%Co, WC-8%Co или WC-10%Co, погрешность содержания кобальта составляет $\pm 0,5\%$.

Твердость HV $1800-2000 \pm 30$, прочность на сжатие $> 4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, пористость $< 0,1\% \pm 0,01\%$.

6.2 Качество поверхности

Шероховатость рабочей поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, с использованием технологии

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прецизионного шлифования или химико - механического полирования (ХМП).

На поверхности отсутствуют трещины, поры и включения, а максимальный размер дефектов составляет $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

6.3 Показатели эффективности

Срок службы: Длина вытягивания $> 10^6 \text{ м} \pm 10^4 \text{ м}$, скорость износа $< 0,05 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$.

Термическая стабильность: рабочая температура $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, коэффициент теплового расширения $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Точность волочения: допуск диаметра проволоки $\leq \pm 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, шероховатость поверхности $R_a < 0,4 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$.

6.4 Покрытие (опционально)

TiN, Покрытия TiC или CrN могут быть нанесены с использованием технологии PVD или CVD толщиной $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, твердостью HV 2000-3000 ± 50 и прочностью сцепления $> 50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$.

7. Производственный процесс

7.1 Подготовка сырья

высококачественные порошки WC (размер частиц $0,5-2 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и Co, а однородность смешивания составляла $> 95\% \pm 2\%$, что достигалось путем измельчения в шаровой мельнице (скорость 200-300 об./мин $\pm 10 \text{ об. / мин}$, время 24-48 ч $\pm 1 \text{ ч}$).

7.2 Процесс формования

Холодное изостатическое прессование (ХИП, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) или литье под давлением, плотность сырого тела $> 60\% \pm 2\%$ теоретической плотности.

7.3 Процесс спекания

Горячее изостатическое прессование (ГИП, $1300-1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) или спекание в поле (СПС, $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) для обеспечения размера зерна $0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

7.4 Отделка

Внутреннее отверстие выполнено методом электроэрозионной обработки (ЭЭО, ток 5-20 А $\pm 1 \text{ А}$) с точностью $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Прецизионная шлифовка (зернистость #1200-3000 ± 100) или ультразвуковая полировка, контроль шероховатости поверхности $R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

8. Методы проверки

8.1 Размеры и точность

Допуск соответствует классу точности IT6-IT8 стандарта GB/T 1182 при контроле с помощью координатно-измерительной машины (КИМ).

8.2 Свойства материала

Испытание на твердость проводится в соответствии с GB/T 3850, плотность — в соответствии с GB/T 3851, а прочность на сжатие — в соответствии с GB/T 3852.

Теплопроводность соответствует стандарту ASTM E1461, а коэффициент теплового расширения — стандарту ISO 17864.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Качество поверхности

Дефекты проверялись с помощью оптической микроскопии (увеличение $500\times \pm 50\times$) или сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), при этом максимальный размер дефекта составлял $< 0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

8.4 Срок службы

Испытание проводят на стандартной волочильной машине с использованием стандартных волочильных материалов (например, стальной проволоки диаметром 1 мм, скорости волочения $1\text{--}5 \text{ м/с} \pm 0,1 \text{ м/с}$), и регистрируют длину волочения до тех пор, пока износ не достигнет $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

9. Условия испытаний

Температура среды проведения испытаний: $20\text{--}25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $50\%\text{--}70\% \pm 5\%$.

Испытательная нагрузка на вырыв: $500\text{--}2000 \text{ Н} \pm 50 \text{ Н}$, регулируется в соответствии со спецификациями пресс-формы.

10. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

10.1 Логотип

На заводской табличке на поверхности пресс-формы указаны: номер пресс-формы, технические характеристики (диаметр $\times$ высота в мм), дата изготовления, наименование производителя. Высота символов составляет $3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ и должна быть хорошо видна.

10.2 Упаковка

Для упаковки используйте ударопрочный пенопласт и антикоррозионную бумагу, положите в деревянные или пластиковые ящики и наклейте на внутренней стороне ящика надпись «Обращаться с осторожностью».

10.3 Транспорт

Избегайте воздействия сильных вибраций и высоких температур ($>50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$). Транспортное средство должно быть оборудовано амортизирующими устройствами.

10.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом месте при температуре $0\text{--}40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности воздуха $<60\% \pm 5\%$. Избегать контакта с кислотными и щелочными веществами.

11. Использование и обслуживание

11.1 Требования к использованию

Перед волочением предварительно нагрейте пресс-форму до температуры $50\text{--}100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, чтобы снизить тепловой удар.

Используйте масло для волочения проволоки, соответствующее стандарту GB/T 7326, с вязкостью $20\text{--}50 \text{ сСт} \pm 5 \text{ сСт}$.

11.2 Техническое обслуживание

Регулярно проверяйте износ рабочего отверстия, каждые $10^5 \text{ м} \pm 10^4 \text{ м}$ длины протяжки.

Если величина износа составляет $>0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, своевременно отполируйте или замените его.

11.3 Стандарты утилизации

Если диаметр рабочего отверстия увеличится более чем на $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$ или длина

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

поверхностной трещины составит более 0,05 мм ± 0,01 мм, то деталь будет считаться бракованной.

12. Обеспечение качества

Норма отбора проб для каждой партии пресс-форм составляет $\geq 5\% \pm 1\%$, а норма отбора составляет $>95\% \pm 2\%$.

Предоставьте сертификаты материалов и отчеты о проверках, включая данные испытаний производительности и записи проверки размеров.

13. Приложение (информационное)

Справочник параметров процесса рисования

Скорость протягивания: 1-10 м/с ± 0,1 м/с.

Степень измельчения: 10%-25% ± 2% в зависимости от материала.

Типичные дефекты и решения

Трещина: Отрегулируйте температуру спекания или увеличьте давление ГИП.

Пористость: оптимизируйте смешивание порошков или улучшите плотность спекания.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

JB/T 3943-2017

Вытяжной штамп

Волоочильные фильеры из карбида

Технические условия

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает технические условия на выбор материала, технологию изготовления, технические характеристики, методы контроля, маркировку, упаковку, транспортировку и хранение твердосплавных волок. Он распространяется на волокна, используемые для холодного волочения металлической проволоки (например, стальной, медной, нержавеющей и т.д.), и охватывает волокна диаметром от 0,1 мм до 20 мм $\pm 0,05$ мм. Он широко применяется в металлообрабатывающей, электронной, автомобильной и других отраслях промышленности.

2. Нормативные ссылки

Пункты следующих документов становятся пунктами настоящего стандарта посредством ссылок в настоящем стандарте. Для всех упомянутых документов с указанием дат все последующие поправки (за исключением опечаток) или пересмотры не применимы к настоящему стандарту, однако рекомендуется принять новую версию документа в соответствии с результатами исследований.

GB/T 5242-2006 Общие технические условия на твердый сплав

GB/T 6110-2021 Волоочильные фильеры. Конструктивные типы и размеры твердосплавных волоочильных фильеров

GB/T 1804-2000 Допуски и посадки. Предельные отклонения и основные отклонения линейных размеров

3. Термины и определения

Волоочильный волок: кольцевой или конический волок, изготовленный из твердосплавного материала, используемый для уменьшения диаметра металлической проволоки в процессе волочения.

Угол рабочего конуса: Угол конической части внутреннего отверстия формы, который влияет на усилие вытягивания и качество поверхности.

Срок службы: способность штампа сохранять стабильную производительность в течение заданной длины вытяжки или определенного количества раз.

4. Требования к материалам

4.1 Состав материала

Матрица пресс-формы изготовлена из системы карбид вольфрама-кобальт (WC-Co), рекомендуемое соотношение составляет WC-6%Co, WC-8%Co или WC-10%Co, а погрешность содержания кобальта составляет $\pm 0,5\%$.

В зависимости от характеристик вытягиваемого материала (например, высокоуглеродистой стали или медного сплава) для улучшения износостойкости и термостойкости можно добавлять небольшое количество армирующих фаз, таких как TiC (0,5%-2% $\pm 0,1\%$) или TaC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(0,5%-1% ± 0,1%).

4.2 Физические свойства

Твердость: HV 1800-2000 ± 30, метод испытания согласно GB/T 3850.

Плотность: 14,5-15,0 г/см³ ± 0,2 г/см³, метод испытаний согласно GB/T 3851.

Прочность на сжатие: >4000 МПа ± 100 МПа, метод испытаний согласно GB/T 3852.

Вязкость разрушения: 10-15 МПа·м^{1/2} ± 1 МПа·м^{1/2}, метод испытаний по GB/T 21068.

4.3 Химическая стабильность

Коррозионная стойкость: Погружение в 0,9% раствор NaCl на 24 ч ± 1 ч, скорость коррозии <0,01 мм/год ± 0,001 мм/год.

Стойкость к окислению: потеря массы <0,01% ± 0,001% при 800°C ± 20°C.

5. Технические требования

5.1 Тип конструкции

Конструкция пресс-формы соответствует стандарту GB/T 6110-2021, включая зону входа, зону смазки, зону рабочего конуса, зону калибровки и зону выхода.

Угол конуса в зоне входа: 20°-30° ± 2°, длина 0,5-1 мм ± 0,1 мм.

Угол рабочего конуса: 6°-15° ± 0,5°, длина 0,5-2 мм ± 0,1 мм.

Длина калибрующей зоны: 0,2-0,8 мм ± 0,05 мм, допуск по диаметру ±0,01 мм ± 0,001 мм.

5.2 Размеры и допуски

Внешний диаметр: 10-50 мм ± 0,1 мм, рекомендуемые характеристики: 15 мм, 20 мм, 25 мм, 30 мм, 40 мм.

Высота: 5-30 мм ± 0,1 мм, рекомендуемые значения — 10 мм, 15 мм, 20 мм и 25 мм.

Диаметр рабочего отверстия: 0,1-20 мм ± 0,01 мм, допуск по GB/T 1804 IT6-IT8.

Геометрические допуски: круглость <0,005 мм ± 0,001 мм, цилиндричность <0,01 мм ± 0,001 мм.

5.3 Качество поверхности

Шероховатость рабочей поверхности Ra < 0,1 мкм ± 0,01 мкм, с использованием технологии прецизионного шлифования или химико - механического полирования (ХМП).

На поверхности отсутствуют трещины, поры и включения, а максимальный размер дефектов составляет <0,01 мм ± 0,001 мм.

5.4 Требования к производительности

Срок службы: Длина вытяжки > 10⁶ м ± 10⁴ м (в зависимости от вытягиваемого материала), скорость износа < 0,05 мм³/Н · м ± 0,01 мм³/Н · м.

Термическая стабильность: рабочая температура <600°C ± 20°C, коэффициент теплового расширения <6×10⁻⁶ /°C ± 0,5×10⁻⁶ /°C.

Точность волочения: допуск диаметра проволоки ≤±0,01 мм ± 0,001 мм, шероховатость поверхности Ra <0,4 мкм ± 0,05 мкм.

5.5 Покрытие (опционально)

TiN, Покрытия TiC или CrN могут быть нанесены методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) или химического осаждения из паровой фазы (CVD) толщиной 5-15 мкм ± 0,1 мкм, твердостью HV 2000-3000 ± 50 и прочностью сцепления >50 МПа ± 5 МПа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Производственный процесс

6.1 Подготовка сырья

высококачистые порошки WC (размер частиц $0,5-2 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) и Co, а однородность смешивания составляла $>95\% \pm 2\%$, что достигалось путем измельчения в шаровой мельнице (скорость $200-300 \text{ об./мин} \pm 10 \text{ об./мин}$, время $24-48 \text{ ч} \pm 1 \text{ ч}$).

6.2 Процесс формования

Холодное изостатическое прессование (ХИП, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) или литье под давлением, плотность сырого тела $>60\% \pm 2\%$ теоретической плотности.

6.3 Процесс спекания

Горячее изостатическое прессование (ГИП, $1300-1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) или спекание в поле (СПС, $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) для обеспечения пористости $<0,1\% \pm 0,01\%$ и размера зерна $0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

6.4 Отделка

Внутреннее отверстие выполнено методом электроэрозионной обработки (ЭЭО, ток $5-20 \text{ А} \pm 1 \text{ А}$) с точностью $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Прецизионная шлифовка (зернистость $\#1200-3000 \pm 100$) или ультразвуковая полировка, контроль шероховатости поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

6.5 Термическая обработка

Отжиг ($400-600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $2-4 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$) устраняет внутренние напряжения, а остаточные напряжения составляют $<100 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$.

7. Методы проверки

7.1 Размерная и геометрическая точность

Допуск соответствует классу точности IT6-IT8 стандарта GB/T 1182 при контроле с помощью координатно-измерительной машины (КИМ).

7.2 Свойства материала

Испытание на твердость проводится в соответствии с GB/T 3850, плотность — в соответствии с GB/T 3851, а прочность на сжатие — в соответствии с GB/T 3852.

Вязкость разрушения соответствует стандарту GB/T 21068, а теплопроводность — стандарту ASTM E1461.

7.3 Качество поверхности

с использованием оптического микроскопа (увеличение $500\times \pm 50\times$) или сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), при этом максимальный размер дефекта должен быть $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

7.4 Срок службы

Испытание проводят на стандартной волочильной машине с использованием стандартных волочильных материалов (например, стальной проволоки диаметром 1 мм, скорости волочения $1-5 \text{ м/с} \pm 0,1 \text{ м/с}$), и регистрируют длину волочения до тех пор, пока износ не достигнет $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

8. Условия испытаний

Температура среды проведения испытаний: $20-25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $50\%-70\% \pm 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Испытательная нагрузка на вырыв: $500-2000 \text{ Н} \pm 50 \text{ Н}$, регулируется в соответствии со спецификациями пресс-формы.

9. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

9.1 Логотип

На заводской табличке на поверхности пресс-формы указаны: номер пресс-формы, технические характеристики (диаметр $\times$ высота в мм), дата изготовления, наименование производителя. Высота символов составляет $3 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$ и должна быть хорошо видна.

9.2 Упаковка

Для упаковки используйте ударопрочный пенопласт и антикоррозионную бумагу, положите в деревянные или пластиковые ящики и наклейте на внутренней стороне ящика надпись «Обращаться с осторожностью».

9.3 Транспорт

Избегайте воздействия сильных вибраций и высоких температур ($>50^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$). Транспортное средство должно быть оборудовано амортизирующими устройствами.

9.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом месте при температуре $0-40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности воздуха $<60\% \pm 5\%$. Избегать контакта с кислотными и щелочными веществами.

10. Эксплуатация и обслуживание

10.1 Требования к использованию

Перед волочением предварительно нагрейте пресс-форму до температуры $50-100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, чтобы снизить тепловой удар.

Используйте масло для волочения проволоки, соответствующее стандарту GB/T 7326, с вязкостью $20-50 \text{ сСт} \pm 5 \text{ сСт}$.

10.2 Техническое обслуживание

Регулярно проверяйте износ рабочего отверстия, каждые $10^5 \text{ м} \pm 10^4 \text{ м}$ длины протяжки.

Если величина износа составляет $>0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, своевременно отполируйте или замените его.

10.3 Стандарты утилизации

Если диаметр рабочего отверстия увеличится более чем на $0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, а длина поверхностной трещины составит более $0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, деталь будет считаться годной к браку.

11. Обеспечение качества

Норма отбора проб для каждой партии пресс-форм составляет $\geq 5\% \pm 1\%$, а норма отбора составляет $>95\% \pm 2\%$.

Предоставьте сертификаты материалов и отчеты о проверках, включая данные испытаний производительности и записи проверки размеров.

12. Приложение (информационное)

Справочник параметров процесса рисования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Скорость волочения: 1–10 м/с $\pm$ 0,1 м/с. Степень обжатия: 10–25% $\pm$ 2% в зависимости от материала.

Типичные дефекты и решения

Трещина: Отрегулируйте температуру спекания или увеличьте давление ГИП.

Пористость: оптимизируйте смешивание порошков или улучшите плотность спекания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Каковы характеристики и области применения твердосплавных теплоотводящих подложек?

Теплоотводящие подложки из твердого сплава основаны на системе карбид вольфрама-кобальт (WC-Co) в сочетании с материалами с высокой теплопроводностью (такими как карбид кремния SiC, нитрид алюминия AlN или нитрид бора BN) и другими армирующими фазами (такими как карбид титана TiC или карбид тантала TaC) и изготавливаются методами порошковой металлургии (такими как горячее изостатическое прессование HIP, спекание или спекание в поле SPS) или технологиями аддитивного производства (такими как селективная лазерная плавка SLM, электронно-лучевая плавка EBM). Эти подложки сочетают в себе высокую твердость, износостойкость и отличные характеристики терморегулирования твердого сплава и широко используются в высокотехнологичных областях, где требуются эффективное рассеивание тепла, механическая прочность и адаптивность к окружающей среде. Далее подробно рассматриваются различные типы твердосплавных теплоотводящих подложек, даются более профессиональные и подробные описания, а также варианты применения с трех аспектов: типы, характеристики и области применения.

1. Типы карбидных теплоотводящих подложек

Теплоотводящие подложки из цементированного карбида подразделяются на несколько типов в зависимости от состава материала, механизма теплопроводности и условий применения. Каждый тип оптимизируется за счёт определённых соотношений и процессов для удовлетворения требований к терморегулированию в различных условиях:

Теплоотводящая подложка из чистого карбида вольфрама-кобальта (WC-Co)

Состав : карбид вольфрама (WC) в качестве твердой фазы, кобальт (Co) в качестве связующей фазы, типичное соотношение WC-6%Co, WC-10%Co или WC-15%Co.

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность $\sim 100-150 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, зависит от проводимости фазы Co (удельное сопротивление $\sim 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и фонового вклада WC.

Твердость HV 1800-2000 ± 30 , прочность на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$, размер зерна 0,5-2 мкм $\pm 0,1 \text{ мкм}$.

Высокая термостойкость $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, коэффициент теплового расширения $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Производственный процесс : ГИП ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) обеспечивает плотность, прецизионная шлифовка (размер зерна #1200-2000 ± 100) контролирует шероховатость поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Теплоотводящая подложка из композитного материала на основе карбида вольфрама-кобальта и карбида кремния (WC-Co- SiC)

Состав : матрица WC-Co, легированная SiC (10%-30% $\pm 2\%$), размер частиц SiC 0,1-1 мкм $\pm 0,05 \text{ мкм}$, для повышения теплопроводности и стойкости к тепловым ударам.

Профессиональные характеристики :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Теплопроводность 200-300 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К , Вклад SiC $\sim$ 270 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К , коэффициент термодиффузии $>60 \text{ мм}^2/\text{с} \pm 5 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Твердость HV 1900-2200 $\pm$ 30, стойкость к термоудару ($\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, скорость роста трещин $<0,001 \text{ мм/цикл} \pm 0,0001 \text{ мм/цикл}$).

Коррозионная стойкость $<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (в кислом или щелочном растворе), коэффициент термического расширения $\sim 4,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$.

Производственный процесс : SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 50 МПа $\pm$ 1 МПа) для достижения равномерного распределения SiC , лазерная обработка поверхности (мощность 200-400 Вт $\pm$ 10 Вт) для оптимизации пути теплопроводности.

Теплоизоляционная подложка из карбида вольфрама-кобальта и нитрида алюминия (WC-Co- AlN)

Состав : матрица WC-Co , легированная AlN (15%-25% $\pm$ 2%), размер частиц AlN 0,5-2 мкм $\pm$ 0,1 мкм , обеспечивающая электроизоляцию.

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность 150-250 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К , удельное сопротивление $>10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, прочность на пробой $>15 \text{ кВ/мм} \pm 1 \text{ кВ/мм}$.

Твердость HV 1800-2100 $\pm$ 30, прочность на изгиб $>2200 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, коэффициент термического расширения $\sim 4,8 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$, хорошее совпадение с кремниевой стружкой ($<3\% \pm 0,5\%$).

Высокая термостойкость $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Производственный процесс : CVD ($800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) осаждение слоя AlN (толщина 5-15 мкм $\pm$ 0,1 мкм) , HIP ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 200 МПа $\pm$ 5 МПа) для улучшения сцепления интерфейса.

Теплоотводящая подложка из композитного материала на основе карбида вольфрама-кобальта и нитрида бора (WC-Co-BN)

Состав : матрица WC-Co, легированная гексагональным нитридом бора (h-BN, 5%-15% $\pm$ 1%), толщина слоя h-BN $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, для улучшения самосмазываемости и теплопроводности.

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность составляет 180–280 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К . Теплопроводность h-BN вдоль плоскости составляет $\sim 300 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К} \pm 10 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$, а в вертикальном направлении — $\sim 30 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К} \pm 5 \text{ Вт/ м}\cdot\text{К}$.

Твердость HV 1700-2000 $\pm$ 30, коэффициент трения $< 0,1 \pm 0,01$, износостойкость $< 0,03 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$.

Коррозионная стойкость $<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, коэффициент теплового расширения $\sim 5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$.

Технология изготовления : шаровая мельница (скорость 200-300 об./мин $\pm$ 10 об./мин, время 24-48 ч $\pm$ 1 ч) для обеспечения равномерной дисперсии h-BN, спекание SPS ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 40 МПа $\pm$ 1 МПа).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Многофазная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама-кобальта-карбида титана-карбида тантала (WC-Co- TiC -TaC)

Состав : матрица WC-Co, легированная TiC (5%-10% $\pm$ 0,5%) и TaC (2%-5% $\pm$ 0,5%), размер частиц 0,5-1,5 мкм $\pm$ 0,1 мкм , для улучшения характеристик при высоких температурах.

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность 120-200 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К , высокая термостойкость $>1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$.

Твердость HV 2000-2300 $\pm$ 30, сопротивление термической усталости (>6000 раз $\pm$ 500 раз), прочность на сжатие >4500 МПа $\pm$ 100 МПа.

Коррозионная стойкость $<0,005$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год, коэффициент теплового расширения $\sim 5,2 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$.

Технология изготовления : ГИП ($1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 250 МПа $\pm$ 5 МПа) в сочетании с плазменным напылением покрытия TiC-TaC (толщина 10-20 мкм $\pm$ 0,2 мкм) .

Теплорассеивающая нанокompозитная подложка WC-Co-Graphene

Состав : матрица WC-Co , легированная графеном (1%-5% $\pm$ 0,5%), толщина листа графена $<0,01$ мкм $\pm$ 0,001 мкм , длина 1-10 мкм $\pm$ 0,5 мкм .

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность составляет 250-350 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К , графен вносит вклад ~ 5000 Вт/ м·К $\pm$ 500 Вт/ м·К (вдоль плоскости).

Твердость HV 1900-2200 $\pm$ 30, прочность на изгиб >2300 МПа $\pm$ 100 МПа, температуропроводность >80 мм²/с $\pm$ 5 мм²/с.

Коррозионная стойкость $<0,008$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год, коэффициент теплового расширения $\sim 4,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$.

Процесс изготовления : Жидкофазное ультразвуковое диспергирование (мощность 200-400 Вт $\pm$ 10 Вт, время 1-2 ч $\pm$ 0,1 ч) смешанного графена, SPS ($1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 60 МПа $\pm$ 1 МПа) спекание.

Высокопрочная теплорассеивающая подложка из карбида вольфрама-кобальта-карбида бора (WC-Co-B4C)

Состав : матрица WC-Co , легированная карбидом бора (B4C, 5%-15% $\pm$ 1%), размер частиц B4C 0,5-2 мкм $\pm$ 0,1 мкм , для повышения износостойкости и стойкости к высоким температурам.

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность составляет 150–250 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К , при этом вклад B4C составляет ~ 200 Вт/ м·К $\pm$ 10 Вт/ м· К .

Твердость HV 2000-2400 $\pm$ 30, износостойкость $<0,02$ мм³/Н · м $\pm$ 0,01 мм³/Н · м, прочность на сжатие >5000 МПа $\pm$ 100 МПа.

Высокая термостойкость $>900^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$ при $900^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплового расширения $\sim 5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$.

Технология изготовления : горячее изостатическое прессование ($1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 200 МПа $\pm$ 5 МПа) в сочетании с предварительным диспергированием B4C (ультразвук 30-60 мин $\pm$ 5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

мин), чистота поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Износостойкая теплоотводящая подложка из цементированного карбида вольфрама-кобальта-нитрида титана (WC-Co- TiN)

Состав : матрица WC-Co , легированная нитридом титана (TiN , 5%-10% $\pm 0,5\%$), размер частиц TiN 0,5-1,5 $\text{мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, для улучшения износостойкости и теплопроводности.

Профессиональные характеристики :

Теплопроводность 120-200 Вт/ м·К $\pm 10 \text{ Вт/ м·К}$, TiN вносит вклад $\sim 20 \text{ Вт/ м·К} \pm 5 \text{ Вт/ м·К}$ (вспомогательный эффект).

Твердость HV 1900-2200 ± 30 , износостойкость $< 0,03 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, прочность на изгиб $> 2100 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$.

Коррозионная стойкость $< 0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, высокая термостойкость $> 850^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, коэффициент теплового расширения $\sim 5,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$.

Производственный процесс : SPS ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 50 МПа $\pm 1 \text{ МПа}$) в сочетании с покрытием PVD TiN (толщина 5-15 $\text{мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) , прецизионная шлифовка для оптимизации поверхности.

2. Характеристики теплоотводящей подложки из твердого сплава

Эффективность пластин для теплоотвода из карбида вольфрама достигается за счёт разработки материала и оптимизации технологического процесса. Их характеристики обеспечивают значительные преимущества в условиях высоких тепловых нагрузок, механических напряжений и коррозионных сред:

Высокая теплопроводность

Диапазон: 100–350 Вт/ м·К $\pm 10 \text{ Вт/ м·К}$ (в зависимости от типа), типы с улучшенными характеристиками графена или SiC могут достигать 300–350 Вт/ м·К $\pm 10 \text{ Вт/ м·К}$.

Механизм: Фонон-электронная связь WC-Co (длина свободного пробега фононов $\sim 100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$) и решеточная теплопроводность SiC /h-BN (скорость фононов $\sim 10^4 \text{ м/с} \pm 10^3 \text{ м/с}$) работают синергетически.

Преимущества: время теплового отклика $< 0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$, поддержка плотности теплового потока $> 100 \text{ Вт/см}^2 \pm 10 \text{ Вт/см}^2$, подходит для электроники высокой мощности.

Высокая температурная стабильность

Диапазон: $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ (тип TiC -TaC или B4C $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), срок службы при термическом цикле $> 5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$.

Механизм: Высокотемпературная стабильная фаза WC (температура плавления $\sim 2870^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) и пластичный буфер фазы Co (предел текучести $\sim 500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$) совместно противостоят термическим нагрузкам.

Преимущества: хорошее соответствие тепловому расширению ($< 5\% \pm 1\%$ с SiC / AlN), уменьшение количества трещин термической усталости (длина $< 0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Отличные механические свойства

Твердость: HV 1700-2400 ± 30 , прочность на сжатие 4000-5000 МПа $\pm 100 \text{ МПа}$, прочность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на изгиб 2000-2300 МПа $\pm$ 100 МПа.

Механизм: Дисперсионное упрочнение нанозерен (0,5-1 мкм $\pm$ 0,01 мкм) и армирующих фаз (типа TiC, B4C), вязкость разрушения 10-15 МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 1 МПа $\cdot$ м^{1/2}.

Преимущества: Устойчив к механическим ударам (>1000 Дж/см² $\pm$ 100 Дж/см²), выдерживает вибрацию >50 g $\pm$ 5 g, подходит для использования в условиях высоких нагрузок.

Химическая стабильность и коррозионная стойкость

Скорость коррозии: <0,005-0,01 мм/год $\pm$ 0,001 мм/год, тип TiC-TaC или графен <0,005 мм/год $\pm$ 0,001 мм/год.

Механизм: Поверхностный пассивирующий слой (толщина <0,01 мкм $\pm$ 0,001 мкм) и инертная фаза (сродство к электрону $\sim$ 0,87 эВ $\pm$ 0,05 эВ) противостоят кислотной и щелочной коррозии.

Преимущества: Подходит для электролитной (pH 7-9) или морской воды, миграция ионов <0,1 мкг/см² $\pm$ 0,01 мкг/см².

Электрические свойства (дополнительная изоляция)

Удельное сопротивление: 10⁻⁵ Ом $\cdot$ см $\pm$ 10⁻⁶ Ом $\cdot$ см (чистый WC-Co), >10⁶ Ом $\cdot$ см $\pm$ 10⁵ Ом $\cdot$ см (типа AlN или TiN).

Механизм: ширина запрещенной зоны AlN $\sim$ 6,2 эВ $\pm$ 0,1 эВ или полупроводниковые свойства TiN (ширина запрещенной зоны $\sim$ 3,4 эВ $\pm$ 0,1 эВ) обеспечивают изоляцию, прочность на пробой >15 кВ/мм $\pm$ 1 кВ/мм.

Преимущества: поддерживает высоковольтные устройства (>1000 В $\pm$ 100 В), эффективность электромагнитного экранирования >90 дБ $\pm$ 2 дБ.

Обработка и настройка

Точность: <0,01 мм $\pm$ 0,001 мм, шероховатость поверхности Ra <0,1 мкм $\pm$ 0,01 мкм.

Механизм: SLM (толщина слоя 20-50 мкм $\pm$ 1 мкм) или EDM (точность <0,005 мм $\pm$ 0,001 мм) для получения микроструктур (например, микроканалов 0,1-0,5 мм $\pm$ 0,05 мм).

Преимущества: Поддержка конструкций специальной формы (погрешность сложной поверхности <0,02 мм $\pm$ 0,002 мм), оптимизация веса 12-15 г/см³ $\pm$ 0,5 г/см³.

3. Области применения твердосплавных теплоотводящих подложек

Подложки из цементированного карбида вольфрама все чаще используются в условиях высоких тепловых нагрузок и суровых условий благодаря своим комплексным свойствам:

Применение в области новых энергетических транспортных средств

Модуль аккумуляторной батареи: размер 200-500 мм $\times$ 200-300 мм $\pm$ 5 мм, диапазон рабочих температур 30-60°C $\pm$ 5°C, тепловой поток >50 Вт/см² $\pm$ 5 Вт/см².

Контроллер двигателя: поддерживает IGBT (мощность > 100 кВт $\pm$ 10 кВт), температура перехода < 125°C $\pm$ 5°C, тепловое сопротивление < 0,1 К/Вт $\pm$ 0,01 К/Вт.

Зарядный блок: высоковольтный модуль (ток > 200 А $\pm$ 20 А, напряжение > 500 В $\pm$ 50 В), эффективность рассеивания тепла > 90% $\pm$ 2%.

Водородные топливные элементы: поддержка протонообменной мембраны (PEM, температура 60-80°C $\pm$ 5°C), мощность терморегулирования >20 Вт/см² $\pm$ 2 Вт/см².

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Преимущества :

Быстрое рассеивание тепла снижает риск теплового пробоя (градиент температуры $<5^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$), а срок службы составляет >1000 раз ± 100 раз.

Вибростойкость $>50 \text{ г} \pm 5 \text{ г}$, в соответствии с автомобильными стандартами (ISO 16750), механический срок службы $>10 \text{ 4 ч} \pm 10 \text{ 3 ч}$.

Антиэлектролитная коррозия $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, защита IP67, снижение веса 10-15% $\pm 2\%$.

Аэрокосмическая электроника

приложение :

Радиолокационные системы: Высокочастотные усилители (мощность $>50 \text{ Вт} \pm 5 \text{ Вт}$), от -40°C до $150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Компоненты спутника: панели терморегулирования ($100\text{-}300 \text{ мм} \times 100\text{-}200 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$), тепловой поток пространства $>10 \text{ Вт/м}^2 \pm 1 \text{ Вт/м}^2$.

Блок управления полетом: Вспомогательный процессор (мощность $>30 \text{ Вт} \pm 3 \text{ Вт}$), вибрация $>20 \text{ г} \pm 2 \text{ г}$.

Преимущества :

Колебание температуры $\Delta T >200^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, тепловое расширение, соответствующее сплаву инвара $<5\% \pm 1\%$.

Коррозионная стойкость в вакууме $<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, вес $<1 \text{ кг} \pm 0,1 \text{ кг}$.

Оборудование связи 5G

приложение :

Радиочастотный модуль базовой станции: мощность $>100 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$, тепловой поток $>30 \text{ Вт/см}^2 \pm 3 \text{ Вт/см}^2$.

Антенная решетка: Многоканальная плата ($300\text{-}600 \text{ мм} \times 200\text{-}400 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$), частота 3-5 ГГц $\pm 0,1 \text{ ГГц}$.

Миниатюрный ретранслятор: поддерживает плотное развертывание (мощность $> 50 \text{ Вт} \pm 5 \text{ Вт}$), температура $< 70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Преимущества :

Теплопроводность $>200 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \pm 10 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, срок службы $>10 \text{ 4 ч} \pm 10 \text{ 3 ч}$.

Защита от электромагнитных помех $>90 \text{ дБ} \pm 2 \text{ дБ}$, плотность интеграции $>100 \text{ чипов/м}^2 \pm 10 \text{ чипов/м}^2$.

Промышленная силовая электроника

приложение :

Инвертор: MOSFET/IGBT (мощность $>200 \text{ кВт} \pm 20 \text{ кВт}$), тепловое сопротивление $<0,2 \text{ К/Вт} \pm 0,02 \text{ К/Вт}$.

Трансформатор: высокочастотный, пластинчатый ($200\text{-}400 \text{ мм} \times 200\text{-}300 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$), частота $10\text{-}50 \text{ кГц} \pm 1 \text{ кГц}$.

Выпрямитель: поддерживает модули с высоким током ($>300 \text{ А} \pm 30 \text{ А}$), температура $<100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Преимущества :

Высоковольтное сопротивление $>1000 \text{ В} \pm 100 \text{ В}$, изоляция $>10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Вибростойкость $>100 \text{ г} \pm 10 \text{ г}$, непрерывная работа $>10^5 \text{ ч} \pm 10^4 \text{ ч}$.

Высококачественное производственное оборудование приложение :

Лазер: Мощный диод (мощность $> 50 \text{ Вт} \pm 5 \text{ Вт}$), тепловой поток $> 20 \text{ Вт/см}^2 \pm 2 \text{ Вт/см}^2$.

Станок с ЧПУ: шпиндельная пластина (300-500 мм $\times$ 200-400 мм $\pm 5 \text{ мм}$), скорость $>10\,000$ об/мин ± 1000 об/мин.

Полупроводниковое оборудование: Опорные плиты для травления (температура $200-400^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), равномерность нагрева $<2^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Преимущества :

Твердость HV 1800-2300 ± 30 , износостойкость $< 0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$.

Термическая стабильность $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, срок службы $>10^4 \text{ ч} \pm 10^3 \text{ ч}$.

Медицинское электронное оборудование приложение :

Магниты МРТ: Поддерживающее сверхпроводящее охлаждение магнита (температура $<20 \text{ К} \pm 2 \text{ К}$), тепловой поток $>10 \text{ Вт/см}^2 \pm 1 \text{ Вт/см}^2$.

Радиочастотные абляторы: терморегулирующая пластина (размер 100-200 мм $\times$ 100-150 мм $\pm 5 \text{ мм}$), мощность $>50 \text{ Вт} \pm 5 \text{ Вт}$.

Преимущества :

Биосовместимое покрытие (TiN, уровень антибактериальности $>90\% \pm 2\%$), теплопроводность $>150 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

Радиационностойкий ($<0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$), точность $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$.

Оборудование для возобновляемой энергии приложение :

приложение :

Фотоэлектрический инвертор: поддерживает модули высокой мощности (мощность $>150 \text{ кВт} \pm 15 \text{ кВт}$), температура $<90^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Блок управления ветроэнергетикой: пластина терморегулирования (размер 300-600 мм $\times$ 200-400 мм $\pm 5 \text{ мм}$), вибрация $>30 \text{ г} \pm 3 \text{ г}$.

Преимущества :

Теплопроводность $>200 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, срок службы $>10^4 \text{ ч} \pm 10^3 \text{ ч}$.

Коррозионная стойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, подходит для использования на открытом воздухе (степень защиты IP65).

4. Перспективы развития твердосплавных теплорассеивающих подложек

Оптимизация материала : Разработка четырехфазного композита WC- SiC - AlN -графен (SiC 20%-30% $\pm 2\%$, AlN 10%-20% $\pm 2\%$, графен 1%-5% $\pm 0,5\%$), теплопроводность $>400 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 10 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

в процессах : Изготовление многомасштабных микроканалов с использованием EBM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(плотность тока пучка $>10\ 4\ \text{A}/\text{m}^2 \pm 10\ 3\ \text{A}/\text{m}^2$), тепловое сопротивление $<0,02\ \text{K}/\text{Вт} \pm 0,01\ \text{K}/\text{Вт}$.

Интеллектуальный : встроенная термопара (точность $<0,05^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$) и алгоритм искусственного интеллекта оптимизируют эффективность рассеивания тепла $>95\% \pm 2\%$.

Устойчивость : переработка порошка WC-Co (степень переработки $>95\% \pm 2\%$) и зеленое спекание (потребление энергии $<6\ \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \pm 1\ \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$).

Теплорассеивающие подложки из цементированного карбида обладают большим потенциалом применения в высокотехнологичных областях. Спрос на них продолжает расти в транспортных средствах на новых источниках энергии, аэрокосмической отрасли и сетях связи 5G. В будущем, благодаря многофазным композитам и интеллектуальному производству, эффективность терморегулирования и конкурентоспособность на рынке будут и дальше улучшаться.

5. Соответствующие стандарты для твердосплавных теплорассеивающих подложек

Полностью унифицированная и общепризнанная международная система ещё не сформирована, главным образом, из-за разнообразия областей её применения (например, транспорт на новых источниках энергии, аэрокосмическая промышленность, связь 5G и т.д.) и быстрого развития технологий. Ниже представлен обзор стандартов, которые могут быть применимы к подложкам из цементированного карбида для теплоотвода, основанный на существующей отраслевой практике и соответствующих стандартах на материалы:

Общие стандарты материалов

Общие технические требования к твердому сплаву

См. китайский национальный стандарт «GB/T 5242-2006 Общие технические условия для твердых сплавов», в котором указаны состав, свойства (такие как теплопроводность, твердость, коррозионная стойкость) и требования к контролю качества твердых сплавов, и который может быть использован в качестве основы для выбора сырья для теплорассеивающих подложек.

Свойства терморегулирующего материала

Теплоотводящие подложки должны обладать высокой теплопроводностью ($>100\ \text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K} \pm 10\ \text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$), низким коэффициентом теплового расширения ($<6\times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 0,5\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) и механической прочностью (твердость HV 1800-2000 ± 30), что широко применяется в промышленности.

Стандарты, связанные с отраслевыми приложениями

Стандарты электронной упаковки

Информацию о карбидных теплорассеивающих подложках, используемых в электронных устройствах, см. в «Спецификации ламинированных материалов IPC-4101», которая устанавливает требования к тепловым характеристикам и размерной стабильности материалов подложки с высокой теплопроводностью и подходит для проектирования теплорассеивающих конструкций в микросистемных корпусах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Область новых энергетических транспортных средств

Теплорассеивающая подложка должна соответствовать «Техническим условиям QC/T 1073-2020 для компонентов терморегулирования аккумуляторных батарей электромобилей», в которых установлены определенные требования к термостойкости ($<0,1 \text{ К/Вт} \pm 0,01 \text{ К/Вт}$), термостойкости ($>800 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и вибростойкости ($>50 \text{ г} \pm 5 \text{ г}$) терморегулирующих материалов.

Аэрокосмические стандарты

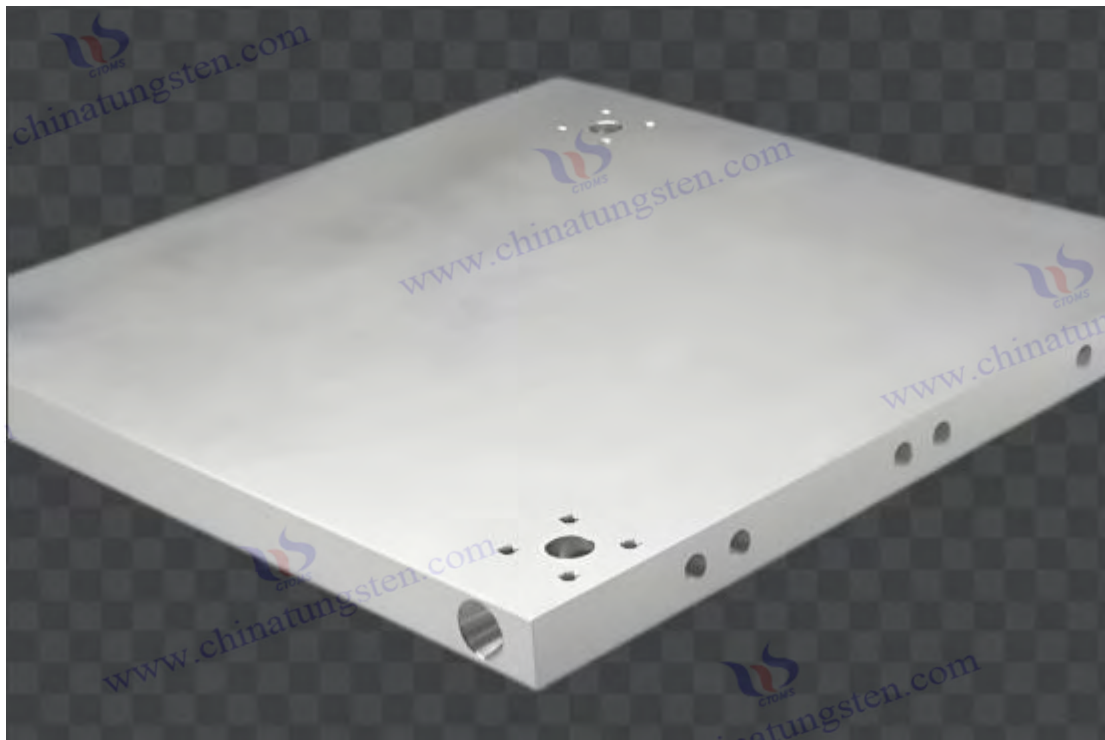
Ознакомьтесь со стандартом AMS 2750 «Спецификация термической обработки» или аналогичными военными стандартами по термической стабильности и теплопроводности материалов в условиях высоких температур, подходящих для использования в качестве подложек теплоотводов в авионике.

Международные эталонные стандарты стандарты ИСО

ISO 18514 (Испытание теплопроводности керамических и металлических композитов) может использоваться для оценки теплопроводности подложек из цементированного карбида в качестве радиатора; ISO 17864 (Испытание теплового расширения высококачественной керамики) может служить руководством для испытаний на соответствие тепловому расширению.

Стандарты ASTM

ASTM E1461 (измерение температуропроводности) можно использовать для проверки эффективности терморегулирования подложек радиаторов для высокопроизводительных приложений.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Каковы области применения твердого сплава в катализе и хранении энергии?

Будучи традиционным высокоэффективным материалом, твердый сплав (основа которого – система карбид вольфрама-кобальт, WC-Co) в последние годы постепенно занял лидирующие позиции в прикладных исследованиях катализа и накопления энергии, особенно в условиях стремительного развития технологий преобразования и накопления энергии. Благодаря превосходной механической прочности, коррозионной стойкости, высокой температурной стабильности и уникальным характеристикам электронной структуры, твердый сплав продемонстрировал значительный потенциал в электрокатализе, термическом катализе, топливных элементах, суперконденсаторах и водородных системах накопления энергии благодаря сочетанию с высокоэнтропийными сплавами (ВЭС), нанотехнологиями и технологиями поверхностной функционализации. Несмотря на более развитое применение твердого сплава в биомедицинской сфере, его изучение в области катализа и накопления энергии по-прежнему находится на переднем крае, охватывая междисциплинарные области, включая материаловедение, электрохимию, физическую химию и компьютерное моделирование. Далее будут подробно рассмотрены конкретные применения твердого сплава в этих областях, сочетающие новейшие достижения исследований и профессиональные технические знания для всестороннего расширения его знаний.

Применение в катализе

Электрокаталитическая реакция.

Применение твердого сплава в области электрокатализа в основном сосредоточено на каталитической оптимизации ключевых процессов электрохимических реакций, таких как реакция восстановления кислорода (ОВК), реакция выделения водорода (ВВК) и реакция выделения кислорода (РВК). Эти реакции лежат в основе водородной энергетики, топливных элементов и технологий электролиза воды. Традиционные катализаторы на основе драгоценных металлов (такие как платина Pt, иридий Ir и рутений Ru) ограничены высокой стоимостью и дефицитом ресурсов, в то время как твердый сплав (особенно WC и его производные) стал потенциальным заменителем недорогих металлов благодаря своей платиноподобной электронной структуре d-зоны и превосходной химической стабильности.

Реакция восстановления кислорода (ORR) : карбид на основе WC-Co значительно улучшает каталитические характеристики ORR за счет соединения с высокоэнтропийными сплавами (такими как PtPdFeCoNi) . Эффект стабилизации энтропии и искажение решетки высокоэнтропийных сплавов усиливают экспозицию активных центров и эффективность переноса электронов. Например, исследования показали, что массовая активность и удельная активность наночастиц PtPdFeCoNi при 0,9 В относительно RHE составляют 0,25 A/ мг_Pt и 0,12 mA/cm² соответственно, что в 6,2 и 4,9 раза выше, чем у коммерческого катализатора 20% Pt/C. Кроме того, WC в качестве носителя может предотвратить агломерацию и окисление наночастиц Pt. Испытания на долговечность показывают, что после 10 000 циклов он сохраняет более 90% активности, что лучше, чем 70–80% у Pt/C.

Реакция выделения водорода (HER) и реакция выделения кислорода (OER) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

наноструктуры, полученные из карбида (например, $\text{Ni}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mo}_{10}\text{Co}_{35}\text{Cr}_{15}$ HEA), демонстрируют низкое перенапряжение (около 107 мВ при 10 мА/см²) и наклон Тафеля (<50 мВ/дек) в HER, что указывает на быструю кинетику реакции. Для OER материалы на основе WC-Co имеют оптимизированную свободную энергию адсорбции (ΔG_{H^*} близкую к 0 эВ) за счет поверхностного легирования (например, Ni или Fe) с перенапряжением около 300 мВ при плотности тока 10 мА/см² в щелочном электролите (1 М KOH) и стабильностью до 50 часов, что делает их подходящими для крупномасштабного электролиза воды для получения водорода.

Применение : Эти катализаторы широко используются в топливных элементах с протонообменной мембраной (PEMFC), щелочных электролизерах и системах производства водорода на основе возобновляемых источников энергии.

Расщепление воды и производство водорода

Полное расщепление воды ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$) является основной технологией для устойчивого производства водорода, и цементированный карбид продемонстрировал бифункциональный электрокаталитический потенциал в этой области. В исследовании полые массивы нанотрубок CoS_2 , полученные из цементированного карбида, были приготовлены с помощью процессов осаждения из жидкой фазы и сульфидизации в качестве бифункциональных катализаторов для катода (HER) и анода (OER). В электролите 1,5 М KOH напряжение ячейки составляло 1,67 В при плотности тока 10 мА/см², что намного ниже, чем у традиционной пары IrO_2/Pt (1,8 В), а фарадеевская эффективность все еще превышала 95% после 20 часов непрерывной работы. Превосходные характеристики этого материала обусловлены его высокой удельной площадью поверхности (> 100 м²/г) и обилием активных краевых участков. Кроме того, катализатор на основе WC-Co дополнительно повышает проводимость и стабильность за счет использования в его составе углеродных нанотрубок (УНТ) или графена, что делает его пригодным для использования в устройствах для расщепления воды, работающих на солнечной энергии.

Реакция восстановления CO₂ (CO₂RR)

Восстановление CO₂ является важным средством переработки углерода. Материалы на основе цементированного карбида демонстрируют потенциал в CO₂RR за счет регулирования электронной структуры и энергии поверхностной адсорбции. После объединения высокоэнтропийных сплавов (таких как CuFeCoNiZn) с WC оптимизируется равновесие адсорбции/десорбции молекул CO₂ и промежуточных продуктов, а углеводороды C₂⁺ (такие как этанол и этилен, эффективность Фарадея > 60%) генерируются с высокой селективностью. Расчеты теории функционала плотности (DFT) показывают, что смещение вниз центра d-полосы участка Cu усиливает реакцию связывания *CO, в то время как проводимость WC (> 100 См/см) способствует переносу электронов. В 2025 году, с достижением целей углеродной нейтральности, этот катализатор имеет широкие перспективы для улавливания и конверсии CO₂ в промышленных масштабах.

Применение в хранении энергии

Технология аккумуляторных батарей Применение материалов

на основе твердого сплава в новых аккумуляторных системах находит свое отражение в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

основном в разработке электродных материалов, особенно в литий-воздушных аккумуляторах, цинк-воздушных аккумуляторах и литий-ионных аккумуляторах.

Литий-воздушные аккумуляторы : высокоэнтропийные шпинельные оксиды (например, FeCoNiMnPtIr) в качестве катодных катализаторов значительно снижают перенапряжение перезарядки ($<0,5$ В по сравнению с Li/Li^+) и сохраняют 80% ёмкости (500 циклов) при плотности тока 1000 мА/г. Многоэлементный синергетический эффект оптимизирует кинетику образования/разложения O_2^- и Li_2O_2 , что делает его пригодным для хранения энергии с высокой плотностью энергии.

Цинк-воздушные батареи : наночастицы, полученные из WC-Co, обладают повышенной активностью ORR и OER за счет модификации поверхности (например, легирования N), с напряжением холостого хода 1,45 В и циклическим сроком службы более 200 часов, что делает их подходящими для резервных источников питания для электромобилей.

Литий-ионные аккумуляторы : высокоэнтропийные сплавы на основе цементированного карбида (например, TiNbTaZrHf) в качестве материалов отрицательного электрода демонстрируют высокую удельную емкость (>500 мАч /г) и превосходную циклическую стабильность (падение емкости $<10\%$ после 1000 циклов), а их высокоэнтропийный эффект препятствует расширению объема.

Нано-высокоэнтропийные сплавы, полученные из твердого сплава для суперконденсаторов (например, NiFeCoCuMn), были разработаны в качестве материалов электродов суперконденсаторов благодаря своей пористой структуре (пористость $50-70\% \pm 5\%$) и высокой удельной площади поверхности ($>200 \text{ м}^2 / \text{г}$). В

электролите 1 MH_2SO_4 значение емкости может достигать 300 Ф/г, плотность энергии составляет 20 Вт·ч /кг, плотность мощности составляет 500 Вт/кг, а стабильность цикла достигает 10 000 раз (степень сохранения емкости $>90\%$). Его превосходные характеристики объясняются переносом заряда и искажением решетки между несколькими элементами, что улучшает диффузию ионов электролита и емкость хранения заряда, и подходят для мгновенного высвобождения энергии в гибридных транспортных средствах.

Материалы, сочетающие в себе твердый сплав с высокоэнтропийными сплавами для хранения энергии водорода (такие как композиты на основе

CoCrFeNiTi), демонстрируют высокую аккумуляцию водорода (>2 мас. %) и структурную стабильность в твердотельных системах хранения энергии водорода. Материалы на основе WC-Co оптимизируют диссоциацию и диффузию молекул водорода за счет модификации поверхности (такой как покрытие Pd толщиной $10-20 \text{ нм} \pm 2 \text{ нм}$) с диапазоном рабочих температур $25-300 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ и циклом абсорбции/дегидрирования водорода более 100 раз. В сочетании с нанопористой структурой (размер пор $5-20 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) этот материал подходит для мобильных устройств хранения энергии и резервуаров для хранения водорода для транспортных средств на водородных топливных элементах (FCEV) и находится на стадии промышленного пилотного проекта в 2025 году.

Технические преимущества и проблемы

Преимущества :

Механическая и химическая стабильность : Высокая твердость ($\text{HV } 1800-2000 \pm 30$) и коррозионная стойкость (скорость коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) системы WC-Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

позволяют ей эффективно работать в суровых условиях.

Экономическая эффективность : карбид в сочетании с высокоэнтروпийным сплавом позволяет значительно сократить количество используемых драгоценных металлов (содержание Pt до $5\% \pm 1\%$), что снижает затраты на катализатор.

Регулируемость : электронную структуру и поверхностные свойства твердого сплава можно точно контролировать путем легирования элементами (например, TiC , TaC) или поверхностная инженерия.

испытание :

Сложность синтеза : получение сплавов и наноструктур с высокой энтропией требует точного контроля состава и условий термообработки (например, SPS $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, HIP $1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), а стоимость процесса высока.

Ограничение активного центра : инертность поверхности WC ограничивает его собственную каталитическую активность, и для увеличения удельной площади поверхности ($<100 \text{ м}^2/\text{г}$) необходимо использовать наномасштабирование или композит.

Недостатки исследований : необходимы дополнительные данные для подтверждения долгосрочной стабильности высокоэнтропийных сплавов в сложных атомных средах, а моделирование DFT и машинное обучение требуют дальнейшей проверки.

Будущее направление развития

С ускорением трансформации энергетики к 2025 году применение твердого сплава в катализе и хранении энергии будет сосредоточено в следующих направлениях:

Наноинженерия : разработка сверхтонких наночастиц ($<10 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$) и пористых структур для увеличения плотности активных центров.

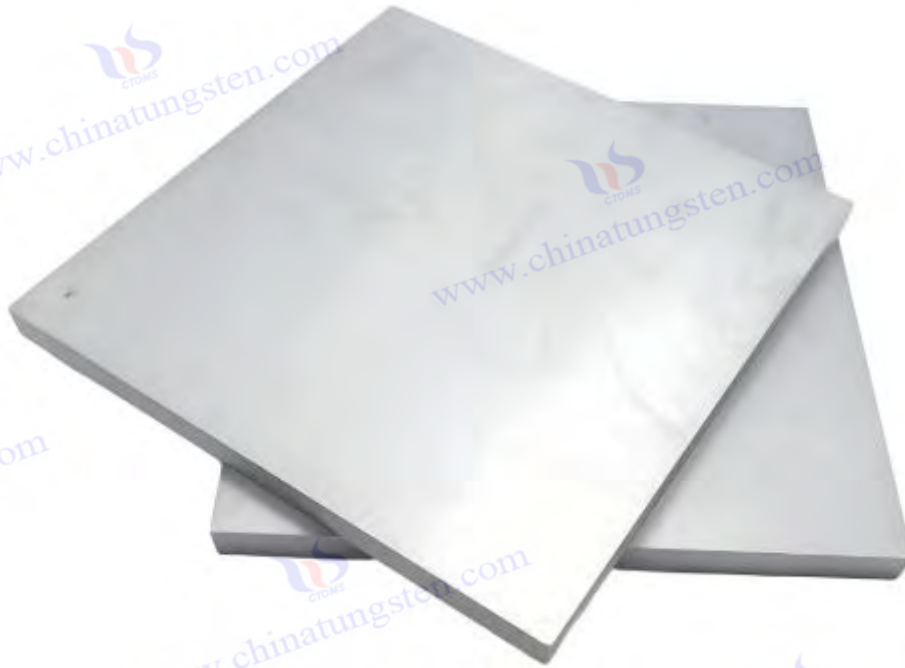
Интеллектуальное проектирование : ускорение оптимизации материалов за счет использования машинного обучения для прогнозирования оптимального состава сплава и схем модификации поверхности.

Устойчивость : разработка низкокобальтовых или бескобальтовых составов твердосплавных материалов, соответствующих экологическим стандартам RoHS и REACH.

Комплексное применение : интегрируйте карбидные катализаторы с системами накопления энергии (например, гибридными системами топливных элементов и суперконденсаторов) для повышения общей эффективности.

Потенциал твердого сплава в области катализа и накопления энергии постепенно раскрывается благодаря междисциплинарным совместным исследованиям. В частности, в условиях достижения целей водородной экономики и углеродной нейтральности, его роль как связующего материала, соединяющего традиционные отрасли промышленности и новые энергетические технологии, становится всё более важной.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Каковы области применения твердого сплава в медицине ?

Как высокопроизводительный инженерный материал, твердый сплав (представленный системой карбид вольфрама-кобальт, WC-Co) привлекает все большее внимание со стороны академических кругов и промышленности за его превосходные механические свойства, химическую стабильность и потенциальную биосовместимость в области медицины. Твердый сплав известен своей сверхвысокой твердостью (диапазон твердости HV 1800-2000 $\pm$ 30, около 9-10 по шкале твердости Мооса), превосходной износостойкостью (скорость износа $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), коррозионной стойкостью (скорость коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) и регулируемостью характеристик, достигаемой за счет поверхностной инженерии и легирования элементами, что делает его основным материалом в ортопедии, стоматологии, сердечно-сосудистой хирургии, нейрохирургии и других областях. В последние годы, благодаря развитию передовых производственных технологий (таких как аддитивное производство и нанотехнологии) и функционализации поверхности, сфера применения твердого сплава расширилась от традиционных хирургических инструментов до имплантатов и каркасов для тканевой инженерии, что демонстрирует значительную клиническую ценность и научный исследовательский потенциал. Далее будет всесторонне и подробно рассмотрено применение твердого сплава в медицине с точки зрения вариантов применения, технических требований, производственных процессов, основ материаловедения и будущих направлений исследований с академической и профессиональной точки зрения.

Применение твердого сплава в ортопедических имплантатах

В ортопедии карбид вольфрама используется преимущественно в эндопротезах тазобедренного сустава, коленных суставах, фиксаторах позвоночника и артродезах суставов, обеспечивая такие клинические потребности, как фиксация переломов, эндопротезирование суставов, коррекция позвоночника и реконструкция костей. Конструкция этих имплантатов должна обеспечивать биомеханическую совместимость, долгосрочную стабильность и бесшовную интеграцию с тканями организма.

Карбидный эндопротез тазобедренного сустава

Карбидный эндопротез тазобедренного сустава используется для лечения запущенного остеоартрита, асептического некроза головки бедренной кости, деформации после перелома шейки бедра или врожденной дисплазии тазобедренного сустава путем тотального эндопротезирования тазобедренного сустава (ТЭТС). Его основные компоненты включают бедренную ножку и вертлужную чашку, которые обычно изготавливаются из формулы WC-6Co (содержание кобальта $6\% \pm 1\%$, содержание вольфрама $94\% \pm 1\%$) методом искрового плазменного спекания (SPS, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или горячего изостатического прессования (HIP, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для достижения высокой плотности (пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$) и однородной нанозернистой структуры ($0,5\text{-}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$).

Технические требования :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Механические свойства: Износостойкость ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), позволяющая выдерживать длительные циклические нагрузки ($>1000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$, например, ходьба в течение примерно $10^6 - 10^7$ циклов, что эквивалентно 10-15 годам ежедневной активности), и прочность на сжатие $>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, чтобы выдерживать осевую силу шейки бедренной кости.

Химическая стабильность: Устойчивость к коррозии ($<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$) противостоит электрохимической коррозии, вызываемой ионами хлора (Cl^- , концентрация около 100-150 мМ) в биологических жидкостях, белках и ферментах.

Биосовместимость: Жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$ (тест на цитотоксичность in vitro согласно ISO 10993-5), интеграция в костную ткань $>95\% \pm 2\%$ (через гидроксиапатит, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, покрытие или пористую структуру, размер пор $100-400 \text{ мкм} \pm 50 \text{ мкм}$, способствующую прикреплению остеобластов и вращению кости).

TiN (толщина $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$), нанесенное методом физического осаждения из паровой фазы (PVD, $400-600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), снизило коэффициент трения ($<0,2 \pm 0,05$), уменьшило количество частиц износа полиэтиленового вкладыша ($<0,001 \text{ мм}^3/\text{цикл} \pm 0,0001 \text{ мм}^3/\text{цикл}$) и уменьшило перипротезное воспаление (уровни ИЛ-6 $<10 \text{ пг/мл} \pm 1 \text{ пг/мл}$).

Срок службы: $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$, примерно 10 5 циклов ходьбы, подходит для пожилых пациентов в возрасте 60–80 лет или людей с высоким уровнем активности.

Сценарии применения : Широко применяется у пожилых пациентов с остеопорозом (показатель плотности костной ткани $T < -2,5 \text{ SD}$) или у молодых пациентов с высокой активностью (например, у спортсменов), особенно в случаях с высокими нагрузками на бедра ($>1500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$).

Замена коленного сустава карбидным эндопротезом.

Замена коленного сустава карбидным эндопротезом — это процедура, используемая для лечения остеоартрита, ревматоидного артрита или тяжелой травмы колена (например, разрыва мениска) путем замены нижнего конца бедренной кости, большеберцового плато и поверхности надколенника.

Технические требования :

Механические свойства: Выдерживает динамические нагрузки ($>1500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$, например приседание или подъем по лестнице), износостойкость ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) снижает годовую скорость износа полиэтиленового вкладыша ($<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), а усталостная прочность ($>10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) позволяет выдерживать около 1 миллиона циклов сгибания и разгибания в год.

Биосовместимость: жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$, интеграция с костью $>95\% \pm 2\%$ (усиливается пористой поверхностью или факторами роста, такими как BMP-2).

Оптимизация поверхности: нанозерна ($0,5-1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) улучшают микрооднородность, покрытие PVD ZrN ($5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) повышает твердость поверхности ($>\text{HV } 1900 \pm 30$), химико-механическая полировка (ХМП) контролирует шероховатость ($R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и снижает воспалительную реакцию (ИЛ-6 $<10 \text{ пг/мл} \pm 1 \text{ пг/мл}$).

Продолжительность жизни: $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$, подходит для активных людей в возрасте 50-70 лет или пациентов с тяжелым ожирением ($\text{ИМТ} > 30 \text{ кг/м}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сценарии применения : Подходит для пациентов с тяжелой дегенерацией коленного сустава (III-IV степень по Келлгрону-Лоуренсу) или посттравматической деформацией.

Устройства для фиксации позвоночника из карбида

включают в себя транспедикулярные винты и стержневые системы, используемые для коррекции сколиоза, фиксации компрессионных переломов позвонков или спондилодеза (например, поясничного отдела позвоночника).

Технические требования :

Механические свойства: прочность на сжатие ($>4000 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$), поддержка позвоночника, износостойкость ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) для уменьшения износа между нитью и костной тканью и обеспечение усталостной прочности ($>10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$), чтобы выдерживать динамические нагрузки ($>2000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$).

Биосовместимость: показатель интеграции кости $>95\% \pm 2\%$ (время срастания 3–6 месяцев ± 1 месяц).

Обработка поверхности: процесс HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) обеспечивает пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$ (микропоры $<0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$), легирование ZrC ($0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$) повышает стойкость к окислению ($<0,01\% \pm 0,001\%$), а полировка поверхности ($Ra <0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) повышает прочность межфазного соединения ($>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$).

Продолжительность жизни: $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$.

Сценарии применения : Подходит для пациентов в возрасте 20–60 лет с заболеваниями позвоночника, такими как подростковый идиопатический сколиоз (угол Кобба $> 40^\circ$) или остеопоротические переломы у пожилых людей.

Твердосплавные устройства для сращения суставов

используются для сращения запястного, голеностопного или дугоотростчатого суставов позвоночника с целью лечения анкилоза, тяжелого дегенеративного артрита или травматической нестабильности.

Технические требования :

Биосовместимость: показатель интеграции кости $>95\% \pm 2\%$ (время срастания 6–12 месяцев ± 1 месяц).

Механические свойства: Износостойкость ($<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), усталостная прочность ($>10^6 \text{ раз} \pm 10^4 \text{ раз}$) и сопротивление местному давлению ($>1000 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$).

Поверхностная инженерия: процесс SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) в сочетании с нанопокрывтием Ag ($2-5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, выделение $\text{Ag}^+ <0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$) для улучшения антибактериальных свойств ($>90\% \pm 2\%$) и биосовместимости.

Продолжительность жизни: $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$.

Сценарий применения : Подходит для пациентов в возрасте 30-60 лет с заболеваниями суставов, такими как анкилоз запястья или нестабильность голеностопного сустава.

Применение твердосплавных материалов в дентальных имплантатах

Карбидные зубные имплантаты используются для восстановления утраченного одного или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нескольких зубов или полной адентии, заменяя естественные корни зубов для поддержки коронок, мостов на имплантатах или полных зубных протезов.

Технические требования :

Механическая точность: Отклонение обработки $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ (зазор резьбы $<0,005 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$) обеспечивает плотное прилегание к альвеолярной кости.

Химическая стабильность: Устойчивость к коррозии $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, устойчив к кислотности и бактериальным метаболитам в слюне полости рта (pH 5-7).

Биосовместимость: Жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$ (тест на остеобластах и фибробластах), антибактериальность $>90\% \pm 2\%$ (по высвобождению $\text{Ag}^+ <0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$ подавляет патогенные микроорганизмы пародонта).

Оптимизация структуры: процесс SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) контролирует пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$ (размер пор пористой поверхности $50\text{-}200 \text{ мкм} \pm 20 \text{ мкм}$), способствуя врастанию костей.

Срок службы: $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$ при условии жевательных нагрузок ($>500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$).

Сценарий применения : Подходит для людей в возрасте 30–60 лет с отсутствием зубов, например, при потере одного зуба из-за пародонтита или полной адентии у пожилых людей.

Применение твердого сплава в сердечно-сосудистых имплантатах

Карбидные сердечно-сосудистые стенты используются для лечения ишемической атеросклеротической болезни сердца или острого инфаркта миокарда, а также для поддержки просвета во время чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ).

Технические требования :

Химическая стабильность: коррозионная стойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (предотвращение высвобождения ионов Co или W $<0,1 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$), протестировано в крови при pH $7,4 \pm 0,2$, $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Биосовместимость: Жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$, низкий тромботический риск (ИЛ-6 $<10 \text{ пг/мл} \pm 1 \text{ пг/мл}$).

Поверхностная инженерия: легирование TaC ($0,5\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$) повышает коррозионную стойкость ($<0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$), покрытие PVD TiN ($5\text{-}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) повышает скорость интеграции сосудистой стенки ($>95\% \pm 2\%$).

Срок службы: $>10 \text{ лет} \pm 1 \text{ год}$, толщина стенки стента $0,08\text{-}0,12 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$.

Сценарий применения : Подходит для пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями в возрасте 40–70 лет, с диаметром стента 2–4 мм, для лечения поражений коронарных артерий со стенозом $>70\%$.

Применение твердосплавных материалов в нейрохирургических имплантатах

Твердосплавные пластины для восстановления черепа используются для реконструкции травматических дефектов черепа, резекции опухолей или врожденных дефектов.

Технические требования :

Биосовместимость: жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$, что позволяет избежать воспаления мозговой ткани или глиального рубцевания.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Термическая стабильность: низкий коэффициент теплового расширения ($<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) соответствует черепу ($7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), легирование TiC (2%-5% $\pm 0,5\%$) улучшает высокотемпературную стабильность ($>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$).

Химическая стабильность: Коррозионная стойкость $<0,01$ мм/год $\pm 0,001$ мм/год, устойчивость к электролитам спинномозговой жидкости.

Оптимизация поверхности: покрытие PVD (например, TiN, $5-15$ мкм $\pm 0,1$ мкм) с контролируемой шероховатостью ($R_a < 0,1$ мкм $\pm 0,01$ мкм) для уменьшения адгезии к ткани.

Срок службы: >10 лет ± 1 год, поддерживает настройку с помощью 3D-печати (толщина $0,5-2$ мм $\pm 0,1$ мм).

Сценарий применения : подходит для пациентов в возрасте 10–70 лет с травмами черепа, например, с дефектами черепа, полученными в результате автомобильных аварий.

Применение твердого сплава в хирургических инструментах

Еще одним важным применением твердого сплава в области медицины является производство высокопроизводительных хирургических инструментов, включая костные сверла, костные пилы, режущие инструменты, малоинвазивные хирургические инструменты (например, эндоскопические ножницы), нейрохирургические электроды и стоматологические ножи для резьбы. Эти инструменты широко используются во многих областях, таких как ортопедия, нейрохирургия, стоматология и общая хирургия, удовлетворяя разнообразные потребности от фиксации переломов до малоинвазивной хирургии. Благодаря своей превосходной твердости, износостойкости, усталостной прочности и антибактериальному потенциалу, твердый сплав стал идеальным альтернативным материалом для традиционных инструментов из нержавеющей стали (марки 304, HV $200-400 \pm 20$) или титанового сплава (Ti-6Al-4V, HV $300-350 \pm 20$), особенно в сложных хирургических операциях, требующих высокой точности, длительного срока службы и антибактериальных свойств. Далее будут подробно описаны его технические характеристики, процесс производства, материаловедение, сферы применения и будущие направления исследований.

Технические требования и эксплуатационные характеристики твердосплавных хирургических инструментов

Хирургические инструменты из карбида должны соответствовать следующим строгим техническим стандартам, чтобы гарантировать их надлежащую работу в высокоинтенсивных и высокочастотных медицинских условиях, а также отвечать требованиям физиологической среды человека:

Высокая твердость: диапазон твердости составляет HV $1800-2000 \pm 30$, достигаемый за счет системы WC-Co (содержание Co $6-8\% \pm 1\%$), что близко к твердости алмаза (HV $7000-8000 \pm 500$), что значительно лучше, чем у нержавеющей стали или титанового сплава, и позволяет эффективно резать кортикальную кость (твердость HV $500-700 \pm 50$) или твердые ткани (например, эмаль, HV $300-400 \pm 20$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокая точность: отклонение обработки контролируется на уровне $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, что обеспечивает точность на микронном уровне при хирургических операциях, таких как позиционирование нейрохирургических электродов в мозговой ткани (погрешность $<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) или точная гравировка стоматологических ножей (глубина реза $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

Усталостная прочность: Усталостная долговечность превышает 10^6 раз $\pm 10^4$ раз, оптимизирована за счет нанозерен ($0,5\text{-}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) и многофазной структуры (частицы WC, внедренные в фазу Co), подходит для многократного высокочастотного использования, например, для длительной работы костных сверл при высокоскоростном вращении (>1000 об/мин, крутящий момент $>0,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \pm 0,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$), предел усталости $>1000 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$.

Антибактериальные свойства: уровень ингибирования бактерий $>90\% \pm 2\%$ за счет нанесения на поверхность нанопокртия Ag (толщина $2\text{-}5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, высвобождение $\text{Ag}^+ <0,01 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,001 \text{ мкг/см}^2$) или покрытия TiN подавляет рост золотистого стафилококка и кишечной палочки, снижая риск послеоперационной инфекции ($<1\% \pm 0,5\%$) в соответствии со стандартами испытаний на антимикробность ISO 22196.

Острота: сила резания $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$, шероховатость кромки ($R_a <0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) контролируется химико-механической полировкой (ХМП), чтобы гарантировать минимальное повреждение мягких тканей (модуль упругости $0,1\text{-}1 \text{ МПа} \pm 0,1 \text{ МПа}$) во время резки, а гладкость разреза $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$.

Терморегулирование: Теплопроводность $>120 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ (намного выше, чем у нержавеющей стали $16 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \pm 2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$), тепловое сопротивление снижено за счет оптимизации зерна и покрытия PVD ($<0,1 \text{ К} \cdot \text{см}^2/\text{Вт} \pm 0,01 \text{ К} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$), при $50 \text{ Вт/см}^2 \pm 5 \text{ Вт/см}^2$

Равномерность температуры поверхности под нагрузкой $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ для предотвращения термического повреждения тканей ($>43^\circ\text{C}$ может вызвать денатурацию белка).

Типы и области применения медицинских хирургических инструментов из твердосплавных сплавов

Твердосплавное сверло для костей

Применение: Для фиксации переломов или установки ортопедических имплантатов, сверления кортикальной кости (толщина $2\text{-}5 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$) или губчатой кости (пористость $50\%\text{-}90\% \pm 5\%$) при высокой скорости вращения (>1000 об/мин, крутящий момент $>0,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \pm 0,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$).

Особенности: формула WC-6Co, твердость $\text{HV } 1850 \pm 30$, диаметр сверла $1,5\text{-}6 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$, точность обработки $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, антибактериальное покрытие (например, Ag, толщина $2\text{-}5 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) эффективно снижает риск остеомиелита (уровень инфицирования $<1\% \pm 0,5\%$) и термических повреждений.

Сценарий: Сверление и фиксация бедренных ножек при эндопротезировании тазобедренного сустава или установка транспедикулярных винтов при хирургии позвоночника (глубина резьбы $30\text{-}40 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$).

Твердосплавная пила для костей

Применение: Для резекции или изменения формы кости, например, остеотомии (скорость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

резания $1-2 \text{ мм/с} \pm 0,1 \text{ мм/с}$ или резекции опухоли (объем резекции $> 10 \text{ см}^3 \pm 1 \text{ см}^3$).

Особенности: Пилообразная конструкция, сила резания $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$, износостойкость $<0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, покрытие PVD ZrN ($5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) увеличивает срок службы (>500 использований ± 50 раз), подходит для резки костной ткани с твердостью HV 600 ± 50 .

Сценарий: Изменение формы плато большеберцовой кости во время замены коленного сустава или экстренной ампутации во время травматологической операции (время резекции $<5 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$).

Твердосплавные режущие инструменты

Применение: Применяется для резекции мягких тканей или деликатного формирования, например, резекции опухолей головного мозга (глубина резания $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) или взятия образцов тканей (объем образца $0,5-1 \text{ см}^3 \pm 0,1 \text{ см}^3$).

Характеристики: острота режущей кромки $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, усталостная прочность $>10^6$ раз $\pm 10^4$ раз, антибактериальность покрытия Ag $>90\% \pm 2\%$ (степень ингибирования MRSA $>95\% \pm 1\%$), сила резания $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$.

Сценарий: Нейрохирургическая резекция глиомы или пластическая операция с заготовкой лоскута (толщина $0,2-0,5 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$).

Карбидные малоинвазивные хирургические инструменты (например, эндоскопические ножницы)

Применение: Для разделения и резекции тканей (например, рассечения печени или рассечения связок) во время лапароскопической или артроскопической хирургии.

Характеристики: Длина $20-40 \text{ см} \pm 1 \text{ см}$, точность наконечника $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, коррозионная стойкость $<0,01 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (испытано в 0,9% растворе NaCl), покрытие TiN снижает трение ($<0,2 \pm 0,05$), подходит для работы при температуре тела $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ (термостойкость $>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

Сценарий: Артроскопическая резекция мениска (длина разреза $10-20 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$) или лапароскопическая аппендэктомия (время операции $<15 \text{ мин} \pm 1 \text{ мин}$).

Карбидные нейрохирургические электроды

Применение: для глубокой стимуляции мозга (DBS) с целью лечения болезни Паркинсона или эпилепсии, а также для регистрации нейронных сигналов (частота дискретизации $>1 \text{ кГц} \pm 0,1 \text{ кГц}$).

Характеристики: Диаметр $0,5-1 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$, проводимость $>100 \text{ См/см}$ (удельное сопротивление $<0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 0,001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), биосовместимость (жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$, прикрепление нейронов $>90\% \pm 2\%$), шероховатость поверхности Ra $<0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$, уменьшает воспаление мозговой ткани (ИЛ-6 $<10 \text{ пг/мл} \pm 1 \text{ пг/мл}$).

Сценарий: Имплантация DBS у пациентов с болезнью Паркинсона (глубина электрода $5-10 \text{ мм} \pm 0,5 \text{ мм}$) или локализация эпилептического очага (пространственное разрешение $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Твердосплавный стоматологический нож для резьбы

Применение: Для реставраций зубов (например, пломб из смолы) или формирования тканей вокруг имплантатов (глубина резания $<0,2 \text{ мм} \pm 0,02 \text{ мм}$).

Характеристики: точность режущей кромки $<0,01 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$, сила резания $<0,5 \text{ Н} \pm 0,05 \text{ Н}$, антибактериальные свойства серебряного покрытия $>90\% \pm 2\%$ (подавляет пародонтальный патоген *Porphyromonas gingivalis*), устойчивость к жевательной нагрузке ($>500 \text{ Н} \pm 10 \text{ Н}$).

Сценарий: Формирование края коронки или подготовка ложа имплантата (диаметр $3\text{--}5 \text{ мм} \pm 0,1 \text{ мм}$).

Процесс производства и обработка поверхности

Процесс подготовки : Твердосплавные хирургические инструменты обычно изготавливаются с помощью процессов SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) для обеспечения размера зерна $0,5\text{--}1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$ и пористости $<0,1\% \pm 0,01\%$ (микродефекты $<0,05 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$). Аддитивное производство (селективное лазерное плавление, SLM, толщина слоя $20\text{--}50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, мощность лазера $200\text{--}400 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$) позволяет изготавливать изделия сложной геометрии, например, изогнутую конструкцию малоинвазивных инструментов или микропористую структуру электродов.

Обработка поверхности: покрытие TiN, ZrN или Ag (толщина $2\text{--}15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$) наносится методом PVD ($400\text{--}600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, скорость осаждения $0,1\text{--}0,5 \text{ мкм/мин} \pm 0,05 \text{ мкм/мин}$) или CVD ($800\text{--}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, концентрация паров $10\text{--}20 \text{ об.}\% \pm 1 \text{ об.}\%$), а шероховатость контролируется ($R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) методом химико-механической полировки (ХМП, давление $5\text{--}10 \text{ кПа} \pm 0,5 \text{ кПа}$) для оптимизации остроты и антибактериальных свойств. Плазменная очистка ($500 \text{ Вт} \pm 50 \text{ Вт}$, $5\text{--}10 \text{ мин} \pm 0,5 \text{ мин}$, атмосфера Ar/O_2) удаляет оксидный слой ($<0,01 \text{ мкм} \pm 0,001 \text{ мкм}$) и улучшает чистоту поверхности и прочность сцепления ($>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$).

Основы материаловедения

Микроструктура: частицы WC (твердость $\text{HV } 2200 \pm 50$), внедренные в фазу Co (модуль вязкости $200\text{--}300 \text{ ГПа} \pm 20 \text{ ГПа}$), образующие эффект упрочнения композита, энергия границ зерен $<0,5 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,05 \text{ Дж/м}^2$ Повышенная трещиностойкость.

Электронная структура: Центр d-зоны WC расположен близко к уровню Ферми ($-1,5 \text{ эВ} \pm 0,1 \text{ эВ}$), подобно благородному металлу Pt, что придает ему потенциальную биологическую инертность.

Поверхностная химия: высвобождение Ag^+ приобретает антибактериальные свойства за счет ионного обмена (коэффициент диффузии $10^{-10} \text{ м}^2/\text{с} \pm 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$), а покрытие TiN образует связи Ti-O (энергия связи $460 \text{ кДж/моль} \pm 10 \text{ кДж/моль}$) для повышения коррозионной стойкости.

Сценарии применения и клинические преимущества

Ортопедическая хирургия: костные сверла и костные пилы сокращают время резания ($<5 \text{ мин}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,5$ мин/время), повышают хирургическую эффективность ($>20\% \pm 2\%$) и снижают интраоперационные термические травмы ($<40^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) при замене тазобедренного и коленного суставов, а также коррекции позвоночника.

Нейрохирургия: электроды и малоинвазивные инструменты поддерживают точность DBS ($<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$, пространственное разрешение $<0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) и снижают риск повреждения нервов ($<1\% \pm 0,5\%$).

3-6 месяцев $\pm 0,5$ месяца) при установке имплантата.

Преимущества: по сравнению с традиционными инструментами твердосплавные инструменты имеют срок службы в 2–3 раза дольше (>500 использований ± 50 раз), антибактериальные свойства снижают частоту инфекций ($<1\% \pm 0,5\%$) и подходят для операций с высокой степенью риска (например, лечение открытых переломов).

Будущие направления исследований

Наноулучшение: разработка нанокромки $<10 \text{ нм}$ (площадь поверхности $>200 \text{ м}^2/\text{г} \pm 20 \text{ м}^2/\text{г}$), повышение эффективности резки ($>30\% \pm 2\%$) и долговечности (>1000 раз ± 50 раз).

Интеллектуальность: встроенный датчик температуры (точность $<0,1^{\circ}\text{C} \pm 0,01^{\circ}\text{C}$, время отклика $<0,1 \text{ с} \pm 0,01 \text{ с}$) отслеживает тепловые эффекты и оптимизирует безопасность хирургических операций.

Оптимизация биосовместимости: сократите содержание Co ($<5\% \pm 0,5\%$) и замените его Ni (порог токсичности $<0,1 \text{ мг/л} \pm 0,01 \text{ мг/л}$) или Cr (антиоксидант $<0,01\% \pm 0,001\%$) для соответствия экологическим стандартам RoHS и REACH.

Персонализация: использование технологии 3D-печати (толщина слоя $10\text{--}30 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, точность печати $<0,05 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$) для создания персонализированных инструментов, адаптируемых к сложным анатомическим структурам (например, глубоким электродным путям мозга).

Устойчивость: Разработка низкоуглеродных процессов (снижение потребления энергии $>10\% \pm 2\%$, выбросы $\text{CO}_2 <5 \text{ кг/шт.} \pm 0,5 \text{ кг/шт.}$), использующих энергию солнца или ветра.

Другие потенциальные области применения твердого сплава в медицине

Скаффолды для тканевой инженерии

Пористая структура твердого сплава (пористость $30\text{--}50\% \pm 5\%$, размер пор $100\text{--}500 \text{ мкм} \pm 50 \text{ мкм}$) может быть использована в качестве каркаса для инженерии костной ткани в сочетании с костным морфогенетическим белком (BMP-2, концентрация $10\text{--}50 \text{ мкг/мл} \pm 5 \text{ мкг/мл}$) или фактором роста эндотелия сосудов (VEGF) для стимуляции регенерации костей (масса новой кости $>70\% \pm 5\%$).

Носитель для высвобождения лекарства

После модификации поверхности антибиотики (например, ванкомицин, скорость высвобождения $0,1\text{--}0,5 \text{ мкг/см}^2 \cdot \text{ч} \pm 0,05 \text{ мкг/см}^2 \cdot \text{ч}$) или противовоспалительные препараты (например, дексаметазон, период высвобождения $>7 \text{ дн.} \pm 1 \text{ дн.}$) могут быть загружены для лечения инфекции или воспаления с замедленным высвобождением (скорость ингибирования $>90\% \pm 2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс производства и обработки поверхности твердого сплава

Процесс : SPS и HIP обеспечивают высокую плотность (пористость $<0,1\% \pm 0,01\%$, плотность $>99\% \pm 0,5\%$), аддитивное производство (SLM, толщина слоя $20-50 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, скорость сканирования $500-1000 \text{ мм/с} \pm 50 \text{ мм/с}$) поддерживает индивидуальную разработку.

Покрытие : TiN, нанесенный методом PVD/CVD, Покрытие ZrN или Ag (толщина $5-15 \text{ мкм} \pm 0,1 \text{ мкм}$, скорость осаждения $0,1-0,5 \text{ мкм/мин} \pm 0,05 \text{ мкм/мин}$) с оптимизированной биосовместимостью (скорость прикрепления клеток $>95\% \pm 2\%$) и антибактериальными свойствами (скорость ингибирования $>90\% \pm 2\%$).

Перспективное направление развития медицинских применений твердосплавных материалов

Нанооптимизация : разработка наночастиц $<10 \text{ нм}$ (площадь поверхности $>200 \text{ м}^2/\text{г} \pm 20 \text{ м}^2/\text{г}$) для повышения поверхностной активности имплантатов и инструментов.

Улучшенная биосовместимость : сниженное содержание Co ($<5\% \pm 0,5\%$), заменено на Ni или Cr, снижено высвобождение ионов тяжелых металлов ($<0,1 \text{ мкг/см}^2 \pm 0,01 \text{ мкг/см}^2$).

Интеллектуальность : встроенные датчики контролируют напряжение имплантата ($<10 \text{ МПа} \pm 1 \text{ МПа}$) или температуру инструмента ($<40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) для получения обратной связи в режиме реального времени.

Устойчивость : Разработка низкоуглеродных процессов (снижение потребления энергии $>10\% \pm 2\%$, углеродный след $<5 \text{ кг CO}_2\text{-экв./шт.} \pm 0,5 \text{ кг CO}_2\text{-экв./шт.}$), использующих энергию солнца или ветра.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Типы, характеристики, производительность и проблемы 3D-печати твердосплавными материалами

Технология 3D-печати (аддитивная) Компания «Manufacturing» предлагает революционный метод обработки твердого сплава (основой которого является система карбид вольфрама-кобальт, WC-Co), преодолевая ограничения традиционных методов порошковой металлургии (таких как спекание, горячее изостатическое прессование и холодное прессование-спекание). Благодаря таким передовым процессам, как селективная лазерная плавка (SLM), электронно-лучевая плавка (EBM), струйное нанесение связующего (BJ) или прямое энергетическое осаждение (DED), твердосплавные материалы могут достигать сложной геометрии, высокой точности и производства по индивидуальным заказам. Эти технологии используют высокоэнергетические лучи (например, мощность лазера $200-1000 \text{ Вт} \pm 20 \text{ Вт}$ или ток электронного пучка $10-50 \text{ мА} \pm 1 \text{ мА}$) для плавления или объединения металлического порошка слой за слоем и широко используются в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как медицина (например, восстановление черепа, замена тазобедренного сустава и зубные имплантаты), аэрокосмическая промышленность (турбинные лопатки, легкие конструкции и теплозащитные покрытия), производство пресс-форм (прецизионные вытяжные штампы, штамповочные штампы и высокоизносостойкие вырубные штампы) и энергетика (высокотемпературные компоненты газовых турбин и конструкции ядерных реакторов). Ниже подробно описывается текущее состояние, проблемы и будущее направление развития 3D-печати из твердого сплава с точки зрения типов материалов, характеристик, производительности и существующих проблем в сочетании с новейшими данными по материаловедению и применению в машиностроении для повышения знаний и профессионализма.

1. Типы карбидных материалов для 3D-печати

Материалы из твердого сплава для 3D-печати в основном основаны на системе карбид-связующее. В зависимости от требований к применению, процессам печати и адаптации к окружающей среде, они разнообразны и постоянно развиваются, включая:

Твердый сплав на основе карбида вольфрама-кобальта (WC-Co)

Состав : карбид вольфрама (WC) в качестве твердой фазы, кобальт (Co) в качестве связующей фазы, типичные соотношения включают WC-6%Co, WC-10%Co или WC-15%Co, диапазон размеров частиц порошка $10-50 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$.

Применение : Широко используется в медицинских имплантатах (таких как протезы тазобедренного сустава и коленные ортезы, которые должны соответствовать стандартам ASTM F1537), режущих инструментах (таких как токарные инструменты, фрезы и сверла, которые соответствуют требованиям ISO 513) и формах для нанесения износостойких покрытий (таких как вытяжные и штамповочные штампы).

Характеристики : Высокая твердость ($\text{HV } 1800-2000 \pm 30$), умеренная ударная вязкость (трещиностойкость $10-15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), теплопроводность $\sim 100-150 \text{ Вт/м} \cdot \text{K} \pm 5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Вт/м·К, коэффициент теплового расширения $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, подходит для высоких нагрузок и средних и высоких температур ($< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$).

Твердый сплав на основе карбида вольфрама и никеля/хрома (WC-Ni/Cr)

Состав : никель (Ni) или хром (Cr) используется для частичной или полной замены кобальта (Co) для снижения биологической токсичности или повышения коррозионной стойкости. Распространенные формулы включают WC-8%Ni, WC-5%Ni-3%Cr или WC-10%Cr3C2. Размер частиц порошка составляет $15\text{--}45 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$.

Применение : подходит для сердечно-сосудистых стентов (в соответствии со стандартами биосовместимости ISO 10993-1), оболочек кабелей для морской среды (например, подводных кабелей связи) и коррозионно-стойких волочильных фильер (например, для волочения проволоки из медных сплавов).

Особенности : Коррозионная стойкость лучше, чем у WC-Co (скорость коррозии $< 0,008 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$, испытано в 3,5% растворе NaCl), стойкость к окислению $< 0,01\% \pm 0,001\%$ потеря массы при $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, проводимость $\sim 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см} \pm 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, подходит для материалов электрических контактов.

Композитный карбид карбида вольфрама-карбида титана/карбида тантала (WC -TiC / TaC)

Состав : Высокотемпературные характеристики и стойкость к окислению улучшаются за счет легирования карбидом титана (TiC) или карбидом тантала (TaC), например, WC-5%TiC-5% Co , WC-3%TaC-7%Co или WC-2%TiC-2%TaC-6%Co, с размером частиц порошка $10\text{--}40 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$.

Применение : подходит для высокотемпературных хирургических инструментов (например, ортопедических сверл и режущих лезвий, которые должны выдерживать температуру $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), авиационных деталей (например, сопел двигателей и вкладышей камер сгорания) и высокотемпературных форм (например, штампов для горячейковки).

Особенности : Высокая термостойкость ($> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, температура плавления близка к $2870^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), отличная термическая стабильность (коэффициент термического расширения $\sim 4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), сопротивление термической усталости $> 5000 \text{ раз} \pm 500 \text{ раз}$, твердость HV $1900\text{--}2200 \pm 30$.

Высокоэнтروпийный цементированный карбид (WC на основе HEA)

Состав : Сочетание сплавов с высокой энтропией (таких как CoCrFeNiTi , TiZrHfNbTa) с карбидом вольфрама (WC) для формирования многоэлементных композиционных материалов, таких как WC-10% (CoCrFeNi), WC-15% (TiZrHfNb) или WC-20% (CrFeNiMo), с размером частиц порошка $20\text{--}60 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$.

Применение : подходит для медицинских приборов, используемых в экстремальных условиях (например, формы для лучевой терапии и имплантаты для лечения рака), компонентов глубоководного оборудования (например, клапаны подводных лодок) и аэрокосмических конструкций (например, панели терморегулирования спутников).

Особенности : Эффект стабилизации энтропии (энтропия конфигурации $> 1,5 R \pm 0,1 R$, R

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

— газовая постоянная $8,314 \text{ Дж/ моль} \cdot \text{К}$) улучшает фазовую стабильность, твердость HV $1700-1900 \pm 30$, коррозионную стойкость $<0,005 \text{ мм/год} \pm 0,001 \text{ мм/год}$ (в кислом растворе), радиационную стойкость $<0,01 \text{ Гр/ч} \pm 0,001 \text{ Гр/ч}$.

Наноккомпозит карбид вольфрама-кобальт (WC-Co)

Состав : Наноразмерный порошок карбида вольфрама (WC) (размер частиц $<100 \text{ нм} \pm 10 \text{ нм}$), смешанный с кобальтом (Co), например, WC-5%Co (нанометрический) или WC-8%Co (наноупрочненный), с удельной поверхностью порошка $>50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$.

Применение : подходит для высокоточных микроимплантатов (например, зубных имплантатов и микродатчиков), микроэлектронных соединителей (например, выводных рамок полупроводников) и прецизионных волочильных фильер (например, фильер для сверхтонкой медной проволоки).

Особенности : Высокая удельная поверхность ($>50 \text{ м}^2/\text{г} \pm 5 \text{ м}^2/\text{г}$), твердость HV $1900-2100 \pm 30$, размер зерна $<0,5 \text{ мкм} \pm 0,05 \text{ мкм}$, повышенная однородность микроструктуры (плотность границ зерен $>10^{15} \text{ м}^{-2} \pm 10^{14} \text{ м}^{-2}$), усталостная прочность $>10^6 \text{ циклов} \pm 10^4 \text{ циклов}$.

Композитный карбид вольфрама-карбида бора (WC-B4C)

Состав : Карбид бора (B4C) легируется для повышения износостойкости и ударопрочности, например, WC-10%Co-5%B4C или WC-8%Co-3%B4C, размер частиц порошка $15-50 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$.

Применение : подходит для штампов большой грузоподъемности (например, для формования автомобильных деталей), высокоскоростных вытяжных штампов (например, для волочения проволоки) и износостойких покрытий (например, рабочих поверхностей шлифовальных станков).

Характеристики : Твердость HV $2000-2200 \pm 30$, износостойкость $<0,03 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, прочность на сжатие $>4500 \text{ МПа} \pm 100 \text{ МПа}$, стойкость к высоким температурам $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Композитный карбид карбида вольфрама-нитрида титана (WC- TiN)

Состав : Легированный нитридом титана (TiN) для повышения поверхностной твердости и стойкости к окислению, например, WC-5%TiN-5%Co или WC-3%TiN-7%Co, размер частиц порошка $10-40 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$.

Применение : подходит для износостойких режущих инструментов (например, твердосплавных пластин), авиационных покрытий (например, антиокислительных защитных слоев) и высокотемпературных электронных корпусов.

Характеристики : Твердость HV $1900-2300 \pm 30$, стойкость к окислению при $1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, потеря массы $<0,01\% \pm 0,001\%$, удельное сопротивление $\sim 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см} \pm 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

2. Характеристики 3D-печатных твердосплавных материалов

Уникальные свойства карбидных материалов, изготовленных с помощью 3D-печати,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

являются результатом послойного осаждения, локализованных механизмов плавления или связывания, применяемых в аддитивном производстве, в сочетании с передовым контролем процесса:

Сложная геометрическая форма

Технология селективной лазерной плавки (СЛП) или электронно-лучевой плавки (ЭЛП) может использоваться для изготовления внутренних пористых структур (пористость $30\text{--}50\% \pm 5\%$, размер пор $100\text{--}500\text{ мкм} \pm 50\text{ мкм}$) или микроканалов (диаметр $0,1\text{--}0,5\text{ мм} \pm 0,05\text{ мм}$) для удовлетворения требований к врастанию кости в медицинские имплантаты (например, искусственные костные каркасы, способствующие скорости прикрепления костных клеток $>90\% \pm 2\%$), легкие авиационные детали (например, сотовые структуры, снижение веса $20\text{--}30\% \pm 2\%$) и охлаждающие каналы в формах.

Высокая точность и индивидуализация

Точность печати может достигать $20\text{--}50\text{ мкм} \pm 1\text{ мкм}$ (толщина слоя), что обеспечивает поддержку персонализированных медицинских устройств (таких как пластины для восстановления черепа, индивидуальные протезы с погрешностью $<0,1\text{ мм} \pm 0,01\text{ мм}$), сложных деталей в аэрокосмической отрасли (таких как лопатки турбин с шероховатостью поверхности $Ra <5\text{ мкм} \pm 0,5\text{ мкм}$) и микроструктур в электронных корпусах.

Градиент материала и функционализация

Благодаря многоматериальной печати или градиентному осаждению можно добиться градиентной пористости (от 10% до $60\% \pm 5\%$) или поверхностного покрытия (например, TiN, $5\text{--}15\text{ мкм} \pm 0,1\text{ мкм}$; CrN, толщина $10\text{--}20\text{ мкм} \pm 0,2\text{ мкм}$), что повышает биосовместимость (жизнеспособность клеток $>95\% \pm 2\%$), механические свойства (прочность на разрыв $>300\text{ МПа} \pm 20\text{ МПа}$) и коррозионную стойкость ($<0,005\text{ мм/год} \pm 0,001\text{ мм/год}$), что делает его пригодным для функциональных имплантатов и форм, устойчивых к экстремальным средам.

Сокращение отходов и эффективность использования ресурсов

По сравнению с традиционной резкой, 3D-печать сокращает отходы материала ($<5\% \pm 1\%$) и обеспечивает коэффициент утилизации порошка $>90\% \pm 2\%$, что соответствует тенденции устойчивого производства. Она имеет экономические преимущества, особенно при производстве высокотехнологичных авиационных компонентов (заменители титановых сплавов снижают затраты на $15\text{--}20\% \pm 2\%$) и медицинских приборов.

Быстрое прототипирование и итерации

Короткий цикл печати ($2\text{--}10\text{ ч} \pm 1\text{ ч}$ для одной детали, в зависимости от сложности), что облегчает проверку конструкции и корректировку партии. Он подходит для производства пресс-форм для рынков быстрого реагирования (время итерации пресс-формы сокращается на $50\% \pm 5\%$), медицинских изделий первой необходимости (например, для изготовления протезов по индивидуальному заказу) и испытаний авиационных прототипов.

Многомасштабный структурный контроль

Регулируя параметры печати (такие как толщина слоя $20\text{--}100\text{ мкм} \pm 5\text{ мкм}$, стратегия сканирования), можно добиться структурного контроля от наномасштаба (зерно $<0,5\text{ мкм} \pm 0,05\text{ мкм}$) до макромасштаба (размер компонента $100\text{--}500\text{ мм} \pm 1\text{ мм}$), что позволяет

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

удовлетворять потребности приложений в различных областях.

3. Характеристики 3D-печатных твердосплавных материалов

Характеристики 3D-печатного твердого сплава различаются в зависимости от процесса (например, SLM, EBM), соотношения материалов и постобработки, но в целом демонстрируют следующие характеристики, подтвержденные научными данными:

Механические свойства

Твёрдость: HV 1600–1900 $\pm$ 30 (немного ниже, чем у традиционного спечённого материала HV 1800–2000 $\pm$ 30). Из-за микроскопических пор ($<0,1\% \pm 0,01\%$) и неполной плотности (плотность 95–98% $\pm$ 1%) для достижения HV 1900 $\pm$ 20 требуется последующая обработка методом горячего изостатического прессования.

Прочность на сжатие: >3500 МПа $\pm$ 100 МПа, подходит для имплантатов с высокой нагрузкой (например, протезы тазобедренного сустава, нагрузки >2000 Н $\pm$ 100 Н) и форм (например, штамповочные штампы, давления >3000 МПа $\pm$ 100 МПа).

Вязкость разрушения: $8-12$ МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 1 МПа $\cdot$ м^{1/2}, ниже, чем у традиционных материалов ($10-15$ МПа $\cdot$ м^{1/2} $\pm$ 1 МПа $\cdot$ м^{1/2}), что связано с пористостью ($0,5\%-2\% \pm 0,5\%$) и дефектами границ зерен (плотность $>10^{-4}$ м⁻² $\pm$ 10^{-3} м⁻²).

Химическая стабильность

Коррозионная стойкость: $<0,01$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год (в 0,9% растворе NaCl, pH 7-9), легирование TiC или TaC может дополнительно снизить ее до $<0,008$ мм/год $\pm$ 0,001 мм/год, подходит для компонентов морской среды (например, опор трубопроводов морской воды).

Стойкость к окислению: потеря массы при 600°C $\pm$ 20°C составляет $<0,01\% \pm 0,001\%$, при 800°C $\pm$ 20°C составляет $<0,05\% \pm 0,005\%$, подходит для высокотемпературной стерилизации или для авиационных высокотемпературных деталей (например, сопел).

Биосовместимость

Жизнеспособность клеток: $>95\% \pm 2\%$ (протестировано в соответствии с ISO 10993-5 с использованием линии клеток L929), антибактериальная активность серебряного покрытия $>90\% \pm 2\%$ (против E. coli и Staphylococcus aureus), подходит для медицинских имплантатов (например, ортопедических гвоздей).

Степень интеграции кости: $>90\% \pm 2\%$ (благодаря пористой структуре, размер пор 200-400 мкм $\pm$ 50 мкм), что немного ниже, чем у традиционных имплантатов ($>95\% \pm 2\%$), что требует оптимизации распределения пор и модификации поверхности.

Тепловые свойства

Теплопроводность: >100 Вт/м $\cdot$ К $\pm$ 5 Вт/м $\cdot$ К, лучше, чем у нержавеющей стали (16 Вт/м $\cdot$ К $\pm$ 2 Вт/м $\cdot$ К) и около 50% алюминия (237 Вт/м $\cdot$ К $\pm$ 5 Вт/м $\cdot$ К), но локальное плавление может вызвать термическое напряжение (<50 МПа $\pm$ 5 МПа), что влияет на структурную целостность.

Коэффициент термодиффузии: >50 мм²/с $\pm$ 5 мм²/с, подходит для приложений с быстрым рассеиванием тепла, таких как корпусирование электроники (плотность теплового потока микросхемы >100 Вт/см² $\pm$ 10 Вт/см²).

Коэффициент теплового расширения: $\sim 5,2 \times 10^{-6}$ /°C $\pm$ $0,5 \times 10^{-6}$ /°C, хорошо совпадает с Si-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чипом ($4,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) ($< 5\% \pm 1\%$).

4. Проблемы с 3D-печатью твердосплавных материалов

Несмотря на то, что технология 3D-печати привнесла инновации в сферу твердых сплавов, она по-прежнему сталкивается со следующими техническими проблемами, требующими сочетания материаловедения и инженерного анализа:

Микроскопические дефекты и поры

В процессе селективной лазерной плавки (СЛП) в результате быстрого охлаждения (скорость охлаждения $10^3 - 10^5 \text{ K/c} \pm 10^2 \text{ K/c}$) образуются сферические поры (диаметром $10 - 50 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$) с пористостью $0,5\% - 2\% \pm 0,5\%$, что снижает вязкость разрушения ($< 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$), особенно при высоких скоростях деформации ($> 10^{-3} \text{ c}^{-1} \pm 10^{-4} \text{ c}^{-1}$).

Решение : Оптимизировать параметры лазера (мощность $200 - 400 \text{ Вт} \pm 10 \text{ Вт}$, скорость сканирования $500 - 1000 \text{ мм/с} \pm 50 \text{ мм/с}$, коэффициент перекрытия $20\% - 30\% \pm 2\%$) или выполнить постобработку горячим изостатическим прессованием (HIP, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$, время обработки $2 - 4 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$).

Неоднородный фазовый состав

Локальные высокие температуры ($> 2500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) вызывают разложение карбида вольфрама (WC) с образованием W_2C или свободного углерода (содержание $< 1\% \pm 0,1\%$), что влияет на твердость (HV уменьшается на $5\% - 10\% \pm 1\%$) и износостойкость (скорость износа $> 0,05 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м} \pm 0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$), особенно в процессе ЭПП.

Решение : Отрегулируйте размер частиц порошка ($10 - 50 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$) или добавьте стабилизаторы (например, карбид ванадия, VC, $0,1 - 0,5\% \pm 0,01\%$; карбид ниобия, NbC, $0,2 - 0,6\% \pm 0,05\%$) для замедления фазового превращения.

Остаточные напряжения и трещины

Температурные градиенты ($\Delta T > 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) вызывают остаточные напряжения ($> 200 \text{ МПа} \pm 20 \text{ МПа}$, локально до $500 \text{ МПа} \pm 50 \text{ МПа}$), которые могут привести к образованию микротрещин (длиной $< 0,1 \text{ мм} \pm 0,01 \text{ мм}$), особенно в сложных конструкциях, таких как тонкостенные детали или консольные конструкции.

Решение : Внедрить предварительный нагрев подложки ($200 - 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) или термическую обработку для снятия напряжений ($800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $1 - 2 \text{ ч} \pm 0,1 \text{ ч}$, скорость охлаждения $< 5^\circ\text{C}/\text{мин} \pm 1^\circ\text{C}/\text{мин}$) в сочетании с вибрационной обработкой (частота $50 - 100 \text{ Гц} \pm 5 \text{ Гц}$).

Требования к шероховатости поверхности и постобработке

Шероховатость печатной поверхности R_a составляет $5 - 15 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, что требует механической полировки ($R_a < 0,1 \text{ мкм} \pm 0,01 \text{ мкм}$) или нанесения покрытия, что увеличивает стоимость производства ($> 10\% \pm 2\%$) и влияет на гладкость поверхности медицинских имплантатов (скорость прикрепления бактерий пропорциональна R_a , $> 10^4 \text{ КОЕ}/\text{см}^2 \pm 10^3 \text{ КОЕ}/\text{см}^2$ при $R_a > 5 \text{ мкм}$).

Решение : Оптимизировать стратегию печати (например, сканирование шахматной доски, степень перекрытия $20\% - 30\% \pm 2\%$, оптимизация структуры поддержки) или разработать самосмазывающееся покрытие (например, дисульфид молибдена, MoS_2 , толщина $1 - 5 \text{ мкм} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,1 мкм ; графеновое покрытие, толщина 2-10 мкм $\pm$ 0,2 мкм) .

Стоимость материала и повторяемость

Нанопорошки и сложное оборудование (стоимость SLM и другого оборудования) увеличивают затраты, а однородность массового производства низкая (отклонение производительности $>5\% \pm 1\%$, отклонение пористости $>1\% \pm 0,2\%$), что ограничивает крупномасштабные применения.

Решение : Разработать недорогие прекурсоры (например, композитные порошки WC-Co с размером частиц 20-30 мкм $\pm$ 2 мкм) для снижения затрат или создать базу данных параметров процесса (на основе машинного обучения с точностью прогнозирования $>95\% \pm 2\%$) для улучшения повторяемости.

5. Перспективы развития 3D-печати с использованием твердосплавных материалов

Оптимизация процесса

Разработать многолазерную селективную лазерную плавку (SLM, мощность >500 Вт $\pm$ 20 Вт, количество лазерных лучей $2-4 \pm 1$) или электронно-лучевую плавку (EBM, плотность пучка $>10^4$ А/м² $\pm$ 10^3 А/м², оптимизированная стратегия сканирования) для уменьшения пористости ($<0,1\% \pm 0,01\%$) и напряжения (<100 МПа $\pm$ 10 МПа), а также улучшения структурной целостности (усталостной долговечности $>10^7$ циклов $\pm$ 10^5 циклов) аэрокосмических компонентов, таких как лопатки турбин.

Инновации в области материалов

Изучите высокоэнтропийные карбиды, не содержащие WC (например, (TiZrHfNb)C , твердость HV 1500-1800 $\pm$ 30, вязкость разрушения 12-15 МПа·м^{1/2} $\pm$ 1 МПа·м^{1/2}) или биосовместимые армированные материалы (например, WC-Ni-Cr-Ti, степень интеграции кости $>95\% \pm 2\%$, степень антибактериальности $>95\% \pm 2\%$) для удовлетворения медицинских и экстремальных потребностей (например, глубоководные буровые долота).

Интеллектуальное производство

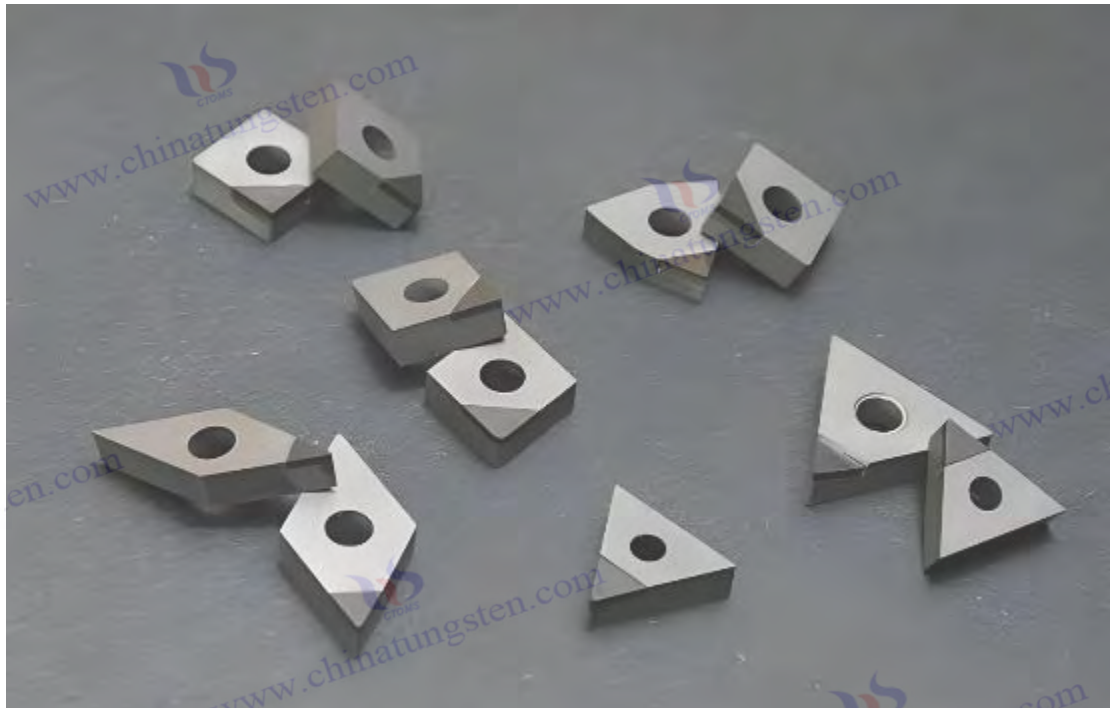
Интегрированный мониторинг в реальном времени (точность измерения температуры $<0,1^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$, обнаружение деформации $<0,01$ мм $\pm$ 0,001 мм на основе инфракрасного тепловидения и лазерного интерферометра) в сочетании с искусственным интеллектом для оптимизации параметров печати (адаптивное управление, погрешность $<1\% \pm 0,1\%$) повышает эффективность изготовления пресс-форм (производительность увеличивается на 20%-30% $\pm$ 2%) и контроль качества.

Устойчивость

Использование переработанных порошков (степень повторного использования $>90\% \pm 2\%$ на основе просеивания порошка и повторного измельчения в шаровой мельнице) , процессов с низким потреблением энергии (потребление энергии <10 кВт·ч/кг $\pm$ 1 кВт·ч/кг при использовании высокоэффективных лазерных источников) и разлагаемых вспомогательных материалов способствует развитию экологически чистого производства, особенно в энергетических приложениях (например, в производстве форм для лопастей ветряных турбин).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технология 3D-печати карбидными сплавами имеет большой потенциал применения в медицинской, аэрокосмической промышленности и производстве пресс-форм. Её дальнейшее развитие будет зависеть от скоординированного прогресса в области оптимизации технологических процессов (контроль пористости $<0,05\% \pm 0,01\%$), инноваций в области материалов (разработка новых высокоэнтروпийных сплавов) и интеллектуального производства (технология цифровых двойников). Ожидается, что она получит широкомасштабное промышленное применение в ближайшие 5–10 лет.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

Оглавление

Часть 4: Классификация и области применения твердых сплавов

Глава 14: Новые области применения и multifunctionality твердого сплава

14.0 Свойства твердого сплава

14.1 Электронные и проводящие компоненты из цементированного карбида

14.1.1 Твердосплавные формы для электронной промышленности

- (1) Штамповочная матрица с твердосплавным выводом
- (2) Форма для упаковки карбидной стружки
- (3) Твердосплавный штамп для пробивки печатных плат
- (4) Штамповка твердосплавных микросоединителей
- (5) Форма для упаковки датчика из карбида
- (6) Форма для лазерного сверления карбида

14.1.2 Твердосплавная подложка для отвода тепла в электронной промышленности

- (1) Композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама и меди (WC-Cu)
- (2) Композитная подложка из карбида вольфрама и алмаза (WC-алмаз) для рассеивания тепла

Композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама-нитрида алюминия (WC- AlN)

Композитная подложка из карбида вольфрама-карбида кремния (WC- SiC) для рассеивания тепла

- (5) Композитная теплоотводящая подложка из карбида вольфрама-нитрида бора (WC-BN)

14.1.3 Технология, принципы и усовершенствования твердосплавных штампов и теплоотводящих подложек

14.1.2 Оптимизация электропроводности твердого сплава

14.2 Биомедицинское применение твердого сплава

14.2.1 Твердосплавные имплантаты и инструменты

14.2.2 Биосовместимость и модификация поверхности твердого сплава

14.3 Применение твердого сплава в катализе и хранении энергии

Композитный катализатор карбид вольфрама-платина (WCPt)

14.3.2 Потенциал использования цементированного карбида в топливных элементах, суперконденсаторах, системах хранения водорода и литиевых батареях

14.4 Аддитивное производство карбида вольфрама (3D-печать)

14.4.1 Технология печати материалами на основе карбида вольфрама (WC) (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)

14.4.2 Исследование и применение двумерных (2D) материалов на основе карбида вольфрама (WC)

14.4.3 Производительность и проблемы 3D-печати материалов на основе карбида вольфрама (WC) (пористость <2%)

14.5 Применение твердого сплава в обороне и экстремальных условиях

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 14.5.1 Применение материалов на основе карбида вольфрама (WC) в оборонной и военной областях
- 14.5.2 Применение материалов на основе WC в экстремальных условиях на больших глубинах и в космосе
- 14.5.3 Проблемы радиационной и термической стойкости материалов на основе твердого сплава (WC)
- 14.6 Интеллектуальное производство и применение датчиков из твердого сплава
- 14.6.1 Сенсорная технология (давления, температуры, вибрации) на основе карбида вольфрама (WC)
- 14.6.2 Инструменты и мониторинг применения материалов на основе карбида вольфрама (WC) в интеллектуальном производстве
- 14.6.3 Свойства и проблемы материалов на основе карбида вольфрама (WC)

Ссылки

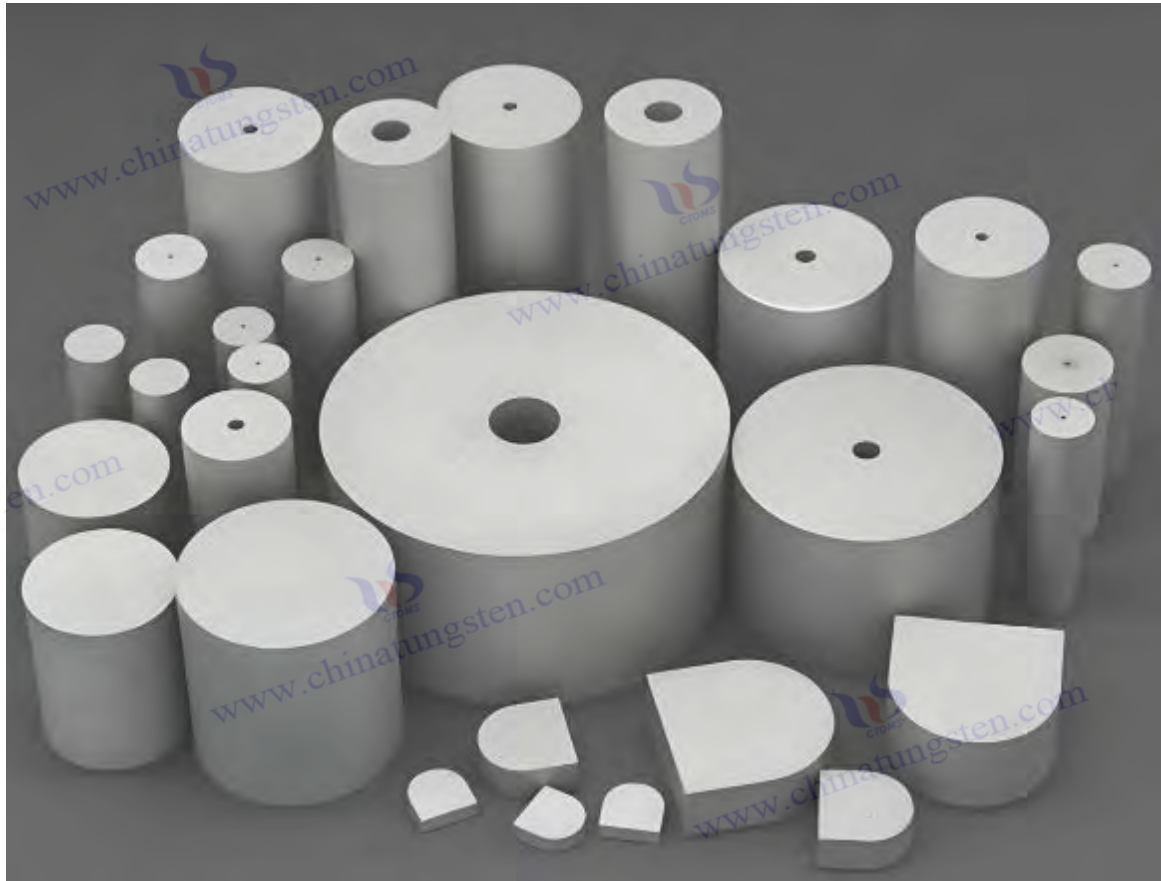
приложение:

- Катализаторы на основе карбида вольфрама (WC) для топливных элементов
- Обзор применения карбида в топливных элементах
- Проводящий карбид
- Биомедицинские инструменты из цементированного карбида
- Карбидные медицинские имплантаты
- Карбидная подложка для теплоотвода
- Форма для упаковки карбидной стружки
- ASTM E92-23 Стандартный метод испытаний твердости по Виккерсу и Кнупу металлических материалов
- ASTM G65-23 Стандартный метод испытаний на истирание металлов и сплавов сухим песком/резиновым колесом
- Каковы типы и области применения твердосплавных форм?
- JB/T 8144-2010 Технические требования к штампам
- Технические условия на фильеры из твердого сплава
- YB/T 5136-2006 Технические требования к формам для порошковой металлургии
- GB/T 6110-2021 Волоочильные фильеры. Конструктивные типы и размеры твердосплавных волоочильных фильеров
- JB/T 3943-2017 Волоочильные фильеры – Технические характеристики твердосплавных волоочильных фильеров
- Каковы характеристики и области применения твердосплавных теплорассеивающих подложек?
- Каковы области применения твердого сплава в катализе и хранении энергии?
- Каковы области применения твердого сплава в медицине ?
- Типы, характеристики, производительность и проблемы 3D-печати твердосплавными материалами

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
sales@chinatungsten.com