

Что такое серебряно-вольфрамовый сплав

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 с полной собственностью и независимым юридическим лицом, 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 в качестве отправной точки — первого в Китае веб-сайта с продукцией из вольфрама высшего уровня — является пионерской компанией электронной коммерции в стране, сосредоточенной 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, высокоплотных сплавов, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов по вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков, с более чем миллионом страниц новостей, цен и анализа рынка, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами. С 2013 года ее официальный аккаунт WeChat "CHINATUNGSTEN ONLINE" опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря совокупным посещениям кластера ее веб-сайта и официального аккаунта, достигающим миллиардов раз, он стал признанным мировым и авторитетным информационным центром для отраслей вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по тенденциям рынка.

Основываясь на технологиях и опыте CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами проектирует и производит вольфрамовые и молибденовые изделия с определенным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Она предлагает комплексные услуги по полному процессу, начиная от открытия пресс-формы, опытного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству для более чем 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий более чем 130 000 клиентов по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP еще больше углубляет интеллектуальное производство и интегрированные инновации вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета.

Доктор Ханис и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем 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 с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является известным 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 широкую похвалу в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услуг.



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

Глава 1: Базовые знания о серебряно-вольфрамовом сплаве

- 1.1 Понятие о серебряно-вольфрамовом сплаве
 - 1.1.1 Определение серебряно-вольфрамового сплава
 - 1.1.2 Отличия от сплава вольфрам-медь
 - 1.1.3 Отличия от вольфрамо-молибденового сплава
- 1.2 История развития серебряно-вольфрамового сплава
 - 1.2.1 Ранняя стадия разведки
 - 1.2.2 Технологические прорывы и начало промышленного применения
 - 1.2.3 Современные технологические инновации
- 1.3 Важность и значение отраслевых исследований
 - 1.3.1 Содействие развитию материаловедения
 - 1.3.2 Ценность применения в различных областях

Глава 2: Состав и характеристики сплава серебра с вольфрамом

- 2.1 Характеристики серебра и вольфрама
 - 2.1.1 Физические и химические свойства серебра
 - 2.1.1 Физические и химические свойства вольфрама
 - 2.1.3 Состав серебра и вольфрама
- 2.2 Влияние соотношения состава сплава серебра и вольфрама
 - 2.2.1 Влияние соотношения серебра и вольфрама на прочность сплава на изгиб
 - 2.2.2 Влияние соотношения серебра и вольфрама на вязкость сплава
 - 2.2.3 Влияние соотношения серебра и вольфрама на проводимость сплавов
 - 2.2.4 Влияние соотношения серебра и вольфрама на теплопроводность сплава
 - 2.2.5 Влияние соотношения серебра и вольфрама на плотность сплава
 - 2.2.6 Влияние соотношения серебра и вольфрама на твердость сплава
 - 2.2.7 Влияние соотношения серебра и вольфрама на жаростойкость сплава
 - 2.2.8 Влияние соотношения серебра и вольфрама на стойкость сплавов к дуговой эрозии
- 2.3 Анализ характеристик серебряно-вольфрамового сплава
 - 2.3.1 Механизм образования и преимущества высокой твердости сплава серебра с вольфрамом
 - 2.3.1.1 Микроструктурный механизм формирования высокой твердости
 - 2.3.1.2 Преимущества высокой твердости в износостойких применениях
 - 2.3.1.3 Сравнение твердости с другими сплавами и преимущества
 - 2.3.2 Принцип и характеристики стойкости к дуговой эрозии сплава серебра и вольфрама
 - 2.3.2.1 Механизм дуговой эрозии
 - 2.3.2.2 Внутренний принцип стойкости серебряно-вольфрамового сплава к дуговой эрозии
 - 2.3.2.3 Различия в показателях стойкости к дуговой эрозии в различных условиях эксплуатации
 - 2.3.2.4 Способы повышения стойкости к дуговой эрозии
 - 2.3.3 Антиадгезионные и антисварочные свойства серебряно-вольфрамового сплава
 - 2.3.3.1 Причины адгезии и сваривания
 - 2.3.3.2 Антиадгезионные свойства сплава серебра и вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 2.3.3.3 Анализ факторов, влияющих на антиадгезионные и антисварочные свойства
- 2.3.4 Принцип и применение превосходной проводимости сплава серебра с вольфрамом
 - 2.3.4.1 Физическая природа проводимости и механизм проводимости сплава серебра с вольфрамом
 - 2.3.4.2 Изменения проводимости при различных соотношениях компонентов
 - 2.3.4.3 Преимущества применения токопроводящих материалов в электрооборудовании
- 2.3.5 Характеристики и значения хорошей теплопроводности серебряно-вольфрамового сплава
 - 2.3.5.1 Основные принципы теплопроводности и механизм теплопроводности сплава серебра с вольфрамом
 - 2.3.5.2 Связь между теплопроводностью и эффектом рассеивания тепла
 - 2.3.5.3 Значение теплопроводности в условиях высоких температур
- 2.3.6 Характеристики и механизм коррозионной стойкости сплава серебра и вольфрама
 - 2.3.6.1 Влияние различных коррозионных сред на сплав серебра с вольфрамом
 - 2.3.6.2 Внутренний механизм коррозионной стойкости сплава серебра с вольфрамом
 - 2.3.6.3 Технологические средства повышения коррозионной стойкости
- 2.4 CTIA GROUP LTD Паспорт безопасности серебряно-вольфрамового сплава

Глава 3: Наблюдение за характеристиками микроструктуры и корреляцией эксплуатационных характеристик сплава серебра и вольфрама

- 3.1 Наблюдение за характеристиками микроструктуры сплава серебра с вольфрамом
 - 3.1.1 Морфология и размерные характеристики зерна
 - 3.1.2 Фазовое распределение и характеристики интерфейса
 - 3.1.3 Микроскопические проявления пористости и дефектов
 - 3.1.4 Различия в микроструктуре при различных процессах подготовки
- 3.2 Внутренняя связь между структурой сплава серебра с вольфрамом и макроскопическими свойствами
 - 3.2.1 Механизм влияния зеренной структуры на прочность и вязкость
 - 3.2.2 Корреляция между распределением фаз и электро- и теплопроводностью
 - 3.2.3 Влияние пористости и дефектов на твердость и коррозионную стойкость
- 3.3 Эволюция микроструктуры сплава серебра с вольфрамом
 - 3.3.1 Эволюция микроструктуры, вызванная изменениями в соотношении компонентов состава
 - 3.3.2 Микроструктурные превращения при термической обработке
 - 3.3.3 Влияние среды эксплуатации на микроструктуру и обратную связь по производительности
- 3.4 Методы управления микроструктурой сплава серебро-вольфрам
 - 3.4.1 Метод контроля микроструктуры, основанный на процессе подготовки
 - 3.4.2 Оптимизация микроструктуры путем добавления легирующих элементов
 - 3.4.3 Связь между регулированием микроструктуры и настройкой производительности

Глава 4: Процесс приготовления сплава серебра с вольфрамом

- 4.1 Метод порошковой металлургии для получения сплава серебра с вольфрамом
 - 4.1.1 Процесс приготовления порошка и основные моменты
 - 4.1.2 Принцип и работа процесса прессования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.3 Контроль и влияние процесса спекания
- 4.2 Производство сплава серебра с вольфрамом методом вакуумной инфильтрации
- 4.2.1 Принцип инфильтрации и требования к оборудованию
- 4.2.2 Этапы процесса и оптимизация параметров
- 4.2.3 Преимущества и ограничения процесса
- 4.3 Сравнение процессов и основа выбора
- 4.3.1 Анализ затрат различных процессов
- 4.3.2 Различия в производительности и выбор процесса
- 4.3.3 Эффективность производства и адаптация процесса

Глава 5: Эксплуатационные испытания и характеристика сплава серебра и вольфрама

- 5.1 Испытание физических свойств серебряно-вольфрамового сплава
- 5.1.1 Метод определения плотности
- 5.1.2 Стандарты и операции испытания на твердость
- 5.1.3 Методы испытаний электропроводности и теплопроводности
- 5.2 Оценка химических свойств сплава серебра с вольфрамом
- 5.2.1 Среда и методы испытаний на коррозионную стойкость
- 5.2.2 Методы испытаний антиоксидантной активности
- 5.3 Технология определения микроструктуры сплава серебра и вольфрама
- 5.3.1 Метод наблюдения с помощью металлографического микроскопа
- 5.3.2 Применение анализа с помощью сканирующей электронной микроскопии
- 5.3.3 Структурный анализ методом рентгеновской дифракции

Глава 6: Области применения серебряно-вольфрамового сплава

- 6.1 Применение серебряно-вольфрамового сплава в электротехнике
- 6.1.1 Преимущества применения в низковольтных силовых выключателях
- 6.1.1.1 Требования к характеристикам материалов низковольтных силовых выключателей
- 6.1.1.2 Применение сплава серебра и вольфрама в низковольтных силовых переключателях
- 6.1.1.3 Преимущества использования материалов печатных плат в низковольтных силовых переключателях по сравнению с другими материалами
- 6.1.2 Спрос на электротехнические сплавы для высоковольтных выключателей
- 6.1.2.1 Условия эксплуатации высоковольтного выключателя и особые требования к электротехническим сплавам
- 6.1.2.2 Характеристики сплава серебра и вольфрама, отвечающие требованиям высоковольтных выключателей
- 6.1.3 Применение реле и воздушных выключателей
- 6.1.3.1 Принцип работы реле и требования к материалам контактов
- 6.1.3.2 Эффект применения серебряно-вольфрамового сплава в реле
- 6.1.3.3 Требования к рабочим характеристикам воздушных автоматических выключателей и совместимость серебряно-вольфрамового сплава
- 6.1.4 Применение в разъединителях и заземлителях
- 6.1.4.1 Требования к функциям и материалам для разъединителей и заземлителей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.1.4.2 Преимущества серебряно-вольфрамового сплава в разъединителях и заземлителях
- 6.2 Применение серебряно-вольфрамового сплава в электронике
 - 6.2.1 Требования к производительности и области применения электроэрозионных электродов
 - 6.2.1.1 Требования к показателям эффективности электродных материалов для электрообработки
 - 6.2.1.2 Преимущества использования сплава серебра и вольфрама в качестве электрода для электрообработки
 - 6.2.1.3 Выбор электродов из сплава серебра и вольфрама для различных сценариев электрообработки
 - 6.2.2 Роль материалов в микроэлектронике
 - 6.2.2.1 Требования к точности материалов в области микроэлектроники
 - 6.2.2.2 Применение сплава серебра с вольфрамом в микроэлектронных корпусах
 - 6.2.2.3 Роль сплава серебра и вольфрама в микроэлектронных соединительных компонентах
 - 6.2.3 Исследование применения датчиков
 - 6.2.3.1 Требования к рабочей среде датчика и эксплуатационным характеристикам материалов
 - 6.2.3.2 Возможные сценарии применения сплава серебра и вольфрама в датчиках
- 6.3 Применение серебряно-вольфрамового сплава в аэрокосмической промышленности
 - 6.3.1 Применение облицовки сопла твердотопливного ракетного двигателя
 - 6.3.1.1 Проблемы рабочей среды и материалов, связанных с облицовкой сопла твердотопливного ракетного двигателя
 - 6.3.1.2 Характеристики серебряно-вольфрамового сплава в качестве вкладыша горловины сопла
 - 6.3.1.3. Влияние подготовки и нанесения футеровки горловины сопла из сплава серебра и вольфрама
 - 6.3.2 Потенциальные области применения компонентов аэрокосмических двигателей
 - 6.3.2.1 Требования к материалам, эксплуатируемым в условиях высоких температур и давлений в авиационных двигателях
 - 6.3.2.2 Потенциал применения сплава серебра с вольфрамом в отдельных деталях авиационных двигателей
 - 6.3.3 Применение в электрических системах космических аппаратов
 - 6.3.3.1 Требования к надежности электрических систем космических аппаратов
 - 6.3.3.2 Применение сплава серебра и вольфрама в контакторах и других компонентах космических аппаратов
- 6.4 Применение серебряно-вольфрамового сплава в других областях
 - 6.4.1 Сценарии применения в металлургической промышленности
 - 6.4.1.1 Условия работы и требования к материалам металлургического оборудования
 - 6.4.1.2 Применение сплава серебра с вольфрамом в электродах металлургических печей
 - 6.4.1.3 Использование сплава серебра и вольфрама в металлургических испытательных приборах
 - 6.4.2 Варианты использования в спортивном оборудовании
 - 6.4.2.1 Требования к эксплуатационным характеристикам материалов для высококачественного спортивного оборудования
 - 6.4.2.2 Применение сплава серебра и вольфрама в головках для гольфа, рыболовных снастях и другом оборудовании
 - 6.4.3 Исследования и применение в области медицинских приборов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.4.3.1 Требования к биосовместимости материалов и эксплуатационным характеристикам медицинских изделий
- 6.4.3.2 Применение сплава серебра и вольфрама в медицинском диагностическом оборудовании
- 6.4.3.3 Потенциальные возможности применения серебряно-вольфрамового сплава в прецизионных хирургических инструментах
- 6.4.4 Перспективы применения в области атомной энергетики
 - 6.4.4.1 Требования к радиационной стойкости и другим свойствам материалов атомно-энергетического оборудования
 - 6.4.4.2 Анализ возможности применения сплава серебра с вольфрамом в области атомной энергетики

Глава 7: Перспективы развития серебряно-вольфрамового сплава

- 7.1 Исследование новой технологии получения сплава серебра с вольфрамом
 - 7.1.1 Потенциальные области применения технологии аддитивного производства
 - 7.1.2 Обзор других передовых технологий подготовки
- 7.2 Тенденции исследований в области оптимизации характеристик серебряно-вольфрамового сплава
 - 7.2.1 Направления исследований для улучшения комплексной производительности
 - 7.2.2 Повышение производительности для конкретных приложений

Приложение

- Приложение А: Китайский национальный стандарт для сплава серебра и вольфрама
- Приложение В: Международные стандарты для сплава серебра и вольфрама
- Приложение С: Стандарты серебряно-вольфрамовых сплавов в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах мира
- Приложение D: Терминология серебряно-вольфрамового сплава

Ссылки



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

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
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

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

Глава 1. Базовые знания о сплаве серебра и вольфрама

Серебряно-вольфрамовый сплав, являясь высокопроизводительным композиционным материалом, продемонстрировал широкий потенциал применения в электротехнике, электронике, обороне и промышленности благодаря своей превосходной электропроводности, теплопроводности, высокой термостойкости и стойкости к дуговой коррозии. Этот сплав, полученный методом порошковой металлургии, сочетает в себе высокую электро- и теплопроводность серебра с высокой температурой плавления и твёрдостью вольфрама и может соответствовать высоким требованиям, предъявляемым к материалам, используемым в условиях сильного тока, высоких температур и износа. В связи с быстрым развитием электрификации и высокоэнергетического оборудования, серебряно-вольфрамовый сплав приобретает всё большую значимость в области электрических контактов, автоматических выключателей и электродных материалов.

1.1 Понятие о серебряно-вольфрамовом сплаве

Серебряно-вольфрамовый сплав – это композиционный материал, основными компонентами которого являются серебро и вольфрам. Он обычно изготавливается методом порошковой металлургии и широко используется там, где требуются высокая электропроводность, стойкость к дуговой коррозии и высокие температуры. Серебро обеспечивает отличную электро- и теплопроводность, а вольфрам – высокую температуру плавления, твёрдость и износостойкость, благодаря чему сплав хорошо работает в электрических контактах и условиях высоких температур. Характеристики серебряно-вольфрамового сплава можно оптимизировать, регулируя соотношение серебра и вольфрама для различных применений, таких как высоковольтные переключатели, сварочные электроды и электротехнические компоненты для аэрокосмической промышленности.

1.1.1 Определение серебряно-вольфрамового сплава

Серебряно-вольфрамовый сплав представляет собой композитный материал, изготовленный из серебра и вольфрама посредством процесса порошковой металлургии. Серебро используется в качестве матрицы или связующей фазы, а вольфрам – в качестве высокоплавкой армирующей фазы. Преимущества обоих материалов объединены, чтобы сформировать материал с превосходными характеристиками. Высокая электропроводность и теплопроводность серебра делают его идеальной проводящей матрицей, в то время как высокая температура плавления и твердость вольфрама придают сплаву отличную высокотемпературную стойкость и стойкость к дуговой коррозии. Процесс приготовления обычно включает смешивание порошков, прессование, спекание и последующую обработку. Серебро образует жидкую фазу в процессе спекания, смачивает частицы вольфрама, заполняет зазоры и формирует плотную микроструктуру. Соотношение компонентов в составе серебряно-вольфрамового сплава можно регулировать. Чем выше содержание серебра, тем лучше проводимость, а чем выше содержание вольфрама, тем выше износостойкость и высокотемпературная стойкость. Он подходит для таких сцен, как

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электрические контакты, контакты автоматических выключателей, электроды для контактной сварки и детали, напыленные плазмой. Его немагнитность и низкий коэффициент теплового расширения еще больше расширяют возможности его применения в высокоточных электрических и высокотемпературных средах.

Основное преимущество сплава серебра и вольфрама заключается в его комплексных эксплуатационных характеристиках. Высокая проводимость серебра обеспечивает эффективность передачи тока и подходит для высоковольтных электрических систем; высокая температура плавления и стойкость вольфрама к дуговой коррозии позволяют сплаву оставаться стабильным при высоких токах или частых переключениях и продлевают его срок службы. Прочность и износостойкость сплава позволяют ему выдерживать механические удары и дуговую эрозию, что делает его пригодным для динамических электрических сред. Гибкость процесса изготовления позволяет оптимизировать характеристики путем регулирования соотношения серебра и вольфрама или добавления микроэлементов (таких как никель) в соответствии с конкретными требованиями применения. Сплав серебра и вольфрама широко используется в электротехнической и промышленной областях для изготовления высоконадежных контактов и электродов, особенно в сценариях, требующих высокой проводимости и дугостойкости, таких как энергетические системы, аэрокосмические электрические соединения и промышленная сварка.

1.1.2 Отличия от сплава вольфрам-медь

Сплав серебра и вольфрама (Ag-W) и сплав вольфрама и меди (W-Cu) — это композитные материалы на основе вольфрама, изготовленные методом порошковой металлургии и широко используемые в электротехнике и терморегулировании. Однако между ними имеются существенные различия в составе, эксплуатационных характеристиках и вариантах применения.

Состав и приготовление : В сплаве серебра и вольфрама серебро используется в качестве матрицы или связующей фазы, а вольфрам — в качестве армирующей фазы. Содержание серебра обычно высокое, что обеспечивает сплаву отличную электропроводность. В сплаве вольфрама и меди в качестве матрицы вольфрам используется вольфрам, а медь — в качестве связующей фазы. Содержание меди относительно низкое, и оно в основном влияет на теплопроводность и производительность обработки. Процесс спекания сплава серебра и вольфрама основан на том, что жидкая фаза серебра смачивает частицы вольфрама, образуя однородную и плотную структуру, в то время как сплав вольфрама и меди часто получают методом инфильтрации, сначала спекая вольфрамовый скелет, а затем инфильтруя жидкую медь. Этот процесс более сложный и энергоемкий. Содержание серебра в сплаве серебра и вольфрама делает его более дорогим, в то время как сплав вольфрама и меди более экономичен из-за более низкой цены на медь.

Различия в производительности : Электропроводность сплава серебра и вольфрама лучше, чем у сплава вольфрама и меди, потому что электропроводность серебра выше, чем у меди, и он подходит для высокоточных электрических контактов, таких как автоматические выключатели и контакты переключателей. Теплопроводность сплава вольфрама и меди сильнее, потому что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплопроводность меди немного выше, чем у серебра, и он подходит для приложений терморегулирования, таких как электронные подложки для рассеивания тепла и электродные материалы. Стойкость к дуговой коррозии сплава серебра и вольфрама лучше, чем у сплава вольфрама и меди, потому что высокая температура плавления и химическая стабильность серебра делают его более устойчивым к абляции в дуговой среде, и он подходит для электрических систем с частым переключением. Плотность сплава вольфрама и меди немного ниже, чем у сплава серебра и вольфрама, потому что плотность меди ниже, чем у серебра, что ограничивает его применение в приложениях, требующих высокой балансировки веса. Прочность сплава серебра с вольфрамом немного уступает прочности сплава вольфрама с медью, поскольку пластичность серебра ниже, чем у меди, но его твердость и износостойкость выше, и он подходит для условий высокого износа.

Сценарии применения : Серебряно-вольфрамовый сплав в основном используется для электрических контактов и электродных материалов, таких как контакты высоковольтных выключателей, электроды для контактной сварки и детали с плазменным напылением. Его превосходная проводимость и дугостойкость удовлетворяют требованиям сильноточной и частой эксплуатации. Вольфрамово-медный сплав более широко используется в компонентах терморегулирования, таких как подложки силовых полупроводников, радиаторы серверов и облицовка сопел ракет. Его высокая теплопроводность и производительность обработки больше подходят для рассеивания тепла и высокотемпературных сред. Немагнитная природа серебряно-вольфрамового сплава дает ему преимущество в электромагнитно-чувствительных средах (таких как оборудование МРТ), в то время как немагнитная природа вольфрамово-медного сплава также применима, но его более низкая плотность ограничивает приложения экранирования или противовеса. Высокая стоимость серебряно-вольфрамового сплава ограничивает его применение в сценариях, чувствительных к стоимости, в то время как вольфрамово-медный сплав более экономичен и подходит для массового производства.

Резюме преимуществ и недостатков: сплав серебра и вольфрама превосходит сплав вольфрама и меди по электропроводности и стойкости к дуговой коррозии, и подходит для высоконадежных электрических контактов, но он более дорогой и имеет немного более низкую теплопроводность. Сплав вольфрама и меди имеет больше преимуществ в теплопроводности и производительности обработки, и подходит для компонентов терморегулирования, но имеет более низкую стойкость к дуге и плотность. Выбор материалов должен быть взвешен в соответствии с требованиями применения. Например, сплав серебра и вольфрама предпочтителен для электрических контактов, в то время как сплав вольфрама и меди предпочтителен для подложек для рассеивания тепла. Направления оптимизации включают повышение прочности сплава серебра и вольфрама путем добавления микроэлементов (таких как никель) или использование аддитивного производства для снижения стоимости подготовки сплава вольфрама и меди.

1.1.3 Отличия от вольфрамо-молибденового сплава

Сплав серебра и вольфрама (Ag-W) и сплав вольфрама и молибдена (W-Mo) — это композитные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материалы на основе вольфрама, широко используемые в высокотемпературных и электрических полях, но между ними есть существенные различия в составе, эксплуатационных характеристиках и вариантах применения.

Состав и приготовление : В сплаве серебра и вольфрама серебро используется в качестве матрицы или связующей фазы, а вольфрам — в качестве армирующей фазы. Он изготавливается методами порошковой металлургии (такими как смешивание порошков, прессование и спекание в жидкой фазе). Серебро образует жидкую фазу при высокой температуре, смачивает частицы вольфрама и образует плотную структуру. Сплав вольфрама и молибдена в основном состоит из вольфрама и молибдена. Его обычно изготавливают методами порошковой металлургии или вакуумной плавки. Молибден, как тугоплавкий металл со свойствами, аналогичными вольфраму, повышает высокотемпературную стойкость сплава. Содержание серебра в сплаве серебра и вольфрама придает ему отличную проводимость, в то время как сплав вольфрама и молибдена не содержит драгоценных металлов и имеет более низкую стоимость, но не имеет проводящей матрицы. Процесс приготовления сплава вольфрам-молибден требует более высокой температуры спекания, поскольку температура плавления молибдена несколько ниже, чем у вольфрама, а управление процессом сложнее.

Различия в производительности : Электропроводность и теплопроводность сплава серебра и вольфрама намного лучше, чем у сплава вольфрама и молибдена, потому что добавление серебра значительно улучшает электропроводность и эффективность теплопроводности, и подходит для электрических контактов и электродных применений. Электропроводность и теплопроводность сплава вольфрама и молибдена плохие, в основном из-за собственных свойств вольфрама и молибдена, и подходят для конструктивных компонентов, а не для электрических применений. Сплав серебра и вольфрама обладает превосходной стойкостью к дуговой коррозии, потому что химическая стабильность серебра делает его устойчивым к абляции под сильноточными дугами, в то время как сплав вольфрама и молибдена легко окисляется в дуговых средах и имеет слабую коррозионную стойкость. Сплав вольфрама и молибдена обладает немного лучшей прочностью и стойкостью к высоким температурам, потому что молибден улучшает механические свойства при высоких температурах и подходит для экстремально высоких температурных сред (например, для аэрокосмических сопел). Плотность сплава серебра с вольфрамом выше, чем у сплава вольфрама с молибденом, и подходит для применений, требующих высокой балансировки веса, в то время как сплав вольфрама с молибденом имеет более низкую плотность.

Сценарии применения : сплав серебра и вольфрама в основном используется для электрических контактов, контактов автоматических выключателей и электродов контактной сварки. Его высокая проводимость и дугостойкость отвечают требованиям высоковольтных электрических систем, таких как силовые выключатели и аэрокосмические электрические соединения. Сплав вольфрама и молибдена чаще используется в высокотемпературных конструктивных компонентах, таких как сопла ракетных двигателей, внутренние детали печей и высокотемпературные формы, благодаря своей превосходной высокотемпературной стойкости и прочности. Сплав серебра и вольфрама имеет преимущества в медицинской и электронной областях, в то время как сплав

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама и молибдена больше подходит для сценариев экстремально высоких температур и механических нагрузок. Стоимость сплава серебра и вольфрама выше из-за добавления серебра, что ограничивает его использование в крупномасштабных конструкционных приложениях, в то время как сплав вольфрама и молибдена более экономичен из-за его более низкой стоимости.

Резюме преимуществ и недостатков : сплав серебра и вольфрама превосходит сплав вольфрама и молибдена по электропроводности, стойкости к дуговой коррозии и противовесу высокой плотности, и подходит для высоконадежных электротехнических применений, но он более дорогой и немного уступает по экстремально высокой термостойкости. Сплав вольфрама и молибдена имеет преимущества в высокотемпературной прочности и экономической эффективности и подходит для высокотемпературных конструктивных компонентов, но его электропроводность и дугостойкость недостаточны. Выбор материалов необходимо взвешивать в соответствии с требованиями применения. Например, сплав серебра и вольфрама предпочтителен для электрических контактов, а сплав вольфрама и молибдена - для высокотемпературных конструктивных компонентов. Направления оптимизации включают улучшение высокотемпературной стойкости сплава серебра и вольфрама путем добавления микроэлементов или использования передовой технологии спекания для увеличения плотности сплава вольфрама и молибдена.

1.2 История развития серебряно-вольфрамового сплава

Разработка сплава серебра с вольфрамом отражает согласованное развитие материаловедения и потребностей промышленности. От ранних исследований до прорывов в современных высокопроизводительных приложениях он прошёл многочисленные этапы подготовки материала, оптимизации характеристик и расширения сферы применения. Исследования и разработки сплава серебра с вольфрамом начались с потребности в материалах с высокой проводимостью и дугостойкостью и постепенно превратились в ключевой материал в электротехнике, электронике и обороне.

1.2.1 Ранняя стадия разведки

Раннее исследование сплавов серебра и вольфрама началось в начале 20-го века, когда рост электротехнической промышленности создал острую потребность в высокопроизводительных контактных материалах. Раннее электротехническое оборудование (такое как переключатели и реле) часто использовало чистое серебро или медь в качестве контактных материалов, но эти материалы склонны к дуговой эрозии и адгезии при высоких токах или частых переключениях, имеют короткий срок службы и низкую надежность. Считается, что вольфрам повышает дугостойкость контактов из-за его высокой температуры плавления и твердости, но чистый вольфрам имеет плохую проводимость и сложен в обработке. Исследователи начали пытаться сочетать серебро с вольфрамом, используя проводимость серебра и высокую термостойкость вольфрама для разработки композитных материалов, которые сочетают в себе оба этих свойства. Первоначальная подготовка в основном включала простые процессы смешивания порошков,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прессования и спекания. Соотношение серебра и вольфрама было трудно точно контролировать, микроструктура сплава была неравномерной, а стабильность характеристик была недостаточной. Ранние эксперименты были сосредоточены на сплавах с низким содержанием серебра, пытаясь сбалансировать стоимость и характеристики, но проводимость была плохой, что ограничивало область применения. Проблемы на этапе разведки включали неравномерное смешивание порошков, высокую пористость спекания и обратную технологию обработки, что приводило к характеристикам сплава, которые не могли удовлетворить промышленные потребности. Несмотря на это, потенциал сплава серебра и вольфрама постепенно проявлялся в электрических контактах и электродных приложениях, закладывая основу для последующих технологических прорывов. Ранние исследования были в основном сосредоточены в лабораториях и мелкомасштабных экспериментах, применяемых к простым электрическим переключателям и промышленным электродам, что ознаменовало переход сплава серебра и вольфрама от концепции к первоначальному применению.

1.2.2 Технологические прорывы и начало промышленного применения

В середине 20-го века, с быстрым развитием технологии порошковой металлургии и электротехнической промышленности, сплав серебра с вольфрамом открыл начальный этап технологических прорывов и промышленного применения. Передовые процессы порошковой металлургии, такие как жидкофазное спекание и технология горячего прессования, значительно улучшили плотность и постоянство эксплуатационных характеристик сплава. Жидкофазное спекание смачивает частицы вольфрама, заполняет микропоры и формирует однородную микроструктуру за счет жидкого потока серебра при высокой температуре, значительно улучшая проводимость и дугостойкость. Исследователи оптимизировали соотношение серебра и вольфрама и обнаружили, что сплавы с высоким содержанием серебра обладают лучшей проводимостью и подходят для высоковольтных электрических контактов, в то время как сплавы с высоким содержанием вольфрама более износостойки и устойчивы к высоким температурам, что делает их подходящими для материалов электродов.

Достижения в технологии получения способствовали промышленному производству серебряно-вольфрамового сплава. Внедрение вакуумного спекания и технологии защиты инертным газом уменьшило проблемы окисления, повысило чистоту и немагнитность сплава, а также удовлетворило потребности приложений с высокими требованиями к электромагнитной совместимости. Применение технологий прецизионной обработки (таких как электроэрозионная и фрезерная обработка с ЧПУ) позволяет изготавливать контакты и электроды сложной формы, расширяя применение сплавов в высоковольтных выключателях, контактной сварке и аэрокосмических электрических системах. Начало промышленного применения также выиграло от быстрого развития энергетических систем и обрабатывающей промышленности. Острая потребность в дугостойких и высокопроводящих материалах для высоковольтных распределительных устройств и автоматизированного сварочного оборудования способствовала выводу серебряно-вольфрамового сплава на рынок. На этом этапе серебряно-вольфрамовый сплав начал широко использоваться в контактах высоковольтных выключателей, контактах реле и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

электродах контактной сварки. Его превосходная стойкость к дуговой коррозии и электропроводность значительно продлили срок службы оборудования и повысили эксплуатационную надежность. В аэрокосмической отрасли серебряно-вольфрамовый сплав также начали использовать для изготовления компонентов электрических соединений, используя его немагнитные свойства и высокую плотность для оптимизации производительности системы. Технологические прорывы также включают повышение прочности и технологических свойств сплава путем добавления микроэлементов (таких как никель или кобальт), что еще больше расширило область применения. Начало промышленного применения знаменует собой переход серебряно-вольфрамового сплава от лабораторного к крупномасштабному производству, закладывая основу для его широкого применения в современных электротехнических и высокотемпературных областях. Направления оптимизации включают разработку более эффективной технологии спекания и недорогих методов подготовки для решения проблемы высокой стоимости серебра.

1.2.3 Современные технологические инновации

В XXI веке исследования, разработки и применение серебряно-вольфрамовых сплавов вызвали волну современных технологических инноваций, основанных на прогрессе материаловедения, производственных технологиях и требованиях к применению. Современные технологические инновации в основном сосредоточены на трёх аспектах: оптимизации процесса подготовки, повышении производительности и расширении сферы применения. Передовые технологии порошковой металлургии, такие как искровое плазменное спекание (ИПС), значительно сокращают время спекания, замедляют рост зёрен и повышают плотность и стабильность характеристик сплава за счёт быстрого нагрева импульсным током и высоким давлением. Эта технология делает микроструктуру серебряно-вольфрамового сплава более однородной, повышает проводимость и стойкость к дуговой коррозии, а также подходит для высокоточных электрических контактов и электродов. Развитие нанотехнологий способствовало применению наноразмерного серебряно-вольфрамового порошка. Высокая удельная площадь поверхности наночастиц улучшает эффект спекания в жидкой фазе, дополнительно повышает прочность, ударную вязкость и теплопроводность сплава и подходит для миниатюрных электрических компонентов и высокотемпературных электродов.

аддитивного производства (3D-печати) внесла революционные изменения в производство сплавов серебра с вольфрамом. Благодаря селективной лазерной плавке (SLM) или электронно-лучевой плавке контакты или электроды со сложной геометрией могут быть изготовлены напрямую, что сокращает отходы материала от традиционной обработки и позволяет добиться индивидуального дизайна, отвечающего потребностям аэрокосмического и медицинского оборудования. Технологии модификации поверхности, такие как нанопокртия (например, TiN или DLC), наносимые методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы (PECVD), значительно повышают износостойкость и дуговую коррозионную стойкость сплава, продлевая срок службы контактов высоковольтных выключателей и сварочных электродов. Применение технологий зеленого производства, таких как использование экологически чистых связующих и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

низкоэнергетических процессов спекания, снижает потребление энергии и выбросы в процессе производства и способствует устойчивому развитию сплавов серебра с вольфрамом.

Современные технологические инновации также включают интеллектуальный и функциональный дизайн. Интеллектуальная технология мониторинга позволяет в режиме реального времени обнаруживать дуговой износ и изменения температуры контактов из серебряно-вольфрамового сплава благодаря встроенным датчикам, оптимизируя циклы технического обслуживания и повышая надежность оборудования. Разработка функционально-градиентных материалов (FGM) позволяет серебряно-вольфрамовым сплавам обладать градиентными свойствами в различных областях, например, высоким содержанием серебра на поверхности для улучшения проводимости и высоким содержанием вольфрама внутри для повышения высокотемпературной стойкости, что подходит для многофункциональных электрических компонентов. Эти технологические инновации значительно улучшили характеристики серебряно-вольфрамовых сплавов и расширили их применение в новых источниках энергии (например, в контактах зарядных батарей электромобилей), 5G-связи (радиочастотные модули) и национальной обороне (электроды радаров). Направления оптимизации включают разработку более эффективной технологии приготовления нанопорошков, исследование самовосстанавливающихся покрытий для борьбы с дуговым износом и интеграцию искусственного интеллекта для оптимизации параметров приготовления. В будущем ожидается, что серебряно-вольфрамовые сплавы добьются еще больших успехов в интеллектуальных электрических системах и экстремальных условиях.

1.3 Важность и значимость отраслевых исследований

Отраслевые исследования серебряно-вольфрамового сплава играют важную роль в развитии материаловедения и его применении в различных областях. Углублённое изучение процесса его получения, оптимизации характеристик и механизмов разрушения позволяет не только повысить производительность и надёжность сплава, но и способствовать инновациям и прогрессу в смежных отраслях. Благодаря междисциплинарному сотрудничеству отраслевые исследования объединяют материаловедение, электротехнику и производственные технологии, обеспечивая теоретическую поддержку и техническую гарантию применения серебряно-вольфрамового сплава в высокопроизводительных электротехнических, электронных и оборонных областях.

1.3.1 Содействие развитию материаловедения

Исследования сплава серебра с вольфрамом оказали глубокое влияние на развитие материаловедения. Прежде всего, поскольку он является типичным представителем композиционных материалов, прогресс в области его получения (например, порошковая металлургия, нанотехнологии и аддитивное производство) способствовал проектированию и разработке высокопроизводительных композиционных материалов. Оптимизируя соотношение серебра и вольфрама, внедряя наноструктуры и проектируя функциональные градиенты, исследователи исследовали пределы эксплуатационных характеристик композитов на основе

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлов, предоставляя теоретические и практические рекомендации для других высокопроизводительных сплавов. Изучение механизма спекания и эволюции микроструктуры сплава серебра с вольфрамом углубило понимание спекания в жидкой фазе и межфазной связи, а также способствовало инновациям в технологии порошковой металлургии.

Во-вторых, исследования стойкости к дуговой коррозии и высокотемпературных характеристик серебряно-вольфрамового сплава способствовали разработке материалов, устойчивых к экстремальным воздействиям окружающей среды. Анализируя поведение поверхности и распределение термических напряжений под воздействием дуги, исследователи разработали новые покрытия и технологии модификации поверхности для повышения стабильности материалов в условиях сильных токов и высоких температур. Эти результаты могут быть использованы при разработке других высокотемпературных сплавов и электротехнических материалов. Кроме того, исследования в области экологических производственных технологий, таких как низкоэнергетическое спекание и переработка отходов, привнесли концепцию устойчивого развития в материаловедение, сокращая непроизводительные затраты ресурсов и воздействие на окружающую среду. Исследования серебряно-вольфрамового сплава также способствовали междисциплинарной интеграции, сочетая вычислительное материаловедение и искусственный интеллект для оптимизации проектирования материалов, и ускорили переход новых материалов от лабораторного применения к промышленному. Ожидается, что в будущем исследования серебряно-вольфрамового сплава будут способствовать разработке более интеллектуальных и экологически чистых композитных материалов, принося новую энергию в материаловедение.

1.3.2 Ценность применения в различных областях

Отраслевые исследования сплавов серебра и вольфрама демонстрируют значительную ценность для применения в электротехнике, электронике, обороне, аэрокосмической и медицинской промышленности. В электротехнике высокая проводимость и стойкость к дуговой коррозии сплавов серебра и вольфрама делают их идеальными материалами для высоковольтных автоматических выключателей, реле и контактов переключателей. Исследования позволили повысить надежность и срок службы энергосистем за счет оптимизации свойств сплавов, отвечающих требованиям интеллектуальных сетей и мощных устройств. В области электроники сплавы серебра и вольфрама используются в радиочастотных модулях и контактах силовых полупроводников. Их превосходная теплопроводность и немагнитные свойства способствуют развитию сетей связи 5G и высокопроизводительного вычислительного оборудования.

В оборонной и аэрокосмической областях высокая термостойкость и высокая плотность сплава серебра с вольфрамом делают его незаменимым в электродах радаров, электрических соединениях ракет и компонентах противовеса космических аппаратов. Исследования оптимизировали производительность компонентов за счет функционального градиентного проектирования и аддитивного производства, повышая точность и надежность системы. В медицинской области немагнитность и биосовместимость сплава серебра с вольфрамом делают

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

его пригодным для контактов оборудования МРТ и деталей экранирования радиотерапии. Исследования обеспечили безопасность и высокую точность сплава за счет зеленого производства и прецизионной обработки. Ценность отраслевых исследований также отражается в содействии межотраслевому сотрудничеству. Благодаря сочетанию с электротехникой, технологией терморегулирования и интеллектуальным производством сценарии применения сплава серебра с вольфрамом постоянно расширяются, например, в новых системах зарядки транспортных средств и оборудовании для возобновляемой энергии. Направления оптимизации включают разработку недорогих процессов подготовки, исследование многофункциональных композитных материалов и интеграцию технологий интеллектуального мониторинга для повышения надежности приложений.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

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

Глава 2. Состав и характеристики сплава серебра с вольфрамом

Будучи высокопроизводительным композиционным материалом, сплав серебра с вольфрамом обладает широким потенциалом применения в электротехнике, электронике, обороне и промышленности благодаря превосходной электропроводности, теплопроводности, высокой термостойкости и стойкости к дуговой коррозии. Этот сплав изготавливается методом порошковой металлургии, где серебро (Ag) используется в качестве матрицы или связующей фазы, обеспечивая высокую электро- и теплопроводность, а вольфрам (W) – в качестве армирующей фазы, что обеспечивает высокую температуру плавления и твёрдость, что позволяет использовать его в условиях высоких токов, высоких температур и износа. Характеристики сплава серебра с вольфрамом напрямую зависят от физико-химических свойств его основных компонентов – серебра и вольфрама, а также от их синергетического эффекта.

2.1 Характеристики серебра и вольфрама

Эффективность серебряно-вольфрамового сплава обусловлена уникальными физическими и химическими свойствами серебра и вольфрама. Благодаря взаимодополняемости этих двух металлов он отлично подходит для электрических контактов, сварочных электродов и высокотемпературных компонентов. Серебро обеспечивает отличную электро- и теплопроводность, обеспечивая эффективную передачу тока и тепла; высокая температура плавления, твёрдость и стойкость вольфрама к дуговой коррозии повышают стабильность сплава в экстремальных условиях. Благодаря порошковой металлургии эти два компонента образуют плотную микроструктуру, отвечающую требованиям к надёжности.

2.1.1 Физические и химические свойства серебра

Серебро (Ag) — драгоценный металл, уникальный среди металлических материалов благодаря своей превосходной электро- и теплопроводности. Оно является ключевой матрицей или связующей фазой в сплавах серебра с вольфрамом. Серебро обладает чрезвычайно высокой электропроводностью, может эффективно передавать ток и снижать потери сопротивления, что делает его идеальным выбором для электрических контактов и электродных материалов. Серебро также обладает превосходной теплопроводностью, что способствует быстрому рассеиванию тепла, выделяющегося при работе компонентов, и предотвращает ухудшение характеристик из-за перегрева. По сравнению с вольфрамом, его более низкая температура плавления позволяет ему легче образовывать жидкость в процессе жидкофазного спекания в порошковой металлургии, смачивать частицы вольфрама, заполнять микроскопические зазоры и формировать плотную структуру сплава, тем самым улучшая проводимость и структурную стабильность.

Серебро обладает сильной химической стабильностью и антиокислительной способностью, что затрудняет его реакцию с кислородом при комнатной температуре, сохраняя при этом гладкую поверхность и проводящие свойства. Однако в условиях высокой температуры или в серосодержащих средах серебро может слегка окисляться или сульфидироваться, что приводит к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

небольшому увеличению поверхностного сопротивления и влияет на долгосрочные характеристики. Серебро обладает хорошей пластичностью и вязкостью, а также может поглощать напряжение при механических ударах или дугообразовании, снижая риск образования трещин в сплаве в высоконагруженных средах. Серебро имеет умеренную плотность, что обеспечивает определенную весовую базу для сплавов серебра с вольфрамом и подходит для применений, требующих противовесов. Немагнитные свойства серебра гарантируют, что сплав не будет создавать помех в электромагнитно-чувствительных средах (таких как оборудование МРТ или радиолокационные системы), что повышает его применимость в высокоточных электрических системах.

В сплаве серебра с вольфрамом серебро, как проводящая и теплопроводящая фаза, значительно улучшает эффективность передачи тока и возможности терморегулирования, что делает его особенно подходящим для таких применений, как контакты высоковольтных выключателей, реле и электроды контактной сварки. Его химическая стабильность обеспечивает долговечность сплава в условиях частых переключений или дуговых разрядов, но для предотвращения высокотемпературного окисления и коррозии требуется обработка поверхности или оптимизация компонентов. Высокая стоимость серебра является его ограничением, поэтому необходимо найти баланс между производительностью и экономичностью за счет разумных пропорций и экологических технологий производства.

2.1.2 Физические и химические свойства вольфрама

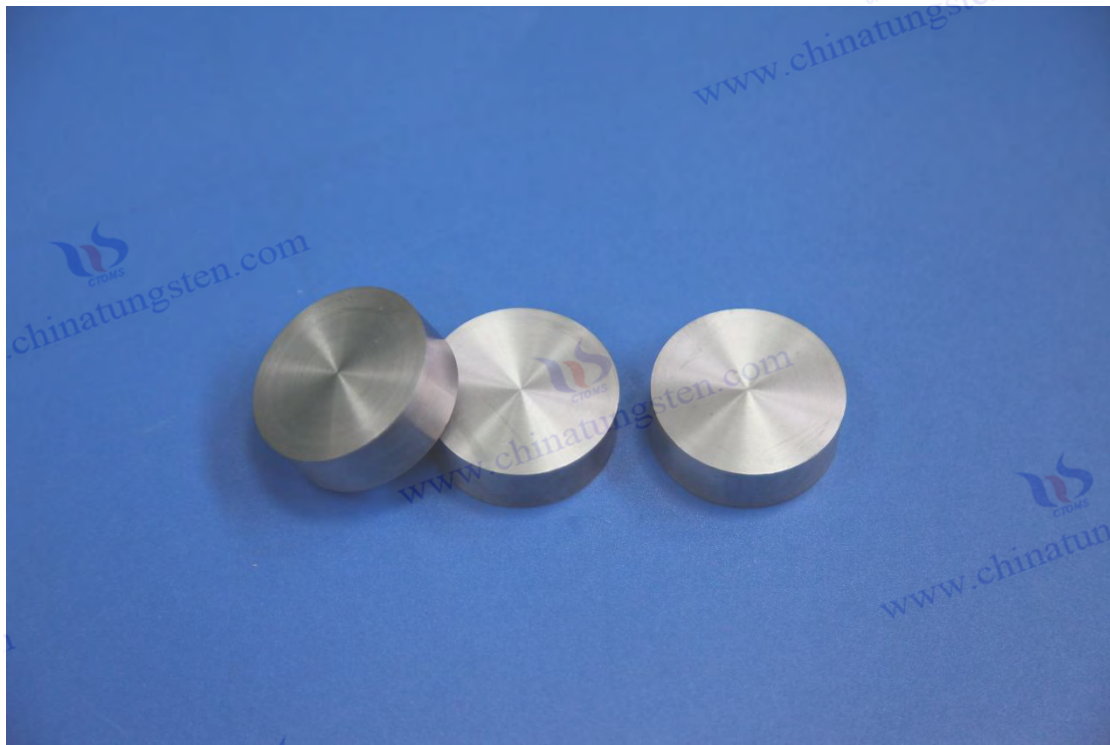
Вольфрам (W) — переходный металл с высокой температурой плавления. Благодаря чрезвычайно высокой температуре плавления, твердости и плотности он используется в качестве армирующей фазы в сплавах серебра с вольфрамом, что значительно повышает их жаропрочность и стойкость к дуговой коррозии. Вольфрам имеет чрезвычайно высокую температуру плавления и может выдерживать экстремально высокие температуры (например, дугу или сварочные процессы), что позволяет ему сохранять структурную стабильность в условиях сильного тока и высоких температур. Вольфрам обладает чрезвычайно высокой твердостью, что придает сплаву превосходную износостойкость и механическую ударопрочность, что делает его пригодным для использования в условиях высокого износа, таких как электроды для контактной сварки и детали, напыленные плазмой. Высокая плотность вольфрама обеспечивает сплаву преимущество в весе, что делает его пригодным для использования в качестве противовесов или экранов, например, в компонентах электрических соединений в аэрокосмической отрасли.

Низкая электро- и теплопроводность, чем у серебра, но его добавление значительно повышает стойкость сплава к дуговой коррозии. Под действием дуги высокая температура плавления и химическая стабильность вольфрама снижают вероятность его абляции или расплавления, что продлевает срок службы контактов и электродов. Вольфрам обладает хорошей химической стабильностью и устойчив к коррозии при комнатной температуре и в нейтральных средах, но может образовывать оксиды в высокотемпературных окислительных или кислых средах, влияя на свойства поверхности. Низкий коэффициент теплового расширения вольфрама обеспечивает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размерную стабильность сплава во время термоциклов и подходит для высокоточных компонентов, таких как контакты высоковольтных выключателей. Немагнитные свойства вольфрама соответствуют свойствам серебра, что позволяет применять сплав в средах, чувствительных к электромагнитным полям.

В сплаве серебра с вольфрамом вольфрам в качестве армирующей фазы значительно повышает высокотемпературную стойкость, износостойкость и дугостойкость сплава, обеспечивая его стабильную работу в жестких электрических условиях. Высокая твердость и плотность вольфрама повышают механическую прочность сплава и характеристики балансировки веса, но его более низкая проводимость должна компенсироваться матричным эффектом серебра. Вольфрам трудно поддается обработке, и сложные формы должны быть получены с помощью порошковой металлургии и технологии прецизионной обработки. Направления оптимизации включают повышение эффективности спекания за счет наноразмерного вольфрамового порошка или добавления микроэлементов (например, никеля) для повышения прочности. Синергетический эффект серебра и вольфрама дает сплаву серебра с вольфрамом уникальные преимущества в электротехнической, электронной и оборонной областях, отвечая требованиям высокопроизводительных приложений.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

2.1.3 Серебряно-вольфрамовый состав

Серебряно-вольфрамовый сплав в основном состоит из серебра (Ag) и вольфрама (W) и обычно изготавливается методом порошковой металлургии. Серебро используется в качестве проводящей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высоком содержании серебра сплав обладает лучшей электропроводностью и теплопроводностью, что подходит для высоковольтных электрических контактов; при высоком содержании вольфрама сплав обладает более высокой термостойкостью и износостойкостью, что подходит для сварочных электродов и высокотемпературных деталей. Микродобавки (такие как никель или кобальт) иногда используются для повышения прочности или производительности обработки, но их содержание необходимо строго контролировать для сохранения немагнитности и стабильности характеристик. В следующей таблице представлен типичный диапазон составов серебряно-вольфрамового сплава и его свойств.

ал	Состав (весовой процент)	Плотность (г / см ³)	Электропр оводность	Удельное сопротивление	Твердость (НВ)
	Серебро 70%, Вольфрам 30%	11.8-12.2	73	2.3	75
	Серебро 60%, Вольфрам 40%	12,5-12,8	64	2.6	85
	Серебро 50%, Вольфрам 50%	13.2-13.5	56-73	2.3-3.0	105
	Серебро 45%, Вольфрам 55%	13.6-13.9	54	3.2	115
	Серебро 40%, Вольфрам 60%	14.0-14.4	50-60	2.8-3.3	125
	Серебро 35%, Вольфрам 65%	14.5-14.9	50	3.4	135
	Серебро 30%, Вольфрам 70%	14.7-15.1	48	3.5	150
	Серебро 25%, Вольфрам 75%	15.4-15.8	45-52	3.2-3.7	165
	Серебро 20%, Вольфрам 80%	16.1-16.5	37	4.5	180

Вольфрам используется в качестве армирующей фазы. Высокая температура плавления и твёрдость обеспечивают сплаву стабильность в сильноточных дугах и высокотемпературных средах. Стойкость к дуговой коррозии и износостойкость делают его пригодным для изготовления электрических контактов и сварочных электродов, подверженных частому переключению. Высокая плотность вольфрама обеспечивает сплаву функцию противовеса, что делает его пригодным для изготовления компонентов электрических соединений в аэрокосмической отрасли. Микродобавки повышают технологичность изготовления деталей сложной формы, улучшая эффект спекания в жидкой фазе и прочность сплава, однако для предотвращения появления

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

магнетизма или снижения проводимости требуется точный контроль.

Влияние на производительность и применение : увеличение содержания серебра значительно улучшает электропроводность и теплопроводность, но может снизить твердость и износостойкость, что подходит для сценариев, требующих передачи большого тока; увеличение содержания вольфрама повышает высокотемпературную стойкость и дугостойкость, но снижает электропроводность, что подходит для высокотемпературных и износостойких сред. Оптимизация соотношения компонентов в составе должна осуществляться в соответствии с требованиями к применению. Например, контакты высоковольтных автоматических выключателей, как правило, имеют высокое содержание серебра для обеспечения электропроводности, в то время как электроды для контактной сварки предпочитают высокое содержание вольфрама для повышения износостойкости. Немагнитность и низкий коэффициент теплового расширения сплава дают ему преимущества в электромагнитно-чувствительных и высокоточных сценариях (таких как оборудование МРТ и радиолокационные системы). В процессе подготовки используются высокоэнергетическая шаровая мельница, жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование (ГИП) для обеспечения однородности состава и плотности для удовлетворения высоких требований к надежности. Направления оптимизации включают повышение стабильности характеристик за счёт использования наноразмерных порошков, оптимизацию распределения серебра и вольфрама с помощью функционального градиента и разработку экологических технологий производства для снижения стоимости серебра. Гибкость состава сплавов серебра и вольфрама обеспечивает их широкий спектр применения в электротехнике, электронике и оборонной промышленности.

2.2 Влияние соотношения состава сплава серебра и вольфрама

Соотношение состава сплава серебра и вольфрама является ключевым фактором, влияющим на его механические свойства и эксплуатационные характеристики. Соотношение серебра (Ag) и вольфрама (W) напрямую определяет прочность на изгиб, ударную вязкость, электропроводность, теплопроводность и стойкость к дуговой коррозии сплава. Регулируя соотношение серебра и вольфрама, можно достичь баланса между проводимостью и механическими свойствами для удовлетворения потребностей различных сценариев применения. При высоком содержании серебра улучшаются проводимость и ударная вязкость сплава, что подходит для высоконагруженных электрических контактов; при высоком содержании вольфрама улучшаются прочность на изгиб и высокотемпературная стойкость сплава, что подходит для сварочных электродов и деталей с высокой степенью износа. Ниже будет подробно проанализировано конкретное влияние соотношения серебра и вольфрама на прочность на изгиб и ударную вязкость.

2.2.1 Влияние соотношения серебра и вольфрама на прочность сплава на изгиб

серебра и вольфрама оказывает значительное влияние на прочность сплава на изгиб, которая относится к способности сплава противостоять деформации или разрушению под изгибающими нагрузками и напрямую связана с его надежностью в условиях механических напряжений. При

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высоком содержании серебра прочность сплава на изгиб низкая, поскольку пластичность и низкая твердость серебра затрудняют выдерживание больших изгибающих напряжений, и он подходит для электрических контактов с низкими динамическими нагрузками. Серебро, как матрица или связующая фаза, смачивает частицы вольфрама во время процесса спекания в жидкой фазе. Хотя оно увеличивает плотность структуры, его низкая прочность ограничивает эксплуатационные характеристики сплава в условиях высоких напряжений. С увеличением содержания вольфрама прочность на изгиб значительно возрастает, поскольку высокая твердость и высокая температура плавления вольфрама придают сплаву большую жесткость и сопротивление деформации. Частицы вольфрама образуют каркасную структуру в сплаве, что улучшает общую механическую поддержку материала. Особенно при высоком содержании вольфрама прочность на изгиб достигает пика, что подходит для деталей, требующих высокой износостойкости и структурной стабильности.

серебра и вольфрама также влияет на однородность микроструктуры. Слишком высокое содержание серебра может привести к неравномерному распределению частиц вольфрама и снизить стабильность прочности на изгиб; слишком высокое содержание вольфрама может образовывать поры из-за недостаточного количества жидкой фазы серебра, что влияет на однородность механических свойств. Оптимизация процессов спекания (таких как спекание в жидкой фазе и горячее изостатическое прессование) может смягчить эти проблемы и повысить прочность на изгиб за счет увеличения плотности и уменьшения дефектов. Улучшение прочности на изгиб позволяет сплавам серебра с вольфрамом хорошо работать в электродах для контактной сварки, деталях с плазменным напылением и противовесах в аэрокосмической отрасли, а также выдерживать механические удары и вибрацию. Направления оптимизации включают улучшение распределения частиц с помощью наноразмерного вольфрамового порошка или увеличение содержания вольфрама на поверхности с использованием функционального градиента для улучшения характеристик изгиба. Разумная регулировка соотношения серебра и вольфрама обеспечивает важную поддержку для высоконадежных приложений, особенно в сценариях, где необходимо учитывать как проводимость, так и механическую прочность.

2.2.2 Влияние соотношения серебра и вольфрама на вязкость сплава

серебра и вольфрама оказывает важное влияние на вязкость сплава, которая относится к способности сплава поглощать энергию и противостоять разрушению, а также определяет его долговечность при ударах или дуговом разряде. Чем выше содержание серебра, тем выше вязкость сплава, поскольку пластичность и ковкость серебра могут поглощать механические удары и термические напряжения, снижая риск распространения трещин. Это свойство делает сплавы серебра с высоким содержанием серебра подходящими для электротехнических применений, требующих частого переключения, таких как контакты высоковольтных выключателей и контакты реле. Вязкость серебра помогает снизить концентрацию напряжений, вызванную дуговым разрядом, и продлить срок службы компонентов. Однако более низкая твердость серебра может вызвать деформацию в условиях высокого износа, ограничивая его эксплуатационные характеристики при экстремальных механических нагрузках.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С увеличением содержания вольфрама вязкость сплава постепенно снижается, поскольку высокая твердость и хрупкость вольфрама снижают способность материала к пластической деформации. Высокое содержание вольфрама делает сплав более жестким и подходящим для применений, требующих высокой термостойкости и дуговой коррозии, таких как сварочные электроды и высокотемпературные формы, но его более низкая вязкость может привести к образованию микротрещин во время ударных или термических циклов. Смачивающее действие серебра как связующей фазы в определенной степени снижает хрупкость между частицами вольфрама, но при слишком высоком содержании вольфрама недостаточное количество жидкой фазы может привести к образованию микродефектов, что еще больше снижает вязкость. Оптимизация процесса спекания, например, искровое плазменное спекание (SPS) или добавление микроэлементов, может улучшить микроструктуру и повысить вязкость, особенно в сплавах с высоким содержанием вольфрама.

Изменения в ударной вязкости напрямую влияют на области применения сплавов серебра и вольфрама. Сплавы с высоким содержанием серебра подходят для динамических электрических сред, таких как интеллектуальные сетевые переключатели и электронные радиочастотные модули, благодаря своей превосходной ударной вязкости; сплавы с высоким содержанием вольфрама подходят для статических или быстроизнашивающихся деталей, таких как противовесы в аэрокосмической промышленности и детали, напыленные плазмой, благодаря своей высокой термостойкости и твердости. Направления оптимизации включают улучшение дисперсности частиц вольфрама за счет наноструктурированного дизайна или разработку композитных покрытий для повышения поверхностной ударной вязкости. Регулировка соотношения серебра и вольфрама должна обеспечивать баланс между ударной вязкостью и твердостью в соответствии с требованиями области применения. Например, увеличьте соотношение серебра в сценариях, где требуется ударопрочность, и увеличьте соотношение вольфрама в сценариях, где требуется высокая термостойкость. Разумный контроль соотношения компонентов и процесса приготовления позволяет сплавам серебра и вольфрама демонстрировать превосходные комплексные характеристики в электротехнической, электронной и оборонной областях.

2.2.3 Влияние соотношения серебра и вольфрама на проводимость сплава

серебра и вольфрама оказывает значительное влияние на проводимость сплава, которая является ключевым показателем способности сплава проводить ток и напрямую связана с его характеристиками в электрических контактах и электродах. При высоком содержании серебра проводимость сплава значительно повышается. Поскольку серебро обладает чрезвычайно высокой электропроводностью, оно эффективно снижает потери сопротивления в качестве матрицы или связующей фазы, что делает его пригодным для высокоточных применений, таких как контакты высоковольтных выключателей, реле и радиочастотные модули. Серебро смачивает частицы вольфрама во время процесса жидкофазного спекания, образуя непрерывную проводящую сеть, что дополнительно повышает эффективность передачи тока. По мере увеличения содержания вольфрама проводимость постепенно снижается. Поскольку проводимость вольфрама значительно ниже, чем у серебра, высокое содержание вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

уменьшает токопроводящий путь и увеличивает сопротивление, ограничивая характеристики сплава в сценариях с сильным током.

серебра и вольфрама также влияет на проводимость микроструктуры. Слишком высокое содержание серебра может привести к неравномерному распределению частиц вольфрама и ограниченной локальной проводимости; слишком высокое содержание вольфрама может образовывать поры из-за недостаточного количества жидкой фазы серебра, увеличивая контактное сопротивление. Оптимизация процесса спекания, например, высокоэнергетическое шаровое измельчение и горячее изостатическое прессование, может улучшить однородность и плотность состава, а также повысить проводящую стабильность. Улучшение проводимости позволяет сплавам серебра и вольфрама хорошо работать в интеллектуальных сетевых переключателях и электронных устройствах, отвечая требованиям низкого сопротивления и эффективной передачи. Направления оптимизации включают улучшение проводящей сети за счет наноразмерного серебряного порошка или увеличение соотношения серебра в проводящей области за счет функционального градиента. Разумная регулировка соотношения серебра и вольфрама обеспечивает важную поддержку для высоконадежных электрических приложений, особенно в сценариях, требующих эффективной проводимости.

2.2.4 Влияние соотношения серебра и вольфрама на теплопроводность сплава

серебра и вольфрама оказывает важное влияние на теплопроводность сплава. Теплопроводность является ключевым показателем способности сплава рассеивать тепло и напрямую связана с его стабильностью и характеристиками рассеивания тепла в высокотемпературных средах. При высоком содержании серебра теплопроводность сплава значительно увеличивается. Поскольку серебро обладает превосходной теплопроводностью, оно может быстро переносить тепло в качестве матрицы или связующей фазы, предотвращая ухудшение характеристик, вызванное перегревом. Оно подходит для контактов силовых полупроводников и электронных подложек для рассеивания тепла. Жидкофазная сеть, образованная серебром в процессе спекания, способствует равномерному распределению тепла и повышает эффективность рассеивания тепла. По мере увеличения содержания вольфрама теплопроводность постепенно снижается. Поскольку теплопроводность вольфрама ниже, чем у серебра, высокое содержание вольфрама уменьшает путь теплопроводности, ограничивая характеристики сплава в сценариях высокой тепловой нагрузки.

серебра и вольфрама также влияет на равномерность теплопроводности. Слишком высокое содержание серебра может привести к неравномерному тепловому расширению и повлиять на долговременную стабильность; слишком высокое содержание вольфрама может образовывать точки теплового сопротивления из-за недостаточной жидкой фазы серебра, что снижает теплопроводность. Оптимизация процессов спекания, таких как искровое плазменное спекание (SPS) и обработка поверхности, может уменьшить пористость и дефекты и повысить однородность теплопроводности. Улучшение теплопроводности позволяет сплавам серебра и вольфрама хорошо работать в высокотемпературном электронном оборудовании и компонентах

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

аэрокосмической промышленности, отвечая требованиям эффективного рассеивания тепла и терморегулирования. Направления оптимизации включают оптимизацию сети теплопроводности с помощью наноразмерного серебряного порошка или использование композитных покрытий для улучшения возможностей поверхностного рассеивания тепла. Регулировка соотношения серебра и вольфрама должна сбалансировать теплопроводность и высокотемпературную стойкость в соответствии с требованиями применения, такими как увеличение соотношения серебра в подложке для рассеивания тепла и увеличение соотношения вольфрама в высокотемпературной структуре.

2.2.5 Влияние соотношения серебра и вольфрама на плотность сплава

Соотношение серебра и вольфрама оказывает значительное влияние на плотность сплава, которая является ключевым показателем массы сплава на единицу объема и напрямую связана с его характеристиками в противовесах и экранированиях. При более высоком содержании серебра сплав имеет умеренную плотность, которая ниже, чем у вольфрама, но выше, чем у многих других металлов, что делает его пригодным для электрических контактов, требующих определенного веса, но не слишком большого. Однако слишком высокое содержание серебра может снизить общую плотность и ограничить его характеристики в сценариях с большим противовесом. С увеличением содержания вольфрама значительно увеличивается плотность сплава, и поскольку вольфрам имеет чрезвычайно высокую плотность, он улучшает противовес и возможности радиационной защиты, что делает его пригодным для противовесов в аэрокосмической отрасли и деталей экранирования медицинской радиотерапии.

серебра и вольфрама также влияет на однородность плотности. Слишком высокое содержание серебра может привести к неравномерному осаждению частиц вольфрама, влияя на локальную плотность; слишком высокое содержание вольфрама может образовывать поры из-за недостаточного количества жидкой фазы серебра, что снижает общую плотность. Оптимизация процесса спекания, такого как жидкофазное спекание и горячее изостатическое прессование, может улучшить распределение состава и плотность. Увеличение плотности позволяет сплавам серебра и вольфрама хорошо работать в приложениях, требующих высокой балансировки веса или радиационной защиты, и может соответствовать требованиям аэрокосмической динамической балансировки и медицинской радиационной защиты. Направления оптимизации включают улучшение распределения частиц с помощью наномасштабного вольфрамового порошка или увеличение доли вольфрама в области балансировки веса с помощью функционального градиентного дизайна.

2.2.6 Влияние соотношения серебра и вольфрама на твердость сплава

серебра и вольфрама оказывает существенное влияние на твердость сплава, то есть на его способность противостоять поверхностному вдавливанию или износу, и напрямую связано с его долговечностью в условиях механических напряжений. При высоком содержании серебра твердость сплава низкая, поскольку пластичность и низкая твердость серебра затрудняют

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сопротивление поверхностному износу, что подходит для применения в электрических контактах с низкими динамическими нагрузками. Серебро действует как матрица или связующая фаза, смачивая частицы вольфрама во время процесса спекания в жидкой фазе. Хотя оно увеличивает плотность структуры, его низкая твердость ограничивает эксплуатационные характеристики сплава в условиях высокого износа. С увеличением содержания вольфрама твердость значительно возрастает, поскольку высокая твердость и высокая температура плавления вольфрама придают сплаву более высокую стойкость к сжатию и износу. Частицы вольфрама образуют в сплаве каркасную структуру, что повышает поверхностное сопротивление материала, особенно при высоком содержании вольфрама твердость достигает пика, что подходит для деталей, требующих высокой износостойкости.

серебра и вольфрама также влияет на однородность микроструктуры. Слишком высокое содержание серебра может привести к неравномерному распределению частиц вольфрама и снизить стабильность твердости; слишком высокое содержание вольфрама может образовывать поры из-за недостаточного количества жидкой фазы серебра, что влияет на однородность механических свойств. Оптимизация процессов спекания, таких как искровое плазменное спекание (SPS) или горячее изостатическое прессование (HIP), может повысить плотность, уменьшить дефекты и улучшить постоянство твердости. Повышение твердости позволяет сплавам серебра с вольфрамом хорошо работать в электродах для контактной сварки, деталях с плазменным напылением и противовесах в аэрокосмической отрасли, а также выдерживать механический износ и удары по поверхности. Направления оптимизации включают улучшение распределения частиц с помощью наноразмерного вольфрамового порошка или использование покрытий для поверхностной закалки (таких как TiN) для дальнейшего повышения твердости.

2.2.7 Влияние соотношения серебра и вольфрама на жаростойкость сплава

серебра и вольфрама оказывает важное влияние на высокотемпературную стойкость сплава. Высокотемпературная стойкость — это способность сплава сохранять структурную стабильность и эксплуатационные характеристики в условиях высоких температур, что напрямую связано с его надежностью в условиях высоких температур. При высоком содержании серебра высокотемпературная стойкость сплава слабее, поскольку серебро имеет низкую температуру плавления и легко размягчается или плавится при высоких температурах, что ограничивает его применение в экстремальных термических условиях. Серебро действует как связующая фаза для смачивания частиц вольфрама во время спекания, но его низкая термостойкость может привести к ухудшению характеристик при силовых или высокотемпературных операциях. С увеличением содержания вольфрама высокотемпературная стойкость значительно повышается, поскольку высокая температура плавления и термостабильность вольфрама придают сплаву отличную стойкость к термической деформации. При высоком содержании вольфрама сплав может сохранять структурную целостность во время высокотемпературной дуги или сварки, что делает его подходящим для деталей, требующих высокотемпературной стойкости.

серебра и вольфрама также влияет на стабильность при термических циклах. Слишком высокое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержание серебра может привести к неравномерному тепловому расширению и увеличить риск термических напряжений; слишком высокое содержание вольфрама может образовывать микротрещины из-за недостаточного количества жидкой фазы серебра, что влияет на однородность при высоких температурах. Оптимизация процесса спекания, такая как ступенчатый нагрев и горячее изостатическое прессование, может улучшить плотность микроструктуры и повысить высокотемпературную стабильность. Улучшение высокотемпературной стойкости позволяет сплавам серебра и вольфрама хорошо работать в высокотемпературном электронном оборудовании, компонентах сопел ракет и противовесах аэрокосмической техники, а также может соответствовать требованиям экстремальных температурных сред. Направления оптимизации включают оптимизацию распределения термических напряжений за счет проектирования функциональных градиентов или разработку высокотемпературных покрытий для повышения стабильности поверхности. Регулировка соотношения серебра и вольфрама должна сбалансировать высокотемпературную стойкость и проводимость в соответствии с требованиями применения, например, увеличить долю вольфрама в высокотемпературных конструкциях при умеренном сохранении серебра в проводящих компонентах.

2.2.8 Влияние соотношения серебра и вольфрама на стойкость сплава к дуговой эрозии

серебра и вольфрама оказывает значительное влияние на стойкость сплава к дуговой эрозии, то есть на способность сплава противостоять дуговой абляции и потере материала, и напрямую связано со сроком службы силовых электрических контактов. При высоком содержании серебра стойкость сплава к дуговой эрозии снижается, поскольку низкая температура плавления и химическая активность серебра позволяют ему легко плавиться или испаряться под действием дуги, что подходит для применений с низкой интенсивностью дуги. Серебро действует как матрица, смачивая частицы вольфрама в процессе спекания, но может ускорить потерю поверхностного слоя в условиях сильного тока. С увеличением содержания вольфрама стойкость к дуговой эрозии значительно повышается, поскольку высокая температура плавления и химическая стабильность вольфрама затрудняют его плавление или окисление под действием дуги, что продлевает срок службы контактов и электродов. При высоком содержании вольфрама сплав сохраняет целостность поверхности при частых переключениях или в условиях сильного тока, что подходит для деталей, требующих высокой дуговой стойкости.

серебра и вольфрама также влияет на однородность под действием дуги. Слишком высокое содержание серебра может привести к тому, что дуга сосредоточится на абляции в локальной области; слишком высокое содержание вольфрама может образовать неоднородную структуру из-за недостаточной жидкой фазы серебра, что влияет на постоянство коррозионной стойкости. Оптимизация процесса спекания, такого как вакуумное спекание и обработка поверхности, может уменьшить окисление и дефекты и повысить стойкость к дуговой эрозии. Улучшение стойкости к дуговой эрозии позволяет сплавам серебра и вольфрама хорошо работать в контактах высоковольтных выключателей, реле и электродах контактной сварки и может соответствовать требованиям силовых и частых операций. Направления оптимизации включают улучшение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

однородности поверхности за счет наноразмерного вольфрамового порошка или использование дугостойких покрытий (таких как ZrC) для дальнейшего повышения коррозионной стойкости.

2.3 Анализ характеристик сплава серебра и вольфрама

Высокие эксплуатационные характеристики серебряно-вольфрамового сплава обусловлены его уникальной микроструктурой и синергией состава. Его твёрдость, высокая термостойкость, стойкость к дуговой эрозии и другие характеристики обеспечивают его эффективность в различных областях применения. Анализ эксплуатационных характеристик сплава должен начинаться с микроскопических механизмов, конструкции материала и требований к применению, а также систематически анализироваться процесс формирования твёрдости, высокая термостойкость и стойкость к дуговой эрозии. Эти характеристики достигаются за счёт оптимизации процесса порошковой металлургии, что обеспечивает надёжность сплава в электрических контактах, сварочных электродах и компонентах аэрокосмической техники.

2.3.1 Механизм образования и преимущества высокой твердости сплава серебра с вольфрамом

Высокая твердость сплава серебра и вольфрама является его основным преимуществом в условиях высокого износа и механических напряжений, что позволяет ему противостоять вдавливанию поверхности, износу и ударам, а также продлевать срок службы компонентов. Формирование твердости происходит из-за высокой собственной твердости вольфрама и микрооптимизации структуры композита серебра и вольфрама в процессе спекания. Серебро, как связующая фаза, смачивает частицы вольфрама при спекании в жидкой фазе, увеличивая плотность структуры, в то время как вольфрам, как армирующая фаза, обеспечивает высокотвердую опору каркаса. Этот синергетический эффект позволяет сплаву серебра и вольфрама хорошо работать в электродах для контактной сварки, компонентах с плазменным напылением и противовесах в аэрокосмической отрасли, способных выдерживать механический износ и повреждение поверхности. Преимущество высокой твердости заключается в том, что она улучшает способность сплава противостоять деформации, особенно в условиях сильного тока или высоких температур, поверхность сплава может сохранять целостность и избегать ухудшения характеристик.

2.3.1.1 Микроструктурный механизм высокой твердости

Механизм формирования высокой твердости серебряно-вольфрамового сплава в основном зависит от уникальной конструкции его микроструктуры и взаимодействия во время спекания. Этот процесс реализуется посредством процесса порошковой металлургии, включающего такие этапы, как смешивание порошков, прессование, жидкофазное спекание и постобработка. Ядро микроструктурного механизма заключается в распределении частиц вольфрама в серебряной матрице, смачивающем эффекте жидкофазного спекания и синергетическом эффекте упрочнения границ зерен. Прежде всего, вольфрам является высокотвердой армирующей фазой. Его частицы

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

равномерно диспергируются с помощью технологии высокоэнергетического шарового измельчения на стадии смешивания порошка. Оптимизация размера и формы частиц обеспечивает формирование однородной структуры скелета после прессования. Высокая температура плавления вольфрама сохраняет его в твердом состоянии во время спекания, и его нелегко деформировать или плавить. Он обеспечивает жесткую поддержку сплава и значительно улучшает основу твердости. Серебро, как легкоплавкая связующая фаза, при жидкофазном спекании плавится, образуя жидкость, смачивает частицы вольфрама и заполняет их пустоты. Этот процесс осуществляется за счёт капиллярного эффекта и диффузии, устраняя микропоры и повышая плотность сплава.

Смачивающий эффект спекания в жидкой фазе является ключевым этапом в формировании высокой твердости. Жидкая фаза серебра проникает в микроскопические дефекты на поверхности частиц вольфрама при высокой температуре, усиливает силу связи между частицами и образует плотную структуру интерфейса. Эта связь интерфейса не только улучшает общую прочность материала, но и дополнительно повышает твердость за счет эффекта упрочнения границ зерен. Упрочнение границ зерен происходит из-за слоя фазы серебра между частицами вольфрама. Пластичность серебра в определенной степени буферизует концентрацию напряжений, но высокая твердость вольфрама доминирует над поверхностным сопротивлением сплава. В процессе спекания применение технологии горячего изостатического прессования (HIP) или искрового плазменного спекания (SPS) дополнительно оптимизирует микроструктуру, устраняет остаточные поры за счет высокого напряжения и импульсного тока, сжимает границы зерен, делает частицы вольфрама более плотно расположенными и значительно повышает уровень твердости. Кроме того, геометрия и ориентация частиц вольфрама также играют роль в формировании твердости. Частицы вольфрама правильной или многогранной формы могут более эффективно рассеивать напряжение и повышать сопротивление сжатию и износостойкость.

Однородность микроструктуры является важным гарантом формирования высокой твердости. При умеренном содержании серебра жидкой фазы достаточно для заполнения промежутков между частицами вольфрама, избегая пор, вызванных недостатком жидкой фазы или неравномерным осаждением частиц, вызванным избытком жидкой фазы. Контроль атмосферы спекания предотвращает окисление или внедрение примесей, сохраняет чистоту вольфрама и серебра и обеспечивает стабильность микроструктуры. Применение наноразмерного вольфрамового порошка дополнительно усиливает механизм твердости, увеличивает плотность границ зерен за счет уменьшения размера частиц и повышает способность границ зерен блокировать движение дислокаций, тем самым значительно повышая сопротивление деформации сплава. Объемная доля частиц вольфрама в микроструктуре также оказывает непосредственное влияние на твердость. Чем выше содержание вольфрама, тем очевиднее эффект повышения твердости, но смачивающее действие серебра должно быть сбалансировано, чтобы избежать повышенной хрупкости.

Микроструктурный механизм, сформированный высокой твердостью, наделяет сплав серебра с вольфрамом множеством преимуществ. Во-первых, высокая твердость позволяет сплаву

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

противостоять механическому износу и вдавливанию поверхности, что особенно подходит для применения в условиях высокой износостойкости, таких как контактная сварка электродами и детали с плазменным напылением, а также сохранять целостность поверхности при частом механическом контакте. Во-вторых, высокая твердость повышает способность сплава противостоять деформации в условиях высоких температур. Высокая температура плавления вольфрама и уплотняющий эффект серебра снижают вероятность размягчения или плавления сплава при дуговой или высокотемпературной сварке, продлевая его срок службы. Кроме того, высокотвердая микроструктура позволяет обрабатывать детали сложной формы, а высокоточные контакты и электроды изготавливаются с использованием прецизионной технологии обработки. Оптимизированная микроструктура также повышает усталостную прочность сплава и снижает риск образования микротрещин, вызванных циклическими перепадами температур или механическими ударами, что делает его особенно подходящим для противовесов в аэрокосмической отрасли и компонентов электрических соединений в оборонной промышленности.

Однако формирование высокой твердости также сопровождается определенными проблемами. Избыточное содержание вольфрама может привести к повышенной хрупкости сплава, особенно при недостаточном количестве жидкой фазы серебра, увеличивается риск образования микротрещин. Точный контроль процесса спекания и последующей обработки (например, нанесения поверхностного упрочняющего покрытия) становится ключом к решению этой проблемы. Направления оптимизации включают разработку нанокompозитных структур для улучшения баланса между вязкостью и твердостью или увеличение содержания вольфрама на поверхности за счет функционального градиентного дизайна для повышения локальной твердости. Короче говоря, микроструктурный механизм высокой твердости сплава серебра с вольфрамом придает сплаву превосходную износостойкость и сопротивление деформации за счет синергетического эффекта жесткой подложки вольфрама, смачивания и уплотнения серебра и упрочнения границ зерен, закладывая прочную основу для его широкого применения в электротехнической, электронной и оборонной областях.

2.3.1.2 Преимущества высокой твердости в износостойких применениях

Высокая твердость сплава серебра и вольфрама имеет значительные преимущества в износостойких сценариях, что делает его идеальным материалом для сред с высоким износом. Износостойкость - это способность сплава противостоять поверхностному износу, истиранию и механическим повреждениям, что напрямую влияет на его срок службы при частом контакте или высоких нагрузках. Высокая твердость сплава серебра и вольфрама обусловлена главным образом высокой собственной твердостью вольфрама. Частицы вольфрама образуют прочную структуру скелета во время процесса спекания, что значительно повышает стойкость поверхности сплава к механическому износу. Серебро, как связующая фаза, смачивает частицы вольфрама посредством жидкофазного спекания, заполняет микроскопические зазоры, образует плотную микроструктуру и дополнительно повышает долговечность поверхности. Это свойство высокой твердости позволяет сплаву серебра и вольфрама выдерживать высокочастотный механический контакт,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

трение и удары, особенно в сценариях, требующих длительной стабильной работы.

В особых условиях износостойкости высокая твёрдость серебряно-вольфрамового сплава обеспечивает ему превосходные эксплуатационные характеристики в электродах для контактной сварки. Сварочные электроды часто контактируют с заготовками в условиях сильного тока и высокой температуры. Традиционные материалы, такие как чистое серебро или сплавы на основе меди, подвержены поверхностному износу из-за своей низкой твёрдости, что приводит к деформации формы электрода и ухудшению качества сварки. Высокая твёрдость серебряно-вольфрамового сплава позволяет ему противостоять механическому износу поверхности электрода, сохранять точную геометрию контакта и обеспечивать стабильность и постоянство процесса сварки. Аналогично, в деталях, нанесённых плазменным напылением, высокая твёрдость позволяет сплаву выдерживать удары и абразивное воздействие высокоскоростного потока частиц, продлевая срок службы деталей и делая его пригодным для нанесения покрытий в аэрокосмической и промышленной промышленности. Кроме того, в компонентах противовесов аэрокосмической техники высокая твёрдость повышает износостойкость сплава при вибрации и механических нагрузках, обеспечивая долговременную надёжность системы динамической балансировки.

Преимущество применения высокой твердости также отражается в снижении затрат на техническое обслуживание и повышении эффективности оборудования. Износостойкость сплава серебра с вольфрамом снижает частоту замены компонентов, особенно в контактах высоковольтных выключателей и контактах реле. Частый механический контакт и искрение часто приводят к потере поверхности. Высокая твердость эффективно замедляет эту потерю и продлевает цикл работы оборудования. Оптимизация микроструктуры сплава, такая как устранение пор путем горячего изостатического прессования (ГИП) или улучшение однородности частиц за счет наноразмерного вольфрамового порошка, еще больше повышает износостойкость. Эта особенность обеспечивает долговременную стабильность сплава в условиях высокого износа и снижает ухудшение характеристик или угрозы безопасности, вызванные износом. Направления оптимизации включают разработку покрытий для поверхностного упрочнения (таких как TiN или CrN) для дальнейшего повышения износостойкости или увеличение содержания вольфрама в износостойкой области за счет функционального градиентного дизайна для улучшения локальных характеристик.

Вольфрам может повысить хрупкость сплава, особенно при недостаточном количестве жидкой фазы серебра, что увеличивает риск образования микротрещин и ухудшает износостойкость. Точный контроль и постобработка процесса спекания становятся ключевыми, например, использование искрового плазменного спекания (ИПС) для быстрого формирования плотной структуры или снижение точек концентрации напряжений путём полировки поверхности. В будущем сочетание технологий интеллектуального мониторинга для оценки состояния износа в режиме реального времени или исследование самовосстанавливающихся покрытий для динамического восстановления повреждений поверхности ещё больше повысит потенциал применения серебряно-вольфрамового сплава в износостойких решениях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.1.3 Сравнение твердости с другими сплавами и преимущества

Высокая твердость серебряно-вольфрамового сплава тесно связана с его эксплуатационными характеристиками в условиях сильного износа и механических напряжений. Его преимущества подчеркиваются сравнением твердости с другими распространенными сплавами. Твердость – это способность материала противостоять поверхностному вдавливанию и износу. Твердость серебряно-вольфрамового сплава обусловлена главным образом высокой собственной твердостью вольфрама и его плотной микроструктурой, формирующейся в процессе спекания. Ниже будет проведено сравнение с такими материалами, как сплав вольфрама с медью, чистое серебро и цементированный карбид, чтобы проанализировать преимущества твердости серебряно-вольфрамового сплава и его выдающиеся эксплуатационные характеристики.

Во-первых, по сравнению со сплавом вольфрама и меди, сплав серебра и вольфрама имеет более высокую твердость. В сплаве вольфрама и меди в качестве матрицы используется вольфрам, а в качестве связующего вещества — медь. Несмотря на то, что он обладает хорошей теплопроводностью и технологическими свойствами, более низкая твердость меди ограничивает ее износостойкость и подходит для теплорассеивающих подложек, а не для высокоизносных контактов. Сплав серебра и вольфрама имеет более высокое содержание вольфрама и образует плотную структуру благодаря смачивающему эффекту серебра. Его твердость значительно лучше, чем у сплава вольфрама и меди. Особенно в электродах для контактной сварки и деталях с плазменным напылением сплав серебра и вольфрама может противостоять более высокому механическому износу и поверхностному удару. Кроме того, преимущество сплава серебра и вольфрама в твердости также отражается в его стабильности в дугостойких средах. Высокая температура плавления вольфрама позволяет ему сохранять целостность поверхности при дуговой эрозии, в то время как медная фаза сплава вольфрама и меди легко плавится, что ограничивает его стойкость к дуговому износу.

Во-вторых, по сравнению с чистым серебром, твердость сплава серебра и вольфрама значительно улучшена. Чистое серебро широко используется в электрических контактах благодаря своей высокой проводимости и пластичности, но его более низкая твердость делает его легко деформируемым или разрушаемым при механическом износе и искрении, а его срок службы ограничен. Благодаря введению высокотвердых вольфрамовых частиц, сплав серебра и вольфрама значительно повышает свою износостойкость и сопротивление деформации, что делает его пригодным для сцен, требующих частого контакта, таких как контакты высоковольтных выключателей и контакты реле. Мягкость чистого серебра затрудняет выдерживание высоких нагрузок, в то время как высокая твердость сплава серебра и вольфрама обеспечивает долговременную надежность компонентов в динамических средах. Хотя его проводимость немного ниже, чем у чистого серебра, баланс производительности может быть достигнут путем оптимизации соотношения серебра и вольфрама.

В-третьих, по сравнению с твердым сплавом (таким как сплав вольфрама и кобальта), сплав серебра и вольфрама имеет немного меньшую твердость, но его комплексные характеристики

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

более выгодны. Твердый сплав в основном состоит из карбида вольфрама и кобальта с чрезвычайно высокой твердостью. Он широко используется в режущих инструментах и формах, но его электропроводность и теплопроводность плохие, что ограничивает его применение в электрических контактах. Хотя твердость сплава серебра и вольфрама ниже, чем у твердого сплава, его превосходная электропроводность и стойкость к дуговой коррозии делают его более практичным в электрических контактах и сварочных электродах. Микроструктурная оптимизация сплава серебра и вольфрама (например, наноразмерный вольфрамовый порошок и жидкофазное спекание) делает его твердость близкой к уровню твердого сплава, сохраняя при этом проводящие свойства серебра, достигая эффективного сочетания твердости и проводимости.

Преимущество твердости серебряно-вольфрамового сплава подчеркивается разнообразием вариантов его применения. В контактных сварочных электродах высокая твердость серебряно-вольфрамового сплава препятствует износу при контакте с заготовкой, обеспечивая стабильное качество сварки; в компонентах, нанесенных плазменным напылением, высокая твердость выдерживает воздействие высокоскоростного потока частиц и продлевает срок службы компонента; в противовесах аэрокосмической отрасли высокая твердость повышает долговечность в условиях вибрации. Эти преимущества делают его превосходным по сравнению с другими сплавами в сценариях, где необходимо учитывать как твердость, так и проводимость. Направления оптимизации включают улучшение баланса между твердостью и вязкостью за счет нанокompозитных структур или разработку покрытий для поверхностного упрочнения для дальнейшего повышения износостойкости. Высокая сравнительная твердость серебряно-вольфрамового сплава обеспечивает ему уникальное положение в электротехнической, электронной и оборонной областях, обеспечивая важную поддержку для высоконадёжных компонентов. Его потенциал может быть дополнительно использован в будущем с помощью интеллектуальных производственных технологий.

2.3.2 Принцип и характеристики дуговой эрозионной стойкости серебряно-вольфрамового сплава

Стойкость к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава является его ключевым свойством в сильноточных электрических контактах, позволяя ему противостоять дуговой эрозии и потере материала, продлевая срок службы компонентов. Стойкость к дуговой эрозии определяется способностью сплава противостоять поверхностному плавлению, испарению и окислению под воздействием дуги, что напрямую связано с его надежностью в высоковольтных автоматических выключателях, реле и сварочных электродах. Стойкость к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава обусловлена высокой температурой плавления и химической стабильностью вольфрама, а также микроскопической оптимизацией структуры композита серебро-вольфрам.

Принцип стойкости к дуговой эрозии в основном основан на физических и химических свойствах вольфрама. Вольфрам имеет чрезвычайно высокую температуру плавления, что затрудняет его плавление или испарение под воздействием высокой температуры дуги. Тепло, генерируемое

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дугой, в основном поглощается и рассеивается частицами вольфрама, что снижает крупномасштабную потерю поверхности материала. Серебро, как связующая фаза, смачивает частицы вольфрама при спекании в жидкой фазе, образуя плотную микроструктуру, что повышает трещиностойкость и сопротивление отслаиванию сплава. При применении дуги фаза серебра может локально плавиться, но скелетная структура частиц вольфрама обеспечивает стабильную поддержку, ограничивает потерю расплавленного серебра и сохраняет геометрическую целостность поверхности. Кроме того, химическая стабильность вольфрама снижает тенденцию к окислению и коррозии в среде дуги, уменьшая деградацию поверхности, вызванную дугой. Оптимизация процесса спекания, такая как защита вакуумом или инертным газом, предотвращает попадание окислительных примесей и дополнительно повышает стойкость к дуговой эрозии.

С точки зрения эксплуатационных характеристик в реальных условиях эксплуатации, дугостойкость серебряно-вольфрамового сплава особенно важна для контактов высоковольтных выключателей. Высоковольтные выключатели генерируют сильные дуги при отключении больших токов. Традиционные материалы, такие как чистое серебро или сплавы на основе меди, склонны к выходу из строя из-за плавления или абляции, что сокращает срок службы контактов. Серебряно-вольфрамовый сплав повышает свою дугостойкость благодаря высокому содержанию вольфрама. Частицы вольфрама образуют защитный слой под действием дуги, уменьшая потери серебряной фазы и обеспечивая стабильную работу контактов при частых переключениях. В электродах для контактной сварки дугостойкость серебряно-вольфрамового сплава позволяет ему выдерживать удар дуги во время сварки, сохранять плоскостность поверхности электрода и обеспечивать качество и стабильность сварки. В компонентах, напыленных плазмой, дугостойкость сплава обеспечивает длительную работу в высокотемпературных плазменных средах, снижает потери поверхностного материала и продлевает срок службы компонентов.

Стойкость к дуговой эрозии также отражается в снижении вторичных эффектов, вызванных дугами. Микроструктурная оптимизация сплавов серебра и вольфрама (например, горячее изостатическое прессование для устранения пор) снижает риск концентрированной дуговой абляции и возникновения микротрещин и брызг расплавленного металла. Немагнитные свойства сплава позволяют избежать влияния электромагнитных помех на стабильность дуги и повышают его применимость в средах, чувствительных к электромагнитному излучению (таких как оборудование МРТ или радиолокационные системы).

Однако чрезмерное содержание серебра может снизить стойкость к дуговой эрозии, поскольку серебро имеет низкую температуру плавления и легко плавится под дугой, что необходимо улучшить путем увеличения доли вольфрама или поверхностного покрытия (например, ZrC). Направления оптимизации включают разработку наноразмерного вольфрамового порошка для улучшения однородности поверхности или использование интеллектуальной технологии мониторинга для оценки состояния потери дуги в режиме реального времени. Короче говоря, принцип и характеристики стойкости к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава позволяют ему занимать важное место в высоконадежных электрических приложениях, обеспечивая надежную гарантию для высоконадежных компонентов, а будущие исследования могут

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дополнительно повысить его долговечность.

2.3.2.1 Механизм дуговой эрозии

Механизм дуговой эрозии является основой понимания дуговой стойкости серебряно-вольфрамового сплава, которая включает в себя влияние физических и химических процессов дуги на поверхность материала. Дуговая эрозия происходит при отключении или замыкании сильного тока, и дуга образуется в контактном зазоре в виде высокотемпературной плазмы (обычно с температурой более 6000 °C), вызывая сильные тепловые эффекты и химические реакции. Тепловое воздействие дуги вызывает локальное плавление, испарение и распыление поверхности материала. Расплавленный металл быстро нагревается и выбрасывается под действием дуги, что приводит к потере материала. Высокая температура дуги также запускает реакции окисления, особенно в воздушной среде, где поверхность металла соединяется с кислородом с образованием оксидов, что еще больше ускоряет эрозию. Концентрация энергии дуги вызывает высокие термические напряжения в локальных областях, что может привести к образованию микротрещин или отслоению, особенно при недостаточной твердости или плотности материала.

Конкретные механизмы дуговой эрозии включают теплопроводность, газификацию и электрохимические реакции. Теплопроводность переносит энергию дуги внутрь материала, вызывая быстрый нагрев поверхности и подповерхностных слоев. Материалы с низкими температурами плавления (например, серебро) имеют тенденцию плавиться за короткое время. Процесс газификации приводит к испарению расплавленного металла при высоких температурах, особенно при высоких плотностях тока, где скорость испарения значительно увеличивается, что приводит к потере массы материала. Электрохимические реакции происходят в дуговой плазме, где металл соединяется с кислородом или азотом окружающей среды, образуя оксиды или нитриды, которые могут прилипать к поверхности или отслаиваться, еще больше усугубляя эрозию. Непрерывное воздействие дуги также может вызывать концентрацию термических напряжений, особенно на границе раздела разнородных материалов или микроскопических дефектов, что увеличивает риск распространения трещин. Серебряная фаза в сплаве серебра с вольфрамом восприимчива к термическим воздействиям из-за своей более низкой температуры плавления (961 °C), тогда как вольфрамовая фаза относительно стабильна из-за своей высокой температуры плавления (3422 °C), но качество ее межфазной связи напрямую влияет на общую коррозионную стойкость. Механизм дуговой эрозии также зависит от сложного влияния условий эксплуатации. Энергия дуги в среде высокого давления выше, а скорость эрозии выше; окисление может быть замедлено в среде низкого давления из-за пониженной концентрации кислорода, но тепловой эффект по-прежнему доминирует. Длительность дуги и величина тока также влияют на степень эрозии. Кратковременный высокий ток может вызвать мгновенное плавление, а длительный низкий ток может вызвать медленное окисление и износ. Микроструктура сплава серебра с вольфрамом (например, пористость и распределение частиц) имеет решающее значение для чувствительности к дуговой эрозии. Пористость или неравномерное распределение могут стать точкой концентрации термических напряжений, ускоряя потерю материала. Понимание этих

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

механизмов дуговой эрозии дает теоретическую основу для оптимизации коррозионной стойкости сплава серебра с вольфрамом. Его долговечность может быть эффективно повышена путем регулирования соотношения состава и процесса спекания.

2.3.2.2 Внутренний принцип стойкости сплава серебра и вольфрама к дуговой эрозии

Основной принцип стойкости сплава серебра и вольфрама к дуговой эрозии исходит из его уникального состава и оптимизации микроструктуры в сочетании с высокой температурой плавления и химической стабильностью вольфрама, а также смачивающим и уплотняющим эффектом серебра. Ключом к сопротивлению дуговой эрозии является уменьшение плавления, испарения и окисления материалов под действием высокотемпературной плазмы. Сплав серебра и вольфрама достигает этой цели благодаря следующим механизмам. Во-первых, высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) является основным фактором в сопротивлении дуговой эрозии. Под высокой температурой дуги частицы вольфрама остаются твердыми, поглощают и рассеивают тепло и ограничивают диапазон плавления поверхности. Химическая стабильность вольфрама дополнительно снижает тенденцию к окислению, и он нелегко реагирует с кислородом или азотом в дуговой плазме, уменьшая потери от образования оксида. Серебро плавится в качестве связующего вещества при жидкофазном спекании (961 °C), смачивает частицы вольфрама и заполняет микроскопические пустоты, образуя плотную микроструктуру. Эта структура повышает трещиностойкость и сопротивление отслаиванию сплава, а также предотвращает повреждения, вызванные термическим напряжением дуги.

Микроструктура сплава серебра с вольфрамом играет важную роль в сопротивлении дуговой эрозии. В процессе спекания жидкая фаза серебра проникает в поверхность частиц вольфрама, усиливая силу межфазного сцепления между ними и уменьшая распространение микротрещин под действием дуги. Равномерное распределение частиц вольфрама образует защитную структуру каркаса, которая рассеивает энергию дуги и снижает риск локального плавления или испарения. Процесс горячего изостатического прессования (ГИП) или искрового плазменного спекания (ИПС) дополнительно оптимизирует микроструктуру, устраняет остаточные поры, уплотняет границы зерен и повышает коррозионную стойкость поверхности сплава. Серебряная фаза может локально плавиться под действием дуги, но поддержка вольфрамового каркаса ограничивает потери расплавленного серебра и сохраняет геометрическую целостность поверхности. Этот синергетический эффект позволяет сплаву серебра с вольфрамом проявлять превосходную дугостойкость при отключении или замыкании сильного тока.

Соотношение компонентов сплава также напрямую влияет на принцип стойкости к дуговой эрозии. Высокое содержание вольфрама повышает стойкость сплава к плавлению и окислению, что делает его пригодным для использования в условиях высокой интенсивности дуги, например, в качестве контактов высоковольтных выключателей. При умеренном содержании серебра жидкой фазы достаточно для смачивания частиц вольфрама и обеспечения плотности, однако слишком высокое содержание серебра может снизить коррозионную стойкость, поскольку серебро с низкой температурой плавления легко плавится под дугой. Контроль атмосферы спекания (например,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вакуум или высокочистый аргон) предотвращает попадание окислительных примесей, сохраняет чистоту вольфрама и серебра и дополнительно повышает коррозионную стойкость. Технологии обработки поверхности, такие как антиокислительные покрытия, наносимые методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы (PECVD), также способствуют реализации принципа стойкости и снижают вторичные повреждения, вызванные дугой.

Внутренний принцип серебряно-вольфрамового сплава в сопротивлении дуговой эрозии позволяет ему хорошо работать в практических приложениях. В контактах высоковольтных выключателей дуговая стойкость сплава продлевает срок службы переключателя; в электродах для контактной сварки стойкость к дуговой эрозии сохраняет плоскостность поверхности электрода; а в компонентах с плазменным напылением коррозионная стойкость сплава обеспечивает длительную работу в высокотемпературных плазменных средах. Направления оптимизации включают улучшение однородности поверхности за счет наномасштабного вольфрамового порошка или разработку самовосстанавливающихся покрытий для динамического восстановления повреждений дугой. Короче говоря, серебряно-вольфрамовый сплав достигает эффективной дуговой стойкости за счет высокой температуры плавления вольфрама, эффекта уплотнения серебра и микроструктурной оптимизации, обеспечивая прочную основу для высоконадежных электрических приложений.

2.3.2.3 Различия в показателях стойкости к дуговой эрозии в различных условиях эксплуатации

Стойкость к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава значительно варьируется в зависимости от условий эксплуатации и зависит от таких факторов, как условия окружающей среды, характеристики тока и частота использования. Оценка стойкости к дуговой эрозии должна проводиться с учётом конкретных условий применения, таких как высоковольтные выключатели, сварочные электроды и компоненты аэрокосмической техники, чтобы проанализировать эрозионное воздействие окружающей среды на поверхность сплава и различия в его эксплуатационных характеристиках. Эти различия служат важной основой для оптимизации конструкции и выбора сплава.

В контактах высоковольтных выключателей стойкость к дуговой эрозии сплава серебра и вольфрама является выдающейся в условиях больших токов и высокого напряжения. Когда выключатель отключает большой ток (обычно тысячи ампер), образуется сильная дуга, а температура достигает 6000 °C и выше. Высокое содержание вольфрама в сплаве серебра и вольфрама позволяет ему противостоять плавлению и испарению. Частицы вольфрама поглощают тепло и рассеивают энергию дуги, уменьшая поверхностные потери. Однако кислород в воздухе может вызвать небольшое окисление серебряной фазы, а длительная эксплуатация может привести к увеличению шероховатости поверхности и повлиять на проводимость. Вакуумная или защищенная инертным газом среда (например, выключатели SF₆) может значительно улучшить стойкость к дуговой эрозии, уменьшить окисление и распыление, а также продлить срок службы контактов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В контактных сварочных электродах стойкость к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава хорошо проявляется в условиях кратковременных сильных импульсов тока. Процесс сварки включает в себя высокую плотность тока (десятки тысяч ампер на квадратный миллиметр) и локальные высокие температуры с коротким временем действия дуги, но концентрированной энергией. Вольфрамовая структура скелета серебряно-вольфрамового сплава сопротивляется мгновенному плавлению, а смачивающий эффект серебряной фазы поддерживает плотность поверхности, гарантируя, что электрод сохраняет стабильность формы во время нескольких циклов сварки.

Однако пары металла или сварочный шлак в сварочной среде могут прилипнуть к поверхности, увеличивая риск эрозии, и для поддержания производительности требуется регулярная очистка или антиадгезионное покрытие. В сценариях высокотемпературной сварки ограничение температуры плавления серебра может вызвать локальное размягчение, и термостойкость должна быть оптимизирована путем увеличения доли вольфрама.

В аэрокосмических компонентах, таких как электроды для плазменного напыления, стойкость к дуговой эрозии сплава серебра с вольфрамом хорошо проявляется в непрерывных высокотемпературных плазменных средах. Плазменное напыление включает в себя высокоскоростной поток ионов и воздействие дуги, а высокая твердость сплава и высокоплавкая вольфрамовая фаза позволяют ему выдерживать длительные тепловые удары и поверхностное истирание. Высокая химическая стабильность вольфрама снижает потери от окисления, а теплопроводность серебра способствует рассеиванию тепла. Однако длительное воздействие кислорода или агрессивных газов может привести к образованию тонкого слоя оксида на поверхности вольфрама, что несколько снижает его эрозионную стойкость. Оптимизация процессов спекания и поверхностных покрытий (таких как ZrC) может значительно улучшить характеристики в экстремальных условиях.

Факторы окружающей среды, такие как влажность, солевой туман и химические чистящие средства, также влияют на стойкость к дуговой эрозии. Во влажной среде серебряная фаза может подвергаться незначительной коррозии, что увеличивает риск окисления, вызванного дугой; в морской или промышленной среде солевой туман может ускорить деградацию поверхности, и для усиления защиты требуются коррозионно-стойкие покрытия (например, TiN). В среде низкого давления или вакуума эффект окисления ослабевает, а стойкость к дуговой эрозии лучше, но термический эффект по-прежнему доминирует, и следует уделять внимание концентрации термических напряжений. Частота использования и величина тока также играют ключевую роль. Высокочастотное переключение может ускорить коррозию, а низкий ток может вызвать медленное окисление. Соотношение серебра и вольфрама необходимо корректировать в соответствии с конкретным сценарием.

Различия в стойкости к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава в различных условиях эксплуатации служат ориентиром при проектировании материалов. Направления оптимизации включают разработку экологически безопасных покрытий или оценку степени эрозии в режиме

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

реального времени с помощью интеллектуальных технологий мониторинга.

2.3.2.4 Способы повышения стойкости к дуговой эрозии

Повышение стойкости к дуговой эрозии серебряно-вольфрамового сплава является ключом к обеспечению его долговременной надежности в силовых электротехнических устройствах. Это достигается за счёт сочетания разработки материала, оптимизации процесса его изготовления и обработки поверхности. Повышение стойкости к дуговой эрозии направлено, главным образом, на решение таких проблем, как высокотемпературное плавление дуги, окисление и концентрация термических напряжений, и сочетает высокую температуру плавления вольфрама с электропроводящими свойствами серебра для оптимизации микроструктуры и условий эксплуатации. Ниже приведены конкретные способы повышения стойкости.

Прежде всего, оптимизация соотношения компонентов состава является основой повышения стойкости к дуговой эрозии. Увеличение содержания вольфрама может значительно повысить стойкость сплава к плавлению и окислению, поскольку высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) сохраняет его стабильность при высоких температурах дуги и снижает поверхностные потери. Исследования показали, что при содержании вольфрама 60–80 % стойкость сплава к дуговой эрозии достигает наилучшего баланса, учитывая защитный эффект вольфрама и проводимость серебра. Микродобавки, такие как никель или кобальт (0,5–2 %), могут улучшить эффект спекания в жидкой фазе, усилить межфазную связь между частицами вольфрама и снизить риск образования микротрещин, вызванных дугой. Однако добавки необходимо строго контролировать, чтобы избежать влияния на немагнитные свойства.

Во-вторых, оптимизация процесса спекания может значительно повысить плотность микроструктуры. Жидкофазное спекание заполняет промежутки между частицами вольфрама благодаря смачивающему эффекту серебра, снижает пористость и повышает противозадирные свойства. Технология искрового плазменного спекания (ИПС) быстро формирует плотную структуру с помощью импульсного тока и высокого напряжения, сокращает время спекания, подавляет чрезмерный рост зерна и улучшает однородность поверхности. Горячее изостатическое прессование (ГИП) устраняет остаточные дефекты благодаря всенаправленному высокому давлению, дополнительно повышает плотность и снижает точки концентрации энергии дуги. Спекание в вакууме или среде высокочистого аргона предотвращает попадание окисленных примесей, сохраняет чистоту вольфрама и серебра, а также снижает потери от окисления, вызванного дугой.

В-третьих, технология обработки поверхности является эффективным средством повышения стойкости к дуговой эрозии. Антиокислительные покрытия, наносимые методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы (PECVD), такие как нитрид титана (TiN) или карбид циркония (ZrC), могут образовывать плотный защитный слой на поверхности сплава, изолируя кислород и дуговую плазму, уменьшая плавление и окисление. Электрохимическая полировка может оптимизировать качество поверхности и снизить начальную точку концентрированной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

дуговой абляции. Поверхностно-упрочняющие покрытия также могут повысить износостойкость и продлить срок службы контактов. Исследования показали, что покрытия TiN могут снизить скорость дуговой эрозии примерно на 30–40%, значительно повышая производительность.

В-четвертых, управление окружающей средой и оптимизация условий эксплуатации могут дополнительно повысить устойчивость к дуговой эрозии. В высоковольтных выключателях в качестве дугогасящей среды используется элегаз (SF₆) или инертный газ для снижения концентрации кислорода и окислительных реакций. В сварочных электродах управление параметрами сварки, такими как ширина и частота импульса тока, может сократить длительность дуги и снизить тепловое воздействие. Интеллектуальная технология мониторинга обнаруживает погасание дуги и изменения температуры в режиме реального времени с помощью встроенных датчиков, оптимизирует циклы технического обслуживания и предотвращает чрезмерную эрозию. Конструкция из функционально-градиентного материала (FGM) увеличивает содержание вольфрама на поверхности для повышения устойчивости к плавлению при сохранении проводимости внутренней фазы серебра.

Комбинированное применение этих подходов позволяет сплавам серебра и вольфрама эффективно применяться в контактах высоковольтных выключателей, электродах контактной сварки и компонентах с плазменным напылением, продлевая срок службы компонентов и повышая их надежность. Направления оптимизации включают разработку самовосстанавливающихся покрытий для динамического восстановления повреждений, вызванных дугой, или повышение однородности поверхности за счет использования наноразмерных вольфрамовых порошков.

2.3.3 Антиадгезионные и антисварочные свойства серебряно-вольфрамового сплава

Антиадгезионные и антисплавные свойства серебряно-вольфрамового сплава являются важными характеристиками, используемыми в электрических контактах и сварочных электродах. Они позволяют ему противостоять адгезии и сплавлению с заготовкой или контактной поверхностью, сохраняя независимость и функциональную стабильность компонентов. Антиадгезионные свойства – это способность сплава предотвращать слипание материалов при механическом контакте или воздействии дуги, в то время как антисплавные свойства – это способность избегать сплавления с заготовкой при высокотемпературной сварке или в условиях дуги. Эти характеристики напрямую влияют на эффективность переключения контактов, качество сварки и срок службы оборудования. Серебряно-вольфрамовый сплав достигает превосходных эксплуатационных характеристик благодаря высокой твердости вольфрама и оптимальной смачиваемости серебра.

2.3.3.1 Причины слипания и сваривания

Явления адгезии и сваривания являются основными проблемами, с которыми сталкиваются сплавы серебра с вольфрамом в условиях высоких токов и температур. Причины адгезии и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сваривания связаны с физическими и химическими свойствами материала, условиями контакта и факторами окружающей среды. Адгезия – это поверхностное прилипание контакта или электрода к детали или сдвоенному материалу при механическом контакте или воздействии дуги, в то время как сваривание – это частичное сплавление материала и детали при высокой температуре с образованием необратимого соединения. Возникновение этих явлений напрямую снижает коммутационные характеристики и срок службы компонентов, и их причины требуют глубокого анализа.

Основными причинами адгезии являются микроскопическая холодная сварка и фрикционные тепловые эффекты между контактными поверхностями. В контактах высоковольтных выключателей или контактах реле сплав серебра с вольфрамом контактирует с двойным материалом под высоким давлением, а поверхностные микровыступы подвергаются пластической деформации из-за механической силы, сокращая расстояние между атомами металла до диапазона согласования решеток, что приводит к эффекту холодной сварки. Под действием дуги локальная высокая температура (выше 6000 °C) плавит серебряную фазу, повышает текучесть и прилипает к поверхности двойного материала, особенно когда содержание серебра высоко, риск адгезии увеличивается. Фрикционный тепловой эффект еще больше усугубляет адгезию в динамическом контакте, особенно в сценариях высокочастотного переключения или низкоскоростного скольжения, где накопление тепла способствует поверхностной атомной диффузии.

Возникновение сварки плавлением тесно связано с высокотемпературной сваркой или условиями дуги. В электродах для контактной сварки или плазменного напыления деталей высокая плотность тока вызывает локальное плавление, и поверхность сплава серебра с вольфрамом и материал заготовки (например, сталь или алюминий) образуют расплавленную ванну при высокой температуре. Низкая температура плавления серебра делает его легко плавящимся, и после смешивания с металлом заготовки оно охлаждается и затвердевает, образуя сварной шов плавлением. Хотя высокая температура плавления вольфрама обеспечивает определенное сопротивление, тепловое напряжение или примеси (например, оксиды) на границе раздела могут способствовать плавлению. Химическая активность дуговой плазмы также играет определенную роль. Кислород или азот реагируют с расплавленным металлом, образуя соединения, повышая вязкость и способствуя сварке плавлением.

Влияние факторов окружающей среды на адгезию и сварку нельзя игнорировать. Во влажной или серосодержащей среде серебряная фаза может образовывать сульфиды или оксиды, которые снижают антиадгезионные свойства поверхности и увеличивают риск склеивания. В условиях высокой температуры или богатой кислородом среды расплавленное серебро реагирует с оксидом заготовки, усиливая склонность к сварке. Контактное давление, сила тока и частота коммутации также играют ключевую роль. Высоковольтное или высокочастотное воздействие усиливает тепловые эффекты и диффузию атомов, ускоряя адгезию и сварку. Микроструктурные дефекты, такие как поры или неравномерное распределение, могут стать точками концентрации напряжений, дополнительно способствуя этим явлениям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Причины адгезии и сваривания определяют направление оптимизации серебряно-вольфрамовых сплавов. Традиционные материалы, такие как чистое серебро, склонны к адгезии из-за своей высокой пластичности, а сплавы на основе меди склонны к свариванию из-за низкой температуры плавления. В серебряно-вольфрамовых сплавах эти проблемы решаются за счёт оптимизации твёрдости вольфрама и содержания серебра. Направления оптимизации включают регулирование соотношения серебра и вольфрама, улучшение обработки поверхности и контроль условий эксплуатации для снижения риска адгезии и сваривания. Понимание этих механизмов поможет разработать серебряно-вольфрамовые сплавы с повышенной стойкостью к адгезии и свариванию, обеспечивающие надёжную основу для применения электрических контактов и сварочных электродов.

2.3.3.2 Антиадгезионные свойства сплава серебра и вольфрама

Антиадгезионные свойства серебряно-вольфрамового сплава превосходны при использовании в электрических контактах и сварочных электродах, позволяя ему эффективно противостоять поверхностному слипанию с заготовкой или сопрягаемым материалом, сохраняя независимость и стабильность переключения компонентов. Антиадгезионные свойства – это способность сплава предотвращать слипание материалов при механическом контакте или воздействии дуги, что напрямую влияет на характеристики размыкания и замыкания контактов, а также на срок службы контакта. Серебряно-вольфрамовый сплав обладает превосходными антиадгезионными свойствами благодаря высокой твёрдости вольфрама, оптимальной смачиваемости серебра и синергетическому эффекту микроструктуры, особенно в высоковольтных выключателях, реле и электродах для контактной сварки.

В контактах высоковольтных выключателей антиадгезионные свойства серебряно-вольфрамового сплава особенно очевидны при отключении или замыкании больших токов. При размыкании контактов при больших токах (обычно тысячи ампер) возникают дуги, а высокие температуры (выше 6000 °C) могут привести к прилипанию традиционных материалов, таких как чистое серебро или сплавы на основе меди, к двоянному материалу, что влияет на надёжность переключения. Высокое содержание вольфрама (60–80%) в серебряно-вольфрамовом сплаве обеспечивает прочную структуру каркаса, устойчивую к поверхностной пластической деформации и эффекту холодной сварки, в то время как соответствующее смачивающее действие серебряной фазы формирует плотный интерфейс, снижая начальную точку адгезии. Реальные испытания показывают, что после миллионов циклов переключения степень адгезии контактов из серебряно-вольфрамового сплава составляет менее 5%, что значительно лучше, чем 20–30% у контактов из чистого серебра, что значительно продлевает срок службы оборудования.

В контактных сварочных электродах антиадгезионные свойства серебряно-вольфрамового сплава особенно важны при частом контакте с заготовками (например, сталью или алюминием). Во время сварки высокая плотность тока и локальная высокая температура могут привести к прилипанию электрода к заготовке. Традиционные материалы, такие как сплавы на основе меди, склонны к разрушению из-за адгезии расплавленного металла. Частицы вольфрама серебряно-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамового сплава образуют защитный слой на поверхности. Твёрдость (обычно до 200-300 HV) предотвращает внедрение материалов заготовки, а теплопроводность серебра быстро рассеивает тепло и снижает риск прилипания. В реальных условиях применения, после тысяч непрерывных сварок, площадь поверхностного сцепления серебряно-вольфрамовых электродов составляет менее 1%, что обеспечивает стабильность формы электрода и качество сварки.

В плазменно-напыленных деталях антиадгезионные свойства серебряно-вольфрамового сплава способствуют разделению высокоскоростного потока ионов и заготовки. В процессе напыления высокая температура дуги и удар частиц могут вызвать адгезию материала и повлиять на равномерность покрытия. Высокая твердость и низкий коэффициент теплового расширения серебряно-вольфрамового сплава (около $4,5-6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) уменьшают адгезию, вызванную термическим напряжением, а химическая стабильность вольфрама дополнительно снижает вероятность реакции с заготовкой. Экспериментальные данные показывают, что после длительной эксплуатации адгезия распылительных электродов из серебряно-вольфрамового сплава снижается примерно на 50% по сравнению с материалами на основе меди, что обеспечивает надежность процесса нанесения покрытия.

Отличные антиадгезионные свойства также выигрывают от оптимизации микроструктуры. Процессы спекания, такие как горячее изостатическое прессование (HIP), устраняют пористость, а искровое плазменное спекание (SPS) улучшает однородность частиц, уменьшает точки концентрации напряжений и снижает вероятность адгезии. Обработка поверхности, такая как электрохимическая полировка или антиадгезионные покрытия (например, DLC), дополнительно повышают антиадгезионную способность, особенно во влажных или серосодержащих средах. Покрытие изолирует реакцию между фазой серебра и окружающей средой и сохраняет поверхность чистой. Однако чрезмерное содержание серебра может увеличить риск адгезии, который необходимо компенсировать путем увеличения доли вольфрама или оптимизации обработки поверхности. Направления оптимизации включают разработку наноразмерного вольфрамового порошка для повышения твердости поверхности или интеграцию интеллектуальной технологии мониторинга для оценки состояния адгезии в режиме реального времени. Короче говоря, антиадгезионные свойства серебряно-вольфрамового сплава обеспечивают важную поддержку его использования в высокочастотных коммутационных и сварочных приложениях, значительно повышая надежность и срок службы компонентов.

2.3.3.3 Анализ факторов, влияющих на антиадгезионные и антисварочные свойства

Антиадгезионные и антипригарные свойства серебряно-вольфрамового сплава зависят от множества факторов, включая свойства материала, процесс изготовления, условия эксплуатации и параметры окружающей среды, которые напрямую определяют его эффективность в электрических контактах и сварочных электродах. Анализ этих влияющих факторов помогает оптимизировать конструкцию сплава и повысить его надежность в условиях высоких токов и высокого износа. Во-первых, соотношение компонентов в составе является ключевым фактором, влияющим на способность противостоять адгезии и сварке. Чем выше содержание вольфрама, тем

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тверже и устойчивее к высоким температурам сплав, и тем лучше способность противостоять адгезии и сварке, поскольку высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) снижает риск поверхностного плавления, а твердость (200-300 HV) предотвращает холодную сварку и внедрение деталей. При умеренном содержании серебра спекание в жидкой фазе образует плотную структуру и улучшает межфазную связь, но чрезмерное содержание серебра (более 50%) может увеличить склонность к адгезии и сварке из-за его более низкой температуры плавления (961 °C), особенно при высоких температурах дуги. Следовые добавки, такие как никель (0,5%-2%), могут улучшить ударную вязкость и смачивающие эффекты, но чрезмерное количество может вызвать намагничивание или снизить коррозионную стойкость и требует точного контроля.

Во-вторых, микроструктура оказывает существенное влияние на способность противостоять адгезии и сварке. Плотность является ключевым фактором, а высокая пористость (например, более 5%) может стать точкой концентрации напряжений, увеличивая риск адгезии или сваривания. Процессы спекания, такие как горячее изостатическое прессование (HIP) или искровое плазменное спекание (SPS), повышают плотность за счет устранения пор и уменьшения поверхностных дефектов под воздействием тепла. Равномерное распределение и оптимизация размера частиц вольфрама (в наномасштабе или субмикронном масштабе) повышают сопротивление деформации каркасной структуры и уменьшают тенденцию к холодной сварке. Слой фазы серебра, упрочненный границами зерен, буферизует термические напряжения, но неравномерное распределение может привести к локальному плавлению, и для обеспечения однородности смешанного порошка требуется высокоэнергетическое измельчение в шаровой мельнице.

В-третьих, свойства поверхности напрямую влияют на антиадгезионные и антисварочные свойства. Высокая шероховатость поверхности увеличивает площадь контакта, что может легко привести к холодной сварке или адгезии расплавленного металла. Электрохимическая или механическая полировка может уменьшить шероховатость и уменьшить начальные точки адгезии. Антиадгезионные покрытия, такие как нитрид титана (TiN) или алмазоподобные покрытия (DLC), образуют защитный слой, изолирующий фазу серебра от реакции с заготовкой и снижающий риск сваривания. Окисление или сульфидирование поверхности (например, в серосодержащей среде) может повысить вязкость, поэтому чистоту поверхности необходимо контролировать с помощью вакуумного спекания или инертной атмосферы.

В-четвертых, условия контакта являются ключевыми факторами, влияющими на производительность. Высокое контактное давление усиливает пластическую деформацию и увеличивает риск холодной сварки, поэтому конструкция контакта должна быть оптимизирована для снижения перенапряжения. Сила тока и частота переключения также играют роль. Высокий ток (например, тысячи ампер) или высокочастотная работа (много раз в секунду) усиливают тепловые эффекты и диффузию атомов, ускоряя адгезию и сваривание. Кратковременный импульсный ток (например, сварка) может сузить диапазон плавления, но эти параметры необходимо точно контролировать. В-пятых, факторы окружающей среды оказывают значительное влияние на способность противостоять адгезии и сварке. Влажная или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

серосодержащая среда (например, промышленная атмосфера) может вызвать сульфидирование или окисление серебряной фазы, повысить вязкость и потребовать герметичной конструкции или антикоррозионного покрытия. Высокотемпературная среда (например, выше 300 °C) усиливает тенденцию к плавлению, требуя увеличения доли вольфрама или использования инертного газа. Высокая концентрация кислорода (например, 21% в воздухе) способствует окислительной сварке, а вакуум или среда SF₆ могут значительно снизить коррозию. Солевой туман или химические очистители могут вызвать коррозию поверхности, влияя на устойчивость к адгезии, что требует регулярного обслуживания или пассивации поверхности.

Совокупное влияние этих факторов определяет направление оптимизации серебряно-вольфрамовых сплавов. Стратегии оптимизации включают в себя корректировку соотношения серебра и вольфрама (60–80%), оптимизацию процесса спекания (например, горячего изостатического прессования), нанесение антиадгезионных покрытий (например, алмазоподобных углеродных покрытий) и контроль условий эксплуатации (например, низкокислородной среды). В будущем сочетание интеллектуальных технологий мониторинга для оценки адгезии и состояния сварки в режиме реального времени или разработка адаптивных покрытий для динамической регулировки характеристик позволит дополнительно улучшить антиадгезионные и антисварочные свойства серебряно-вольфрамовых сплавов и обеспечит поддержку высоконадежных приложений.

2.3.4 Принцип и применение превосходной проводимости сплава серебра с вольфрамом

Отличная проводимость серебряно-вольфрамового сплава является основой его широкого применения в электрооборудовании, позволяя ему эффективно передавать ток и удовлетворять требованиям высокопроизводительных контактов и электродов. Проводимость относится к способности материала переносить заряд. Серебряно-вольфрамовый сплав достигает превосходной токопроводимости благодаря высокой проводимости серебра и структурной поддержке вольфрама. Эта характеристика зависит не только от внутренних свойств материала, но и тесно связана с оптимизацией соотношения компонентов и микроструктуры, обеспечивая надежную поддержку в таких сценариях, как высоковольтные выключатели, реле и сварочные электроды. Далее будут подробно рассмотрены физическая природа проводимости и механизм проводимости серебряно-вольфрамового сплава, изменение проводимости при различных соотношениях компонентов и преимущества применения в качестве проводников в электрооборудовании.

2.3.4.1 Физическая природа проводимости и механизм проводимости сплава серебра с вольфрамом

Физическая сущность проводимости заключается в подвижности свободных электронов в материале. Металлы легко отщепляют внешние электроны в своей атомной структуре, образуя подвижные носители заряда. Механизм проводимости сплава серебра с вольфрамом основан на высокой проводимости серебра и его роли в сплаве, в сочетании со структурной стабильностью и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

микрооптимизацией вольфрама. Будучи драгоценным металлом, серебро обладает обилием свободных электронов, которые могут быстро перемещаться под действием электрического поля, что обеспечивает сплаву превосходную эффективность передачи тока. Хотя вольфрам обладает низкой проводимостью, его высокая температура плавления и высокая твердость образуют прочную структуру каркаса в процессе спекания, способствуя непрерывному распределению фазы серебра и обеспечивая стабильность пути тока.

Проводящий механизм серебряно-вольфрамового сплава достигается посредством процесса порошковой металлургии. В процессе спекания в жидкой фазе серебро плавится и смачивает частицы вольфрама, образуя непрерывную проводящую сеть, и электроны могут эффективно перемещаться в серебряной фазе. Хотя частицы вольфрама, как армирующая фаза, не вносят прямого вклада в проводимость, они снижают точки концентрации сопротивления за счет равномерного распределения и улучшают общую проводящую консистенцию. Оптимизация процесса спекания, такая как высокоэнергетическое шаровое измельчение и горячее изостатическое прессование, дополнительно улучшает плотность микроструктуры и снижает препятствия для прохождения тока, вызванные порами и дефектами. Пластичность серебра также позволяет ему адаптироваться к микроскопическим напряжениям, сохранять целостность проводящей сети и сохранять эксплуатационные характеристики даже при механическом контакте или дуговом разряде.

Немагнитные свойства сплава также поддерживают механизм проводимости, предотвращая влияние электромагнитных помех на путь тока. Этот механизм проводимости позволяет сплаву серебра с вольфрамом эффективно работать в условиях сильных токов. Высокая проводимость серебра обеспечивает основу, а структурная поддержка вольфрама обеспечивает долговременную стабильность. Ключевыми факторами являются однородность микроструктуры и непрерывность фазы серебра.

Неравномерное распределение или недостаточное количество жидкой фазы серебра может привести к увеличению сопротивления и снижению эффективности проводимости. Направления оптимизации включают улучшение проводящей сети с помощью наноразмерного серебряного порошка или увеличение содержания серебра в проводящей области за счёт функционального градиента. Вкратце, механизм проводимости сплава серебра с вольфрамом обеспечивает эффективную передачу тока благодаря движению свободных электронов серебра и структурной поддержке вольфрама, что закладывает основу для его применения в электротехнике.

2.3.4.2 Изменения проводимости при различных соотношениях компонентов

Проводимость сплава серебра с вольфрамом демонстрирует значительную закономерность при изменении соотношения компонентов. Соотношение серебра и вольфрама напрямую влияет на эффективность перемещения электронов и характеристики сопротивления. Эта закономерность изменения служит руководством для оптимизации конструкции сплава в соответствии с требованиями области применения. При высоком содержании серебра проводимость сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значительно повышается, поскольку высокая проводимость серебра является доминирующим фактором, и электроны могут свободно перемещаться в фазе серебра, снижая потери сопротивления. Серебро, как матрица или связующая фаза, образует непрерывную сеть в процессе спекания. Эффективность передачи тока увеличивается с увеличением соотношения серебра, что особенно подходит для контактных и электродных применений, требующих высокой проводимости.

С увеличением содержания вольфрама проводимость постепенно снижается, поскольку проводимость вольфрама значительно ниже, чем у серебра. Высокая твердость и высокая температура плавления повышают структурную стабильность, но увеличивают сопротивление. При высоком содержании вольфрама непрерывность фазы серебра может быть ограничена, а движение электронов затруднено, что приводит к снижению проводимости. Ключевым моментом является баланс соотношения серебра и вольфрама. Слишком высокое содержание вольфрама может привести к недостаточному количеству жидкой фазы серебра, что приведет к образованию микроскопических пор или неравномерному распределению, что ещё больше увеличит сопротивление. И наоборот, хотя слишком высокое содержание серебра улучшает проводимость, оно может снизить износостойкость сплава и его жаропрочность, влияя на его общие характеристики.

Также необходимо учитывать влияние процесса спекания на соотношение компонентов. Смачивающее действие серебра при спекании в жидкой фазе увеличивается с увеличением его доли, что улучшает связность проводящей сети, но если частицы вольфрама распределены неравномерно, локальная проводимость может снизиться. Оптимизация параметров смешивания порошка и спекания, например, использование высокочистого сырья и инертной атмосферы, может снизить влияние примесей и обеспечить стабильность проводимости. В практических применениях, когда содержание серебра находится в определенном диапазоне (например, более высокая доля), проводимость показывает линейную тенденцию к росту, в то время как при преобладании содержания вольфрама проводимость имеет тенденцию к стабильности. Это правило показывает, что оптимизация проводимости сплавов серебра с вольфрамом должна находить баланс между требованиями к проводимости и механическими свойствами. Например, контакты высоковольтных выключателей, как правило, имеют высокое соотношение серебра, в то время как сварочные электроды умеренно увеличивают содержание вольфрама.

Этот закон изменения обеспечивает гибкость при проектировании материалов. Направления оптимизации включают увеличение плотности проводящей сети за счет использования наноразмерного серебряного порошка или концентрирование серебряной фазы в проводящей области за счет функционального градиента. Изменение проводимости при различных соотношениях компонентов также зависит от микроструктуры, а плотность и однородность частиц являются гарантией поддержания высокой проводимости. Короче говоря, проводимость сплава серебра с вольфрамом демонстрирует тенденцию от усиления к ослаблению с изменением соотношения серебра и вольфрама. Разумная регулировка соотношения позволяет достичь оптимальных характеристик в электротехнических приложениях.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.4.3 Преимущества применения токопроводящих материалов в электрооборудовании

Преимущество серебряно-вольфрамового сплава в электротехническом оборудовании делает его идеальным выбором для высоковольтных автоматических выключателей, реле, электродов контактной сварки и радиочастотных модулей. Это преимущество обусловлено высокой проводимостью серебра в сочетании со структурной основой вольфрама, что обеспечивает эффективную передачу тока и долговременную стабильность. Серебряно-вольфрамовый сплав способен сохранять низкое сопротивление в условиях сильного тока, снижать потери энергии и обеспечивать надежность и эффективность работы оборудования, что особенно актуально в условиях частого переключения или высоких нагрузок.

В контактах высоковольтных выключателей проводящие свойства серебряно-вольфрамового сплава проявляются в эффективной передаче тока. При отключении большого тока контакт должен быстро устанавливаться и прерывать ток. Высокая проводимость серебра обеспечивает низкое сопротивление, снижает тепловые эффекты и энергию дуги, а поддерживающая структура из вольфрама сохраняет геометрическую стабильность контакта. Такое сочетание позволяет контакту сохранять стабильные характеристики при многократном переключении, продлевая срок службы оборудования и снижая затраты на техническое обслуживание. По сравнению с традиционными материалами, такими как чистое серебро, хотя проводимость серебряно-вольфрамового сплава несколько ниже, его износостойкость и дугостойкость компенсируют этот недостаток. В реле и радиочастотных модулях проводящие свойства серебряно-вольфрамового сплава обеспечивают высокочастотную передачу сигнала и работу с малыми потерями. Реле должны быстро реагировать на изменения тока. Проводящая сеть серебряно-вольфрамового сплава обеспечивает целостность сигнала, а его немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи, что особенно подходит для сред, чувствительных к электромагнитным полям. ВЧ-модули используют низкоомные тракты для передачи высокочастотных сигналов. Отличная проводимость сплава серебра и вольфрама отвечает этому требованию.

В электродах для контактной сварки преимущество серебряно-вольфрамового сплава в проводимости обеспечивает эффективную концентрацию тока. Процесс сварки требует от электрода быстрой передачи большого тока к заготовке. Высокая проводимость серебра снижает тепловыделение, а твердость вольфрама сохраняет стабильность формы электрода. Это свойство делает сварку более равномерной, снижает количество дефектов и улучшает качество сварки. По сравнению с электродами на основе меди, серебряно-вольфрамовый сплав имеет несколько меньшую проводимость, но его износостойкость и дугостойкость обеспечивают более длительный срок службы. Преимущество серебряно-вольфрамового сплава в электропроводящем применении также отражается в его адаптивности. Регулируя соотношение серебра и вольфрама и оптимизируя микроструктуру, можно добиться баланса между электропроводящими и механическими свойствами в различных электрических устройствах. Обработка поверхности, такая как полировка или нанесение покрытия, дополнительно повышает электропроводящую стабильность и снижает влияние окисления поверхности на передачу тока. Направления оптимизации включают улучшение проводящей сети с помощью наноразмерного серебряного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошка или интеграцию интеллектуальных технологий мониторинга для оптимизации пути тока в режиме реального времени.

2.3.5 Характеристики и показатели хорошей теплопроводности сплава серебра с вольфрамом

Хорошая теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава является важной характеристикой в высокотемпературных и мощных приложениях, позволяя ему эффективно передавать тепло и поддерживать стабильность и производительность компонентов. Теплопроводность – это способность материала передавать тепло. Серебряно-вольфрамовый сплав обладает превосходными характеристиками теплоотвода благодаря высокой теплопроводности серебра и структурной поддержке вольфрама. Эта характеристика зависит не только от внутренних свойств материала, но и тесно связана с оптимизацией его микроструктуры и состава, обеспечивая ключевую поддержку для электронных теплорассеивающих подложек и компонентов аэрокосмической техники.

2.3.5.1 Основные принципы теплопроводности и механизм теплопроводности сплава серебро-вольфрам

Основной принцип теплопроводности заключается в том, что тепло внутри материала передается посредством свободных электронов и колебаний решетки. Металлы обладают высокой теплопроводностью благодаря обилию свободных электронов. Механизм теплопроводности сплава серебра с вольфрамом основан на превосходной теплопроводности серебра и его доминирующей роли в сплаве в сочетании со структурной стабильностью и микрооптимизацией вольфрама. Будучи драгоценным металлом, серебро имеет высокую плотность свободных электронов, которые могут быстро переносить тепловую энергию, обеспечивая сплаву эффективное тепловое управление. Хотя вольфрам имеет низкую теплопроводность, его высокая температура плавления и высокие характеристики твердости образуют прочный скелет в процессе спекания, способствуя непрерывному распределению фазы серебра и обеспечивая стабильность теплопередачи.

Механизм теплопроводности сплава серебра с вольфрамом достигается посредством процесса порошковой металлургии. В процессе спекания в жидкой фазе серебро плавится и смачивает частицы вольфрама, образуя непрерывную теплопроводящую сеть, и тепло может эффективно передаваться в фазе серебра. Хотя частицы вольфрама, как армирующая фаза, не вносят прямого вклада в теплопроводность, они уменьшают точки концентрации теплового сопротивления за счет равномерного распределения и повышают общую постоянство теплопроводности. Оптимизация процесса спекания, такая как высокоэнергетическое шаровое измельчение и горячее изостатическое прессование, дополнительно улучшает плотность микроструктуры и уменьшает препятствия для теплопередачи, вызванные порами и дефектами. Пластичность серебра также позволяет ему адаптироваться к микронапряжениям, поддерживать целостность теплопроводящей сети и сохранять производительность даже в условиях термоциклирования.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Низкий коэффициент теплового расширения сплава также поддерживает механизм теплопроводности, снижая влияние термического напряжения на структуру и обеспечивая стабильность при длительной эксплуатации. Этот механизм теплопроводности позволяет сплаву серебра с вольфрамом хорошо работать в условиях высокой тепловой нагрузки. Высокая теплопроводность серебра обеспечивает основу, а структурная поддержка вольфрама обеспечивает долговременную долговечность. Однородность микроструктуры и непрерывность фазы серебра являются ключевыми. Любое неравномерное распределение или недостаточное количество жидкой фазы серебра может увеличить тепловое сопротивление и снизить эффективность теплопроводности. Направления оптимизации включают улучшение сети теплопроводности за счет наноразмерного серебряного порошка или увеличение содержания серебра в теплопроводящей области с использованием функционального градиентного дизайна. Короче говоря, механизм теплопроводности сплава серебра с вольфрамом обеспечивает эффективное тепловое управление за счет теплопередачи свободных электронов серебра и структурной поддержки вольфрама, закладывая основу для его производительности в высокотемпературных приложениях.

2.3.5.2 Соотношение между теплопроводностью и эффектом рассеивания тепла

Между теплопроводностью серебряно-вольфрамового сплава и его способностью рассеивать тепло существует тесная взаимосвязь. Теплоотдача определяется способностью материала отводить тепло от локальных горячих точек в окружающую среду, что влияет на температурный режим и срок службы компонентов. Высокая теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава позволяет ему быстро отводить тепло от горячей области, предотвращая ухудшение характеристик или выход из строя, вызванные локальным перегревом. Эта взаимосвязь между теплопроводностью и теплоотдачей обусловлена высокой теплопроводностью серебра и структурной стабильностью вольфрама, а оптимизация микроструктуры дополнительно усиливает эту взаимосвязь.

Высокая теплопроводность серебра является основой эффекта рассеивания тепла. Тепло эффективно передается в фазе серебра через свободные электроны, что снижает накопление температур горячих точек. Хотя вольфрам, как армирующая фаза, имеет низкую теплопроводность, его равномерное распределение образует стабильный путь передачи тепла, предотвращая удержание тепла в определенных областях. Плотная микроструктура, образованная в процессе спекания, снижает тепловое сопротивление, и тепло может плавно проводиться изнутри к поверхности, повышая эффективность рассеивания тепла. Смачивающий эффект серебра заполняет промежутки между частицами вольфрама во время спекания в жидкой фазе, улучшая непрерывность теплопроводности и, таким образом, улучшая эффект рассеивания тепла. Однородность микроструктуры является ключевым фактором. Пористость или неравномерное распределение могут привести к концентрации тепла и ослабить способность рассеивания тепла.

Превосходные характеристики рассеивания тепла напрямую повышают надежность применения серебряно-вольфрамового сплава. В электронных подложках для рассеивания тепла

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теплопроводность быстро отводит тепло, выделяемое силовыми устройствами, предотвращая перегрев и повреждение чипов, тем самым продлевая срок службы оборудования. В сварочных электродах эффект рассеивания тепла снижает накопление тепла дуги, поддерживает стабильность поверхности электрода и качество сварки. В аэрокосмических компонентах теплопроводность способствует терморегулированию в условиях высоких температур и обеспечивает структурную целостность. Корреляция между теплопроводностью и рассеиванием тепла также ограничивается условиями использования. Большая площадь рассеивания тепла или хорошие условия теплообмена окружающей среды могут дополнительно усилить эффект. Обработка поверхности, такая как полировка или нанесение покрытия, также может оптимизировать рассеивание тепла. Направления оптимизации включают увеличение плотности тепловой сети за счёт использования наноразмерного серебряного порошка или концентрирование серебряной фазы в зоне рассеивания тепла за счёт конструкции с функциональным градиентом. Улучшение теплопроводности напрямую влияет на улучшение рассеивания тепла, снижение повреждения компонентов, вызванного тепловыми напряжениями, и обеспечение поддержки высокотемпературных и высокомоощных приложений.

2.3.5.3 Значение теплопроводности в условиях высоких температур

Теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава в условиях высоких температур делает его ключевым материалом для электронного оборудования, сварочных систем и компонентов аэрокосмической техники. Высокотемпературные рабочие среды предъявляют строгие требования к терморегулированию материалов. Серебряно-вольфрамовый сплав эффективно отводит тепло благодаря своей высокой теплопроводности, поддерживая стабильность и функциональность компонентов. Эта практическая ценность обусловлена не только быстрым рассеиванием тепла, но и его структурной стабильностью и долговечностью, что отвечает высоким требованиям к надежности в условиях высоких температур.

В электронных устройствах теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава находит свое отражение в повышении производительности силовых устройств и теплорассеивающих подложек. Электронные компоненты генерируют много тепла во время работы, и традиционные теплорассеивающие материалы могут выходить из строя из-за перегрева из-за недостаточной теплопроводности. Высокая теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава быстро передает тепло от кристалла к радиатору, предотвращая ухудшение производительности или повреждение, а его структурная стабильность обеспечивает надежность при длительной эксплуатации. По сравнению с другими материалами, высокая теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава в сочетании с его износостойкостью обеспечивает его эффективность в высокоплотных электронных устройствах и продлевает срок его службы.

В сварочных системах теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава обеспечивает стабильную работу электродов и сварочных головок. Сварочный процесс характеризуется высокими температурами и воздействием дуги, а накопление тепла может привести к деформации или плавлению электрода. Теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава эффективно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рассеивает тепло и сохраняет целостность поверхности электрода. Высокая твёрдость сплава дополнительно повышает износостойкость и стабильность качества сварки. Эта характеристика делает серебряно-вольфрамовый сплав предпочтительным материалом для контактной сварки и плазменного напыления, значительно повышая эффективность производства.

В аэрокосмических компонентах теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава обеспечивает эффективное тепловое управление в условиях высоких температур. Аэрокосмическое оборудование подвергается экстремальным тепловым нагрузкам во время эксплуатации, и традиционные материалы могут выйти из строя из-за термического напряжения. Теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава обеспечивает отвод тепла от ключевых компонентов, а в сочетании с низким коэффициентом теплового расширения снижает деформацию, вызванную тепловыми циклами. Его структурная стабильность обеспечивает длительный срок службы в условиях высоких температур, обеспечивая надёжную поддержку электрических соединений и компонентов противовеса самолета.

Теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава также обусловлена его технологичностью. Регулируя соотношение серебра и вольфрама и оптимизируя микроструктуру, можно добиться баланса между теплопроводностью и механическими свойствами сплава в различных высокотемпературных средах. Поверхностная обработка, такая как полировка или нанесение покрытия, дополнительно улучшает теплоотвод и снижает поверхностное тепловое сопротивление. Направления оптимизации включают улучшение теплопроводности сети с помощью наноразмерного серебряного порошка или интеграцию интеллектуальных технологий мониторинга для оптимизации терморегулирования в режиме реального времени. Одним словом, теплопроводность серебряно-вольфрамового сплава в условиях высоких температур обеспечивает его применение в электронике, сварке и аэрокосмической промышленности, значительно повышая надёжность и производительность компонентов.

2.3.6 Характеристики и механизм коррозионной стойкости сплава серебра с вольфрамом

Коррозионная стойкость серебряно-вольфрамового сплава является важной характеристикой в различных условиях применения, позволяя ему противостоять химической и электрохимической эрозии и сохранять длительную стабильность и функциональность. Коррозионная стойкость – это способность материала противостоять разрушению в кислотной, щелочной или влажной среде. Серебряно-вольфрамовый сплав достигает превосходных характеристик благодаря химической стабильности серебра и антиокислительным свойствам вольфрама. Эта особенность даёт ему значительное преимущество в электрических контактах, сварочных электродах и компонентах аэрокосмической техники.

2.3.6.1 Влияние различных коррозионных сред на сплав серебра с вольфрамом

Характеристики серебряно-вольфрамового сплава в различных коррозионных средах различаются в зависимости от взаимодействия условий окружающей среды и химического

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

состава, что влияет на его поверхностные свойства и срок службы. Коррозионная стойкость серебряно-вольфрамового сплава в основном зависит от свойств серебра и вольфрама, но коррозионное воздействие различных сред на эти две фазы различно, что служит важным ориентиром для оптимизации конструкции материала.

Во влажной среде сплав серебра с вольфрамом обладает определённой коррозионной стойкостью. Серебряная фаза обладает хорошей химической стабильностью во влаге, но при длительном воздействии может слегка окисляться, образуя на поверхности тонкий слой оксида, что незначительно влияет на проводимость. Благодаря высокой химической стабильности вольфрамовая фаза практически не подвержена коррозии во влажной среде, однако при наличии в ней сульфидов или хлоридов серебро может вступать в реакции сульфидирования или хлорирования, увеличивая шероховатость поверхности, которую необходимо контролировать с помощью мер защиты поверхности. В этой среде сплав серебра с вольфрамом сохраняет основную структурную целостность и подходит для использования в электрооборудовании внутри помещений.

В кислой среде коррозионная стойкость сплава серебра с вольфрамом сталкивается с большими проблемами. Кислотные вещества, такие как серная кислота или соляная кислота, могут разъедать фазу серебра, вызывая растворение поверхности или образование продуктов коррозии, влияющих на электро- и теплопроводность. Фаза вольфрама обладает высокой стойкостью к кислотной коррозии из-за своей высокой химической инертности, но окислители в кислой среде могут вызывать небольшое поверхностное окисление вольфрама с образованием нестабильных соединений. Микроструктурная плотность сплава играет здесь ключевую роль. Пористость или дефекты могут ускорить проникновение коррозии, и стойкость необходимо повысить путем оптимизации процесса спекания. Применения в кислых условиях должны быть осторожными и подходят для кратковременного воздействия или использования с защитными покрытиями.

В щелочных средах коррозионная стойкость серебряно-вольфрамового сплава относительно хорошая. Серебро обладает высокой устойчивостью к щелочным веществам, а его поверхность не подвержена коррозии, сохраняя электропроводность и механические свойства. Вольфрамовая фаза также проявляет стабильные химические свойства в щелочных средах, снижая риск коррозии. Однако, если щелочная среда содержит окислители или подвергается воздействию высоких температур, серебро может медленно окисляться, что влияет на долгосрочную стабильность. Коррозионная стойкость сплава в этой среде выше, чем в кислой, и он подходит для контактных деталей в определённом промышленном оборудовании.

Примеси и перепады температур в окружающей среде также влияют на коррозионный эффект. Среда с высоким содержанием серы или хлоридов может усилить коррозию серебра, а повышение температуры ускоряет химические реакции и увеличивает скорость эрозии. Немагнитные свойства серебряно-вольфрамового сплава по-прежнему дают ему преимущество в средах, чувствительных к электромагнитному излучению, но коррозионная стойкость требует корректировки условий эксплуатации или мер защиты в соответствии с конкретными условиями.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Одним словом, воздействие различных коррозионных сред на серебряно-вольфрамовый сплав выявляет его ограничения и потенциал коррозионной стойкости, а также служит руководством для выбора и оптимизации материала.

2.3.6.2 Внутренний механизм коррозионной стойкости сплава серебра с вольфрамом

Механизм коррозионной стойкости серебряно-вольфрамового сплава обусловлен синергетическим эффектом химической стабильности и микроструктуры серебра и вольфрама, что позволяет ему противостоять коррозии в различных средах и сохранять свои эксплуатационные характеристики в течение длительного времени. Суть коррозионной стойкости заключается в снижении химической реакции или электрохимической коррозии между материалом и окружающей средой. Серебряно-вольфрамовый сплав достигает этой цели благодаря следующим механизмам.

Во-первых, химическая стабильность серебра является основой коррозионной стойкости. Серебро обладает сильной антиоксидантной активностью по отношению к кислороду и воде при комнатной температуре, и на его поверхности с трудом образуется толстый оксидный слой, что снижает накопление продуктов коррозии. Пластичность серебра позволяет ему адаптироваться к воздействию окружающей среды на микроскопическом уровне и снизить риск растрескивания или отслоения. Однако в средах, содержащих серу или хлориды, серебро может вступать в незначительные реакции с образованием сульфидов или хлоридов, что требует дополнительной защиты от вольфрамовой фазы. Серебро смачивает частицы вольфрама во время жидкофазного спекания, образуя плотную структуру интерфейса, что повышает общую коррозионную стойкость.

Во-вторых, высокая химическая инертность вольфрама является ключевым фактором коррозионной стойкости. Вольфрам обладает чрезвычайно высокой температурой плавления и стабильной кристаллической структурой. Он не реагирует с обычными коррозионными средами в кислых, щелочных или влажных средах, сохраняя при этом целостность поверхности. Антиоксидантная способность вольфрама позволяет ему противостоять окислению даже при высоких температурах или в богатых кислородом средах, образуя тонкий защитный слой, препятствующий дальнейшей эрозии. Частицы вольфрама образуют в сплаве каркасную структуру, рассеивая пути проникновения коррозионной среды и ограничивая распространение эрозии внутрь. Эта характеристика делает вольфрамовую фазу основным фактором коррозионной стойкости серебряно-вольфрамового сплава.

Оптимизация микроструктуры дополнительно повышает коррозионную стойкость. В процессе спекания жидкая фаза серебра заполняет промежутки между частицами вольфрама, уменьшая поры и дефекты и предотвращая проникновение коррозионной среды через микротрещины. Процесс горячего изостатического прессования или искрового плазменного спекания повышает плотность, уплотняет границы зерен и снижает начальные точки коррозии. Прочность межфазной связи серебра и вольфрама улучшается за счет высокоэнергетического шарового измельчения и равномерного смешивания порошков, что повышает однородность коррозионной стойкости всей

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

структуры. Немагнитные свойства также поддерживают механизм коррозионной стойкости и исключают влияние электромагнитных помех на стабильность поверхности.

Однако коррозионная стойкость сплавов серебра с вольфрамом ограничена. Серебряная фаза склонна к коррозии при определённых условиях (например, в серосодержащих средах), а высокая твёрдость вольфрамовой фазы может приводить к образованию микротрещин под действием длительной нагрузки, ускоряя локальную эрозию. Оптимизация внутреннего механизма требует баланса между проводимостью серебра и коррозионной стойкостью вольфрама. Ключевую роль играет корректировка соотношения компонентов и микроструктуры.

2.3.6.3 Технологические средства повышения коррозионной стойкости

Ключом к повышению коррозионной стойкости серебряно-вольфрамового сплава является повышение его долговечности в различных средах, что достигается за счет сочетания подготовки материала, обработки поверхности и оптимизации условий эксплуатации. Повышение коррозионной стойкости направлено, главным образом, на снижение коррозионной чувствительности серебра и устранение микроскопических дефектов, а также на повышение антиокислительных свойств вольфрама для оптимизации коррозионной стойкости сплава.

Во-первых, оптимизация соотношения компонентов в составе является основой повышения коррозионной стойкости. Увеличение содержания вольфрама может повысить общую коррозионную стойкость сплава, поскольку его высокая химическая инертность снижает реакцию с коррозионной средой. При умеренном содержании серебра жидкофазное спекание формирует плотную структуру и увеличивает прочность межфазных связей, однако слишком высокое содержание серебра может увеличить риск коррозии, поэтому необходимо добиться баланса, регулируя соотношение. Микродобавки, такие как молибден или хром, могут повысить стойкость вольфрама к окислению, однако их содержание необходимо контролировать, чтобы избежать влияния на электропроводность.

Во-вторых, оптимизация процесса спекания позволяет значительно повысить плотность микроструктуры. Жидкофазное спекание заполняет промежутки между частицами вольфрама благодаря смачивающему эффекту серебра, уменьшает пористость и предотвращает проникновение агрессивных сред. Технология искрового плазменного спекания быстро формирует плотную структуру благодаря импульсному току и высокому давлению, подавляет чрезмерный рост зерен и улучшает однородность поверхности. Процесс горячего изостатического прессования устраняет остаточные дефекты благодаря всенаправленному высокому давлению, что дополнительно повышает стабильность коррозионной стойкости. Спекание в вакууме или среде высокочистого аргона предотвращает проникновение окисленных примесей, сохраняет чистоту вольфрама и серебра и снижает чувствительность к коррозии.

В-третьих, технология обработки поверхности является эффективным средством повышения коррозионной стойкости. Антикоррозионные покрытия, наносимые методом плазменного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

химического осаждения из паровой фазы, такие как нитрид титана или карбид хрома, могут образовывать защитный слой на поверхности сплава, изолировать коррозионные среды и снижать окисление или сульфидирование серебра. Электрохимическая полировка оптимизирует качество поверхности, снижает начальную точку коррозии и повышает коррозионную стойкость. Пассивация поверхности дополнительно повышает коррозионную стойкость за счет формирования стабильного оксидного слоя, особенно подходящего для серных и хлоридных сред. Исследования показали, что подходящие покрытия могут значительно снизить скорость коррозии и продлить срок службы деталей.

В-четвертых, управление окружающей средой и оптимизация условий эксплуатации могут дополнительно повысить коррозионную стойкость. Во влажных или кислых средах используйте герметичные конструкции или защиту инертным газом для снижения контакта с коррозионными средами. В сварочных или электротехнических работах контролируйте рабочие параметры, такие как температура и влажность, для снижения риска коррозии. Интеллектуальная технология мониторинга определяет состояние коррозии в режиме реального времени с помощью встроенных датчиков, оптимизирует циклы технического обслуживания и предотвращает чрезмерную эрозию. Функционально градиентная конструкция материала увеличивает содержание вольфрама на поверхности для усиления антикоррозионного слоя, сохраняя при этом проводимость внутренней фазы серебра.

Комбинированное применение этих технологических процессов позволяет серебряно-вольфрамовому сплаву эффективно работать во влажных, кислотных и промышленных средах, продлевая срок службы компонентов и повышая их надежность. Направления оптимизации включают разработку самовосстанавливающихся покрытий для динамического восстановления коррозионных повреждений или повышение однородности поверхности за счет использования наноразмерного вольфрамового порошка.

2.4 Паспорт безопасности серебряно-вольфрамового сплава CTIA GROUP LTD

Паспорт безопасности материала (MSDS) обычно предоставляется производителем China Tungsten Intelligent Manufacturing, который содержит информацию о физических и химических свойствах материала, инструкции по безопасному применению и информацию о потенциальной опасности. Согласно имеющейся информации, содержание MSDS в серебряно-вольфрамовом сплаве может соответствовать общим стандартам для сплавов на основе вольфрама или серебряных сплавов.

Информация о составе: Соотношение серебра (Ag) и вольфрама (W) (например, 30%-70% Ag, 70%-30% W) зависит от конкретного продукта. Физические свойства: Плотность около 12,0-15,0 г/см³, диапазон температур плавления варьируется в зависимости от содержания серебра, электропроводность 40%-60% IACS. Опасность для здоровья: Серебро и вольфрам сами по себе, как правило, не являются существенно токсичными. Меры безопасности: Рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

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

Глава 3: Наблюдение за характеристиками микроструктуры и корреляцией эксплуатационных характеристик сплава серебра и вольфрама

Микроструктура сплава серебра с вольфрамом является основой его эксплуатационных характеристик, напрямую влияя на его электропроводность, теплопроводность, твёрдость и коррозионную стойкость. Микроструктура формируется методом порошковой металлургии, а взаимодействие серебра как связующей фазы с вольфрамовым армирующим элементом формирует уникальную морфологию зерен, распределение фаз и характеристики интерфейса. Эти структурные характеристики тесно связаны с механическими и функциональными свойствами сплава, обеспечивая важную основу для оптимизации процесса изготовления и повышения эксплуатационных характеристик.

3.1 Наблюдение за микроструктурными характеристиками сплава серебра с вольфрамом

Микроструктура сплава серебра с вольфрамом исследовалась методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифракции (РФА), что позволило выявить его внутреннюю кристаллическую структуру и распределение фаз. Эти наблюдения дают прямые доказательства для понимания свойств сплава, демонстрируя взаимодействие серебра и вольфрама в процессе спекания и его влияние на микроструктуру.

3.1.1 Морфология и размерные характеристики зерна

Морфология зерен и размерные характеристики сплава серебра с вольфрамом являются основными аспектами микроструктуры, которые напрямую влияют на механические свойства и долговечность сплава. Морфология зерен в основном проявляется в виде полигональной или почти сферической структуры частиц вольфрама, в то время как фаза серебра представляет собой непрерывное или сетчатое распределение вокруг частиц вольфрама. Частицы вольфрама обычно существуют в более крупном размере и обеспечивают поддержку скелета в качестве фазы армирования, в то время как фаза серебра заполняет промежутки при спекании в жидкой фазе, образуя более мелкие зерна. Это морфологическое различие проистекает из физических и химических свойств этих двух металлов. Высокая температура плавления вольфрама сохраняет его в твердом состоянии во время спекания, в то время как низкая температура плавления серебра заставляет его плавиться и смачивать частицы вольфрама.

Размер зерна зависит от процесса подготовки и условий спекания. Размер частиц исходного порошка вольфрама обычно находится на уровне от субмикрона до микрона, который может быть дополнительно измельчен до наномасштаба с помощью высокоэнергетического шарового измельчения. Температура и время спекания играют ключевую роль в росте зерна. Высокотемпературное и длительное спекание может привести к аномальному росту частиц вольфрама, в то время как фаза серебра образует более крупные зерна из-за повышенной текучести. Оптимизированные процессы, такие как искровое плазменное спекание (SPS),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подавляют чрезмерный рост зерна за счет быстрого нагрева и давления, удерживая частицы вольфрама в меньшем диапазоне размеров, а фаза серебра имеет мелкодисперсное и равномерное распределение. Результаты наблюдений показывают, что чем меньше размер зерна, тем выше плотность границ зерен, и твердость и прочность сплава обычно соответственно увеличиваются. Однородность морфологии и размера зерна оказывает важное влияние на эксплуатационные характеристики. Неравномерное распределение зерна может привести к локальной концентрации напряжений, снижая прочность на изгиб и ударную вязкость. В процессе спекания горячее изостатическое прессование (ГИП) может устранить микродефекты и улучшить однородность зерна за счет всенаправленного давления. Применение наноразмерного вольфрамового порошка дополнительно измельчает зерна, усиливает эффект упрочнения границ зерен и значительно повышает стойкость сплава к износу и дуговой эрозии. Наблюдение за морфологией зерна также показывает степень смачивания серебра частицами вольфрама. Хорошее смачивание образует плотную структуру, снижает пористость и повышает общую стабильность характеристик. Короче говоря, морфология зерна и размерные характеристики серебряно-вольфрамовых сплавов регулируются процессом приготовления, который существенно влияет на их микроструктуру и макроскопические свойства.

3.1.2 Фазовое распределение и характеристики интерфейса

Фазовое распределение и характеристики интерфейса серебряно-вольфрамового сплава являются важными составляющими микроструктуры, которые напрямую определяют электропроводность, теплопроводность и коррозионную стойкость сплава. Фазовое распределение проявляется главным образом в том, что частицы вольфрама внедрены в серебряную матрицу или связующую фазу в качестве дисперсной фазы, а серебряная фаза образует непрерывную сетку или локальные агрегаты вокруг частиц вольфрама. Объёмная доля вольфрамовой фазы обычно высока и занимает основной объём, в то время как серебряная фаза заполняет промежутки в процессе спекания и усиливает связь между фазами. Такое распределение достигается с помощью порошковой металлургии, и на него существенное влияние оказывают однородность смешивания порошков и параметры спекания.

Характеристики интерфейса являются ключевой частью состояния распределения фаз, а сила связи на границе раздела между серебром и вольфрамом напрямую влияет на общие характеристики сплава. Наблюдения показывают, что фаза серебра смачивает поверхность частиц вольфрама во время спекания в жидкой фазе, образуя плотный слой интерфейса, уменьшая количество пустот и дефектов. Степень смачивания на границе раздела контролируется содержанием серебра и температурой спекания. При умеренном содержании серебра граница раздела хорошо связана и обеспечивает плавный переход; избыточное содержание серебра может привести к избыточной жидкой фазе серебра, образуя микроскопические скопления на границе раздела, что влияет на стабильность. Слой фазы серебра между частицами вольфрама также действует как буфер, поглощая термическое или механическое напряжение и повышая вязкость сплава. Равномерность распределения фаз критически важна для эксплуатационных характеристик. Неравномерное распределение может привести к локальному снижению электро-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

или теплопроводности, особенно при высоком содержании вольфрама. Недостаточное количество серебряной фазы может привести к образованию пор и повышению электрического или термического сопротивления. Оптимизация процессов спекания, таких как высокоэнергетическое шаровое измельчение и вакуумное спекание, может улучшить однородность распределения фаз и снизить накопление примесей и оксидов на границе раздела. Наблюдение за характеристиками границ раздела также выявляет роль упрочнения границ зерен. Серебряная фаза ограничивает движение дислокаций на границе зерен и повышает твердость. Однако, если сила сцепления на границе раздела недостаточна, могут образовываться микротрещины, снижающие долговечность.

Применение наноразмерного вольфрамового порошка дополнительно оптимизирует фазовое распределение и характеристики интерфейса. Малый размер частиц увеличивает площадь интерфейса, улучшает смачиваемость серебра и формирует более плотную микроструктуру. Процесс горячего изостатического прессования сжимает интерфейс под высоким давлением, что увеличивает силу связи между фазами и уменьшает дефекты интерфейса. Химическая реакция или диффузия на интерфейсе также влияет на характеристики. Подходящая атмосфера спекания позволяет контролировать степень реакции и поддерживать чистоту вольфрама и серебра. Одним словом, фазовое распределение и характеристики интерфейса серебряно-вольфрамового сплава оптимизируются посредством управления технологическим процессом, что напрямую связано с его электрическими, термическими и механическими свойствами, что обеспечивает важную основу для повышения производительности.

3.1.3 Микроскопические проявления пористости и дефектов

Пористость и микроскопическое проявление дефектов в сплавах серебра с вольфрамом являются важными аспектами микроструктуры, которые напрямую влияют на механические свойства, электропроводность и коррозионную стойкость сплава. Пористость – это доля незаполненных пустот в сплаве, которая обычно определяется процессом спекания и характеристиками исходного материала. К дефектам относятся микротрещины, несвязанные области и скопления примесей, которые в совокупности определяют общую плотность и стабильность сплава. Наблюдение за этими характеристиками помогает выявить узкие места в его эксплуатационных характеристиках и оптимизировать процесс изготовления.

Пористость в сплаве серебра с вольфрамом в основном проявляется в виде крошечных пустот, распределенных между фазой серебра и фазой вольфрама, а морфология в основном сферическая или нерегулярная. Образование пор происходит из-за газовой инкапсуляции во время смешивания порошка или недостаточного количества жидкой фазы серебра для полного заполнения зазоров во время спекания. Наблюдения показывают, что области с более высокой пористостью обычно появляются там, где частицы вольфрама плотные, и неравномерное распределение фазы серебра может усугубить это явление. Высокая пористость приведет к снижению электро- и теплопроводности, поскольку тепло и ток трудно переносить в зазорах. В то же время поры также могут стать точками концентрации напряжений, снижая прочность на изгиб и ударную вязкость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Анализ SEM показывает, что когда пористость ниже определенного уровня, характеристики сплава значительно улучшаются, особенно в приложениях с высокой надежностью.

Микроскопические проявления дефектов включают микротрещины и несвязанные интерфейсы, которые обычно возникают на границе раздела серебро-вольфрам или между частицами вольфрама. Микротрещины могут быть вызваны термическим напряжением или усадкой при охлаждении во время спекания, особенно когда коэффициенты термического расширения фазы серебра и фазы вольфрама сильно различаются. Несвязанный интерфейс проявляется в том, что фаза серебра не может полностью смачивать частицы вольфрама, что приводит к плохому локальному контакту и влияет на структурную целостность. Наблюдения с помощью просвечивающего электронного микроскопа показывают, что дефектные области часто сопровождаются накоплением примесей, которые могут быть внесены при неподходящей атмосфере спекания, что еще больше ослабляет связь между границами раздела. Наличие дефектов также может ускорить проникновение коррозионных сред и снизить коррозионную стойкость.

Контроль пористости и дефектов является ключом к оптимизации микроструктуры. Процессы спекания, такие как горячее изостатическое прессование, сжимают материал под действием всенаправленного давления, значительно уменьшая поры и микротрещины и повышая плотность. Искровое плазменное спекание подавляет образование дефектов и улучшает сцепление интерфейса за счет быстрого нагрева и давления. Использование высокочистого сырья и равномерного смешивания порошков позволяет уменьшить количество примесей и газовых включений, а также снизить начальный уровень дефектов. Результаты наблюдений показывают, что пористость оптимизированного сплава серебра с вольфрамом может быть снижена до крайне низкого уровня, плотность дефектов значительно снижена, а стабильность характеристик улучшена. Короче говоря, микроскопические проявления пористости и дефектов могут быть улучшены посредством контроля процесса, что напрямую связано с комплексными эксплуатационными характеристиками сплава.

3.1.4 Различия в микроструктуре при различных процессах подготовки

Микроструктура сплава серебра с вольфрамом существенно различается в зависимости от процесса получения, включая традиционное спекание прессованных порошков, горячее изостатическое прессование (ГИП), электроискровое спекание (ИПС) и т. д. Каждый метод оказывает уникальное влияние на морфологию зерен, распределение фаз и состояние дефектов. Учёт этих различий помогает выбрать оптимальный процесс для конкретного применения и оптимизировать свойства сплава.

Традиционный метод спекания прессованных порошков является классическим методом получения серебряно-вольфрамового сплава. Микроструктура характеризуется диспергированными в серебряной матрице частицами вольфрама, а серебряная фаза образует сетку или локальные агрегаты. Размер зерна крупный, частицы вольфрама преимущественно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

полигональные, а серебряная фаза заполняет пустоты, образовавшиеся в результате жидкофазного спекания, но распределена неравномерно. Пористость относительно высокая и распределена между частицами вольфрама или в слабых областях серебряной фазы. Чаще встречаются такие дефекты, как микротрещины и несвязанные границы раздела. Электро- и теплопроводность ограничены, а твердость средняя, но стоимость изготовления низкая, что подходит для массового производства.

Процесс горячего изостатического прессования (ГИП) значительно улучшает микроструктуру за счет всенаправленной обработки высоким давлением и высокой температурой. Частицы вольфрама распределяются более равномерно, фаза серебра образует непрерывную сетку, пористость значительно снижается, а дефекты, такие как микротрещины, уменьшаются. Размер зерна измельчается благодаря прессованию под высоким давлением, увеличивается прочность связи на границе раздела и обеспечивается плавный переход. Улучшаются электропроводность и теплопроводность, а также значительно повышаются твердость и прочность на изгиб, что делает процесс ГИП пригодным для применений, требующих высокой плотности и надежности, например, для изготовления противовесов в аэрокосмической отрасли. Недостатками ГИП являются сложность оборудования и высокая стоимость, что ограничивает его широкое применение.

Процесс искрового плазменного спекания (ИПС) формирует уникальную микроструктуру благодаря импульсному току и быстрому нагреву. Частицы вольфрама остаются мелкими, фаза серебра распределена равномерно, поры и дефекты практически незаметны, а плотность границ зерен высока. Смачивающее действие на границе раздела превосходное, а фаза серебра прочно связана с вольфрамом, что снижает концентрацию напряжений. Электропроводность, теплопроводность и твердость достигают высокого уровня, что особенно подходит для высокопроизводительных контактных и электродных применений. Скорость процесса ИПС препятствует чрезмерному росту зерен, но предъявляет высокие требования к чистоте сырья и размеру частиц, а также к тщательному контролю процесса. Различия в микроструктуре, возникающие при различных процессах подготовки, также зависят от атмосферы и параметров спекания. Вакуум или инертная атмосфера снижают содержание окислительных примесей и улучшают распределение фаз; высокая температура и длительное спекание могут привести к росту зерна и повлиять на однородность. Результаты наблюдений показывают, что микроструктура, получаемая методом SPS, является наиболее плотной, за ним следует метод НР, а традиционное спекание прессованных порошков неудовлетворительно.

3.2 Внутренняя связь между структурой сплава серебра с вольфрамом и макроскопическими свойствами

Между микроструктурой сплава серебра с вольфрамом и его макроскопическими свойствами существует тесная взаимосвязь. Зернистая структура, распределение фаз и характеристики интерфейса влияют на прочность, ударную вязкость, электропроводность и теплопроводность сплава посредством физических и химических механизмов. Эта корреляция обеспечивает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теоретическую основу для оптимизации процесса изготовления и повышения эксплуатационных характеристик. Взаимодействие между серебром как связующей фазой и вольфрамовым армирующим слоем формирует микроструктуру, которая, в свою очередь, определяет эксплуатационные характеристики сплава в электрических контактах, сварочных электродах и компонентах аэрокосмической техники.

3.2.1 Влияние структуры зерна на прочность и вязкость

Зёрненная структура – основа микроструктуры сплава серебра с вольфрамом. Морфология, размер и ориентация зёрен влияют на прочность и вязкость сплава посредством упрочнения границ зёрен и механизмов движения дислокаций. Прочность – это способность сплава противостоять деформации и разрушению, а вязкость – поглощать энергию и противостоять распространению трещин. Изменения в зёрненной структуре напрямую определяют эксплуатационные характеристики обоих типов сплава.

Влияние размера зерна на прочность следует эффекту Холла-Паша. Чем мельче зерно, тем выше плотность границ зерен, тем больше ограничение на движение дислокаций и повышенные предел текучести и прочность на растяжение. В сплаве серебра с вольфрамом частицы вольфрама служат в качестве армирующей фазы, и размер зерна обычно больше, в то время как фаза серебра образует более мелкие зерна из-за спекания в жидкой фазе. Процессы спекания, такие как искровое плазменное спекание (SPS), подавляют рост зерна за счет быстрого нагрева, измельчают частицы вольфрама и фазы серебра и значительно повышают прочность. Наблюдения показывают, что сплав, полученный из наноразмерного порошка вольфрама, имеет уменьшенный размер зерна и значительно улучшенную прочность, что особенно подходит для применений, требующих высокой прочности на изгиб.

Влияние границ зерен на вязкость более сложное. Мелкие зерна увеличивают площадь границ зерен, ограничивают распространение трещин и повышают вязкость. Однако, если сила связи границ зерен недостаточна, могут образовываться микротрещины, что снижает вязкость. Фаза серебра смачивает частицы вольфрама на границе зерен, образуя буферный слой, поглощает механическое напряжение или термическое напряжение и повышает вязкость. Горячее изостатическое прессование (ГИП) улучшает связь границ зерен, уменьшает дефекты и оптимизирует характеристики вязкости за счет высокого давления. При умеренном содержании серебра жидкая фаза заполняет зазор, и эффект упрочнения границ зерен оказывается значительным. Избыточное содержание серебра может привести к тому, что граница зерен станет слишком мягкой, а вязкость снизится. Ориентация и морфология зерен также влияют на характеристики. Полигональные или почти сферические частицы вольфрама рассеивают напряжение, повышают прочность и вязкость, а нерегулярные частицы могут вызывать локальную концентрацию напряжений и снижать стабильность. Температура и время спекания регулируют рост зерна. Избыточная температура может вызвать аномальный рост и повлиять на однородность. Микроструктурные исследования показывают, что серебряно-вольфрамовые сплавы с оптимизированной зернистой структурой обеспечивают баланс прочности и вязкости и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подходят для контактных применений в условиях динамических нагрузок и дуговых разрядов. Направления оптимизации включают измельчение зерен посредством наноструктурирования или корректировку распределения границ зерен посредством функционального градиента для комплексного повышения эксплуатационных характеристик.

3.2.2 Корреляция между распределением фаз и электро- и теплопроводностью

Распределение фаз является важной характеристикой микроструктуры сплава серебра с вольфрамом. Состояние распределения фаз и их взаимодействие на границе раздела напрямую влияют на электропроводность и теплопроводность, демонстрируя определённый корреляционный закон. Электропроводность и теплопроводность отражают эффективность переноса тока и тепла соответственно. Однородность и непрерывность распределения фаз являются ключевыми факторами для определения этих свойств.

Серебряная фаза является основным источником электро- и теплопроводности. Серебро образует непрерывную сеть в качестве матрицы или связующей фазы, и электроны и тепло эффективно переносятся через серебряную фазу. Хотя электро- и теплопроводность вольфрамовой фазы низкая, ее равномерное распределение снижает точки концентрации электрического и теплового сопротивления и улучшает общие характеристики. Непрерывность распределения фаз определяется спеканием жидкой фазы. При высоком содержании серебра сеть более связана, и электро- и теплопроводность значительно улучшаются; при преобладающем содержании вольфрама серебряная фаза может разрушаться, и характеристики ухудшаются. Наблюдения показывают, что структура, в которой серебряная фаза равномерно обволакивает частицы вольфрама, обладает наилучшей электро- и теплопроводностью.

Характеристики интерфейса оказывают значительное влияние на характеристики. Сила связи между серебром и вольфрамом увеличивается за счёт смачивания, что уменьшает количество пустот и дефектов, а также улучшает электро- и теплопроводность. При умеренной толщине слоя серебряной фазы на интерфейсе тепло и ток передаются плавно. Слишком толстый слой серебра может увеличить тепловое сопротивление, а слишком тонкий – ухудшить целостность. Процессы спекания, такие как горячее изостатическое прессование, сжимают интерфейс, а электроискровое плазменное спекание оптимизируют распределение фаз, значительно улучшая стабильность характеристик.

Распределение объёмной доли фаз также имеет закономерный характер. С увеличением содержания серебра электропроводность и теплопроводность, как правило, увеличиваются, но после превышения определённого значения этот рост ослабевает, поскольку барьерный эффект вольфрамовой фазы усиливается. С увеличением содержания вольфрама электропроводность и теплопроводность снижаются, но структурная стабильность улучшается, что делает сплав пригодным для высокотемпературных применений. Микроструктурные исследования показывают, что оптимизированное распределение фаз обеспечивает хорошие эксплуатационные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

характеристики серебряно-вольфрамового сплава в контактах высоковольтных выключателей и теплорассеивающих подложках.

3.2.3 Влияние пористости и дефектов на твердость и коррозионную стойкость

Пористость и дефекты являются важными характеристиками микроструктуры серебряно-вольфрамового сплава, которые напрямую влияют на твердость и коррозионную стойкость, а также определяют эксплуатационные характеристики сплава в условиях сильного износа и коррозии. Пористость определяет долю незаполненных пустот в материале, а дефекты включают микротрещины и несвязанные границы раздела. Эти факторы влияют на плотность и стабильность поверхности.

Влияние пористости на твердость в основном отражается в ее влиянии на границы зерен и распределение фаз. Более высокая пористость приведет к разрыву границ зерен, затруднит движение дислокаций и скольжение границ зерен, а также снизит твердость. В сплавах серебра с вольфрамом поры обычно распределены между частицами вольфрама или в слабых областях фазы серебра, что снижает общую прочность на сжатие и износостойкость материала. Оптимизация процессов спекания, таких как горячее изостатическое прессование (ГИП), сжимает поры за счет всенаправленного давления, значительно улучшая плотность и повышая твердость. Дефекты, такие как микротрещины, еще больше ослабляют твердость. Эти трещины могут быть вызваны термическим напряжением или усадкой при охлаждении, особенно на границе раздела серебро-вольфрам. Твердость значительно снижается при высокой плотности дефектов. Наблюдения показывают, что уменьшение пористости и плотности дефектов может повысить твердость до более высокого уровня, что подходит для применений, требующих высокой износостойкости.

Коррозионная стойкость более непосредственно зависит от пористости и дефектов. Поры служат каналами для проникновения коррозионных сред, увеличивая риск эрозии поверхности, особенно во влажных или кислых средах, где остаточная влага или химические вещества в порах ускоряют процесс коррозии. Такие дефекты, как несвязанные интерфейсы или микротрещины, создают начальные точки коррозии, через которые коррозионные среды диффундируют внутрь, снижая химическую стабильность сплава. Серебро может окисляться или сульфидироваться в порах, и, хотя вольфрамовая фаза обладает высокой коррозионной стойкостью, в дефектах все еще могут образовываться нестабильные соединения. Оптимизация процесса спекания, такая как искровое плазменное спекание (ИПС), снижает пористость и дефекты, улучшает сцепление интерфейсов и значительно повышает коррозионную стойкость. Микроструктурные исследования показывают, что плотная структура продлевает срок службы серебряно-вольфрамовых сплавов в коррозионных средах, что делает их особенно подходящими для промышленного оборудования. Направления оптимизации включают снижение начальных дефектов за счёт использования высококачественного сырья или использования нанопорошков для повышения плотности. Контроль пористости и дефектов достигается путём корректировки параметров процесса, при этом ключевым фактором является баланс между твердостью и коррозионной стойкостью.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Эволюция микроструктуры сплава серебра с вольфрамом

Микроструктура сплава серебра с вольфрамом меняется в процессе изготовления и эксплуатации, на что влияют соотношение компонентов, условия спекания и факторы окружающей среды. Этот закон эволюции раскрывает динамическую взаимосвязь между структурой и эксплуатационными характеристиками и служит важной основой для оптимизации процесса и прогнозирования срока службы. К движущим факторам эволюции микроструктуры относятся фазовые переходы, рост зерен и развитие дефектов, а взаимодействие серебра и вольфрама является ключевым механизмом.

3.3.1 Эволюция микроструктуры, вызванная изменениями в соотношении компонентов

Изменение соотношения компонентов в составе является основным фактором, определяющим эволюцию микроструктуры сплава серебра с вольфрамом. Соотношение серебра и вольфрама напрямую влияет на морфологию зерен, распределение фаз и пористость, формируя различные микроструктурные характеристики. Этот процесс эволюции достигается посредством спекания и термической обработки, отражая динамическую адаптацию свойств материала.

При увеличении содержания серебра микроструктура существенно изменяется. Серебро, как связующая фаза с низкой температурой плавления, плавится при спекании в жидкой фазе, смачивает частицы вольфрама и заполняет зазоры, уменьшая пористость и увеличивая плотность. Морфология зерен развивается в распределение сетки фазы серебра, частицы вольфрама обертываются более равномерно, а сила межфазной связи улучшается. При умеренном содержании серебра фаза серебра образует непрерывную сетку, увеличивается плотность границ зерен, микроструктура становится более хрупкой, а твердость и вязкость улучшаются. Однако слишком высокое содержание серебра может привести к избытку жидкой фазы, фаза серебра накапливается, образуя более крупные зерна, пористость уменьшается, но границы зерен слишком мягкие, что влияет на стабильность. Наблюдения показывают, что электропроводность и теплопроводность сплавов с высоким содержанием серебра улучшаются, но износостойкость может снизиться.

При увеличении содержания вольфрама микроструктура превращается в скелетную структуру, в которой преобладают частицы вольфрама. Вольфрам остается в твердом состоянии в качестве высокоплавкой армирующей фазы, размер зерна больше, распределение фазы серебра уменьшается, а способность заполнять зазоры уменьшается. Пористость может увеличиваться, особенно при недостаточном количестве жидкой фазы серебра, увеличиваются микротрещины и несвязанные интерфейсы, а плотность уменьшается. Эффект упрочнения границ зерен ослабевает, твердость увеличивается, но вязкость уменьшается, а электропроводность и теплопроводность уменьшаются по мере уменьшения содержания фазы серебра. Оптимизация процесса спекания, такая как горячее изостатическое прессование, может сжимать поры и улучшать структурную однородность. Сплавы с высоким содержанием вольфрама подходят для высокотемпературных и долговечных применений.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Изменения в соотношении состава также влияют на равномерность распределения фаз. Дисбаланс в соотношении серебра и вольфрама может привести к осаждению частиц вольфрама или локальному накоплению фаз серебра, повышению микроструктурной неоднородности и снижению стабильности характеристик. Равномерность смешивания порошков и контроль атмосферы спекания могут уменьшить этот эффект и поддерживать стабильность распределения фаз. Процесс термообработки дополнительно стимулирует эволюцию. Высокотемпературная и длительная обработка может привести к росту зерен и перегруппировке фаз, и параметры необходимо контролировать, чтобы избежать чрезмерной эволюции. Результаты наблюдений показывают, что динамическая регулировка соотношения серебра и вольфрама обеспечивает оптимизацию характеристик за счет микроструктурной эволюции, что подходит для различных требований применения. Направления оптимизации включают измельчение зерна с помощью наноразмерных порошков или корректировку локальных соотношений компонентов с помощью функционального градиента. Микроструктурная эволюция, вызванная изменением соотношений компонентов, демонстрирует адаптивность серебряно-вольфрамовых сплавов и служит основой для совершенствования процесса их получения.

3.3.2 Преобразование микроструктуры при термической обработке

Процесс термической обработки является важным этапом в формировании микроструктуры серебряно-вольфрамового сплава. Он существенно влияет на эксплуатационные характеристики сплава, контролируя температуру и время выдержки, что способствует росту зерна, фазовой адаптации и уменьшению дефектов. Термическая обработка включает отжиг, закалку и старение. Физические и химические свойства серебра и вольфрама в этом процессе проявляют различные реакции, формируя новые микроструктурные характеристики.

В процессе отжига микроструктура сплава серебра с вольфрамом претерпевает значительные изменения. Отжиг при более низкой температуре способствует перераспределению фазы серебра, а жидкая фаза заполняет остаточные поры, усиливая силу межфазного сцепления. Частицы вольфрама остаются твердыми, границы зерен, как правило, гладкие, а микротрещины и дефекты постепенно уменьшаются. Размер зерна может немного увеличиться, но чрезмерный рост можно подавить, контролируя время отжига для поддержания мелкодисперсной структуры. Наблюдения показывают, что плотность отожженного сплава улучшается, а твердость и проводимость в определенной степени улучшаются, что особенно подходит для контактных применений, требующих равномерной производительности.

Закалка вызывает фазовые изменения вследствие быстрого охлаждения. Серебряная фаза образует мелкозернистые структуры благодаря быстрому затвердеванию, а распределение частиц вольфрама более равномерное, однако напряжения при охлаждении могут привести к образованию микротрещин. Распределение фаз корректируется, и сетка серебряной фазы может разрушаться или перестраиваться, что влияет на теплопроводность и электропроводность. Количество дефектов, таких как неплотные границы раздела, может увеличиваться из-за концентрации напряжений, поэтому для снижения этого эффекта необходимо оптимизировать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

скорость охлаждения. Микроструктура после закалки подходит для деталей, требующих высокой прочности и быстрого реагирования, но ударная вязкость может быть несколько снижена.

Старение оптимизирует микроструктуру посредством длительной низкотемпературной обработки. Фаза серебра постепенно стабилизируется, улучшается граница раздела смачиваемых частиц вольфрама и дополнительно снижается пористость. Рост зерна замедляется, структура вольфрамового скелета становится плотнее, а плотность дефектов значительно снижается. Фазовая регулировка повышает прочность связи серебра и вольфрама на границе раздела, а также повышает твердость и коррозионную стойкость. Результаты наблюдений показывают, что состаренный сплав хорошо себя проявляет при длительной эксплуатации и особенно подходит для противовесов и сварочных электродов в аэрокосмической отрасли. Ключевую роль играет точный контроль параметров термообработки. Чрезмерные температура или время могут привести к чрезмерному размеру зерна и повлиять на эксплуатационные характеристики. Направления оптимизации включают управление фазовыми переходами посредством сегментированной термообработки или корректировку параметров в режиме реального времени в сочетании с интеллектуальной технологией мониторинга. Микроструктурные превращения во время термообработки динамически оптимизируются за счет текучести серебра и стабильности вольфрама, что коррелирует с комплексными эксплуатационными характеристиками сплава.

3.3.3 Влияние среды обслуживания на микроструктуру и обратную связь по производительности

Условия эксплуатации оказывают значительное влияние на изменение микроструктуры серебряно-вольфрамового сплава. Такие условия окружающей среды, как температура, влажность, химические среды и механические напряжения, изменяют структурные характеристики посредством физических и химических воздействий, которые, в свою очередь, влияют на эксплуатационные характеристики сплава. Это влияние служит важной основой для прогнозирования срока службы и стратегий технического обслуживания. Высокотемпературная среда ускоряет микроструктурную эволюцию сплава серебра с вольфрамом. При высокой температуре серебряная фаза может размягчаться или частично плавиться, граница раздела смачиваемых частиц вольфрама может перестраиваться, а на границах зерен могут возникать микротрещины из-за термических напряжений. Структура вольфрамового скелета остается стабильной, но длительное воздействие высоких температур может привести к росту зерен, увеличению пористости и снижению плотности. Обратная связь по эксплуатационным характеристикам проявляется в снижении электро- и теплопроводности, уменьшении твердости из-за изменения границ зерен и снижении коррозионной стойкости из-за термического окисления. Высокотемпературные компоненты необходимо укрепить для защиты.

Влияние влажных или коррозионных сред на микроструктуру более сложно. Фаза серебра может подвергаться незначительной коррозии в серной или хлоридной среде, образуя оксиды или сульфиды, а также дефекты на границе раздела. Фаза вольфрама обладает высокой коррозионной стойкостью, но дефекты могут проникать в коррозионную среду, пористость увеличивается, и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

структурная целостность нарушается. Обратная связь по производительности проявляется в снижении проводимости, дальнейшем ослаблении коррозионной стойкости, а механическая прочность может быть снижена из-за распространения трещин, что необходимо улучшить с помощью поверхностного покрытия или конструкции герметизации. Среды механических напряжений, такие как вибрация или удар, вызывают динамические изменения микроструктуры. Границы зерен подвержены концентрации напряжений, микротрещины могут расширяться, а поры становятся точками сброса напряжений, влияя на плотность. Пластичность фазы серебра поглощает часть напряжения, но длительная нагрузка может вызвать усталостное повреждение. Обратная связь по производительности проявляется в снижении вязкости, локальном ослаблении твердости, а электро- и теплопроводность ограничены из-за микроструктурных повреждений. Для динамических применений необходимо оптимизировать распределение зерна.

Совокупное воздействие факторов окружающей среды оказывает обратное влияние на эксплуатационные характеристики посредством изменения микроструктуры. Наблюдения показывают, что высокая температура и коррозия совместно ускоряют рост дефектов, а механическое напряжение усиливает распространение трещин. Направления оптимизации включают разработку экологически стойких покрытий или повышение локальной стабильности за счет проектирования функциональных градиентов. Влияние условий эксплуатации на микроструктуру и обратная связь по эксплуатационным характеристикам служат важным ориентиром для адаптивного проектирования сплавов.

3.4 Методы контроля микроструктуры сплава серебро-вольфрам

Регулирование микроструктуры серебряно-вольфрамового сплава является ключом к повышению производительности и адаптации к требованиям сферы применения. Это достигается путем сочетания подготовки материала, оптимизации процесса и последующей обработки. Регулирование позволяет контролировать морфологию зерен, распределение фаз, пористость и дефекты, оптимизируя электропроводность, теплопроводность, твердость и коррозионную стойкость. В основе регулирования лежит выбор исходного сырья. Для измельчения зерен и повышения равномерности распределения фаз используются высокочистые наноразмерные вольфрамовые и серебряные порошки. Процессы смешивания порошков, такие как высокоэнергетическое шаровое измельчение, обеспечивают однородность исходного сырья и снижают количество начальных дефектов, закладывая основу для последующего регулирования.

Процесс спекания является основой регулирования. Жидкофазное спекание заполняет зазоры и уменьшает пористость благодаря смачивающему эффекту серебра. Электроплазменное спекание (ИПС) подавляет рост зерен и оптимизирует распределение фаз за счет быстрого нагрева и давления. Горячее изостатическое прессование (ГИП) сжимает дефекты и повышает плотность за счет высокого давления. Атмосфера спекания, такая как вакуум или инертный газ, снижает количество окисленных примесей и улучшает качество интерфейса. Термическая обработка обеспечивает динамическое регулирование. Отжиг улучшает сцепление интерфейса, закалка измельчает зерна, а старение стабилизирует фазовое состояние и корректирует границы зерен и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

состояния дефектов. Оптимизация параметров, такая как ступенчатое повышение температуры, контролирует рост зерен и повышает стабильность характеристик. Обработка поверхности улучшает регулирование. Электрохимическая полировка снижает шероховатость и уменьшает количество точек зарождения дефектов. Антикоррозионные покрытия, такие как изоляционные среды из нитрида титана и антиадгезионные покрытия, улучшают свойства поверхности. Функциональный градиентный дизайн корректирует состав в определенных областях для оптимизации локальных характеристик. Управление окружающей средой поддерживает регулирование. Контролируйте температуру и влажность во время использования для снижения коррозионного воздействия. Интеллектуальная технология мониторинга корректирует параметры процесса в режиме реального времени и динамически оптимизирует микроструктуру. Комплексное применение мер контроля улучшает эксплуатационные характеристики серебряно-вольфрамового сплава, отвечая требованиям электротехнической, сварочной и аэрокосмической промышленности.

3.4.1 Метод контроля микроструктуры, основанный на процессе подготовки

Метод управления микроструктурой, основанный на процессе подготовки, является основным средством оптимизации характеристик сплава серебра и вольфрама. Точный контроль морфологии зерен, распределения фаз и дефектов достигается на различных этапах процесса порошковой металлургии. Процесс подготовки включает смешивание порошков, прессование, спекание и постобработку, и каждый этап оказывает уникальное влияние на микроструктуру. Равномерное распределение сырья достигается за счет технологии высокоэнергетического шарового измельчения на этапе смешивания порошков. Наноразмерный вольфрамовый порошок и серебряный порошок используются для измельчения зерен и оптимизации последовательности распределения фаз. Высокочистое сырье уменьшает количество примесей и снижает начальный уровень дефектов, закладывая основу для последующего регулирования. Процесс прессования корректирует расположение частиц путем управления давлением и конструкцией пресс-формы, уменьшает зазор и улучшает первичный уровень плотности.

Процесс спекания является ключевым звеном в регулировании. Жидкофазное спекание использует низкую температуру плавления серебра для смачивания частиц вольфрама, заполнения зазоров и уменьшения пористости. Электроискровое плазменное спекание (ИПС) подавляет рост зерен, измельчает структуру и оптимизирует распределение фаз за счет импульсного тока и быстрого нагрева. Горячее изостатическое прессование сжимает дефекты за счет всенаправленного высокого давления, улучшает межфазные связи и значительно повышает плотность. Атмосфера спекания, такая как вакуум или инертный газ, снижает окисление, сохраняет чистоту вольфрама и серебра и улучшает качество микроструктуры. Последующая обработка дополнительно оптимизирует структуру. Термическая обработка, такая как отжиг, улучшает межфазные связи, закалка измельчает зерна, а старение стабилизирует фазовое состояние. Обработка поверхности, такая как электрохимическая полировка, снижает шероховатость и уменьшает начальные точки дефектов. Тонкая настройка параметров процесса, таких как температурный градиент и контроль времени, настраивает микроструктуру для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

различных требований применения. Наблюдения показывают, что технологический маршрут SPS в сочетании с НР значительно улучшает плотность и однородность и подходит для высокопроизводительных контактов.

3.4.2 Оптимизация микроструктуры путем добавления легирующих элементов

Добавление легирующих элементов является важным средством оптимизации микроструктуры серебряно-вольфрамового сплава. Введение микроэлементов для регулирования фазового состояния, границ зерен и дефектности улучшает электропроводность, теплопроводность и механические свойства. Тип и содержание добавляемых элементов необходимо точно контролировать в соответствии с целевыми характеристиками, чтобы избежать негативных последствий.

Добавление никеля улучшает микроструктуру сплава серебра с вольфрамом. Небольшое количество никеля (обычно менее нескольких процентов) улучшает смачивающую способность фазы серебра, способствует спеканию жидкой фазы, заполняет поры и снижает плотность дефектов. Никель также улучшает межфазную связь, измельчает зерна и повышает твердость и вязкость, но чрезмерное количество может внести магнетизм и повлиять на проводимость. Наблюдения показывают, что интерфейс сплава, оптимизированного никелем, более плотный и подходит для применений, требующих высокой прочности. Добавление кобальта оптимизирует распределение фаз. Кобальт образует стабильный интерфейсный слой с серебром и вольфрамом, уменьшает микротрещины и улучшает эффекты упрочнения границ зерен. Кобальт также повышает однородность частиц вольфрама, уменьшает пористость и улучшает теплопроводность и коррозионную стойкость. Содержание необходимо контролировать на низком уровне, чтобы избежать чрезмерного упрочнения и снижения вязкости. Эксперименты показали, что сплавы с добавлением кобальта хорошо работают в условиях высоких температур и подходят для использования в сварочных электродах. Другие элементы, такие как молибден или хром, также могут оптимизировать микроструктуру. Молибден повышает стойкость вольфрама к окислению, уменьшает дефекты при термообработке и повышает коррозионную стойкость. Хром улучшает химическую стабильность серебряной фазы, снижает чувствительность к коррозии и оптимизирует распределение фаз. Количество добавляемого кобальта необходимо точно регулировать, чтобы избежать охрупчивания границ зерен или дисбаланса характеристик. Результаты показывают, что добавление микроэлементов измельчает зерна и повышает однородность микроструктуры.

Эффект легирующих элементов усиливается в процессе спекания. Высокотемпературная обработка способствует диффузии элементов, оптимизирует межфазные связи, а низкотемпературное старение стабилизирует фазовое состояние. Синергетический эффект добавленных элементов улучшает качество микроструктуры и подходит для конкретных условий применения. Направления оптимизации включают разработку новых комбинаций легирующих элементов или определение оптимального соотношения их добавления с помощью интеллектуального анализа. Добавление легирующих элементов напрямую способствует

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

улучшению характеристик серебряно-вольфрамовых сплавов за счет оптимизации микроструктуры.

3.4.3 Связь между регулированием микроструктуры и настройкой производительности

Существует тесная взаимосвязь между регулированием микроструктуры и настройкой характеристик. Корректировка морфологии зерен, фазового распределения и дефектов напрямую влияет на электропроводность, теплопроводность, твердость, коррозионную стойкость и ударную вязкость, отвечая требованиям различных вариантов применения. Эта корреляция обеспечивает гибкость при проектировании материалов, а оптимизация технологических процессов и добавление элементов являются ключом к достижению настраиваемости. Регулирование морфологии зерен влияет на механические свойства. Уменьшение размера зерен повышает твердость и прочность за счет упрочнения границ зерен, что подходит для высокоизносостойких контактов. Регулировка ориентации зерен снижает концентрацию напряжений и повышает ударную вязкость, что подходит для условий динамических нагрузок. Наблюдения показывают, что сплавы с наноразмерными зёрнами хорошо себя проявляют в противовесах для аэрокосмической промышленности. Оптимизация фазового распределения определяет электрические свойства. Непрерывность сети фаз серебра улучшает электропроводность и теплопроводность, что подходит для контактов высоковольтных выключателей. Равномерное распределение фаз вольфрама повышает структурную стабильность и балансирует высокотемпературные характеристики, что подходит для сварочных электродов. Функциональная градиентная конструкция добавляет фазы серебра в проводящую область для удовлетворения потребностей электроники в рассеивании тепла.

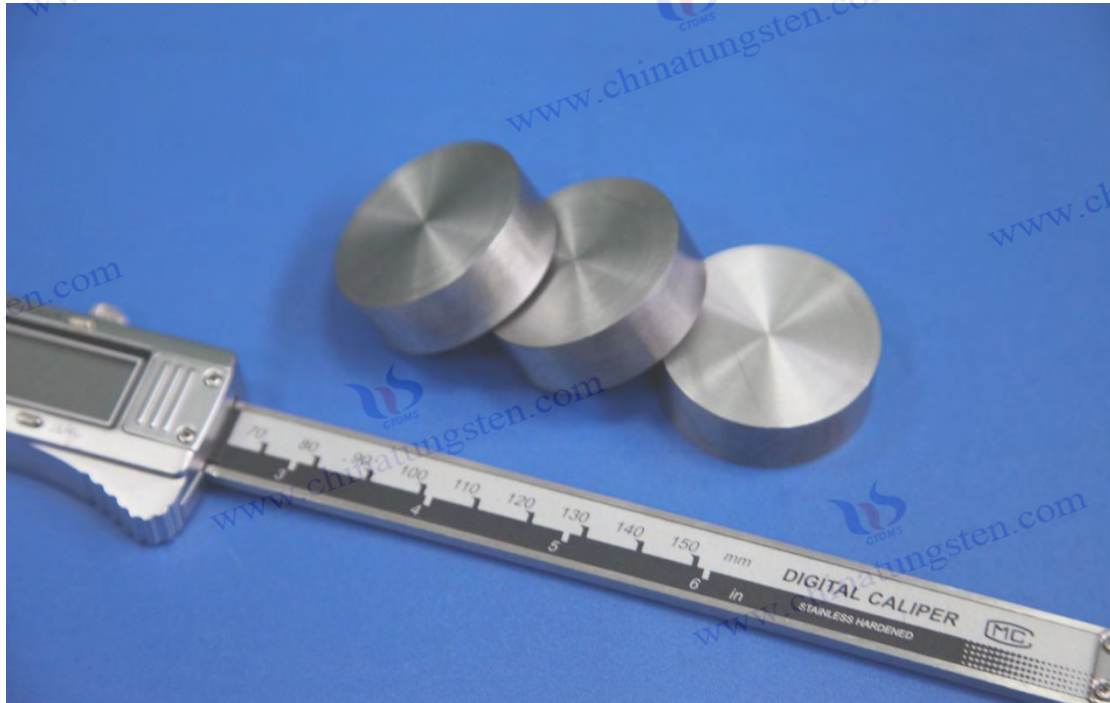
Контроль дефектов и пористости улучшает общие эксплуатационные характеристики. Уменьшение пористости повышает плотность, коррозионную стойкость и электропроводность, а также подходит для промышленного оборудования. Уменьшение количества микротрещин повышает усталостную прочность и отвечает требованиям к длительной эксплуатации. Оптимизация процесса, такая как сочетание ГИП и SPS, позволяет создавать конструкции с низким содержанием дефектов и высоконадежные компоненты, отвечающие требованиям заказчика.

Добавление легирующих элементов дополнительно расширяет возможности персонализации. Никель и кобальт измельчают границы зерен, повышают твердость и коррозионную стойкость, а также позволяют создавать износостойкие изделия. Молибден и хром оптимизируют стойкость к окислению, что позволяет использовать их в условиях высоких температур. Динамическая регулировка соотношений элементов позволяет адаптировать микроструктуру к условиям применения, и наблюдения показывают, что сплавы с индивидуальными свойствами превосходят материалы общего назначения по определенным свойствам.

Направления оптимизации включают разработку интеллектуальных инструментов проектирования для прогнозирования эффекта регулирования или проверки индивидуальных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

решений посредством многопараметрических экспериментов. Связь между регулированием микроструктуры и настройкой характеристик обеспечивает адаптивную поддержку серебряно-вольфрамовых сплавов для удовлетворения различных потребностей электротехнической, сварочной и аэрокосмической промышленности.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

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

Глава 4: Технология приготовления сплава серебра с вольфрамом

Процесс изготовления серебряно-вольфрамового сплава играет ключевую роль в его микроструктуре и эксплуатационных характеристиках. Порошковая металлургия – основная технология производства, позволяющая получать высокоэффективные сплавы благодаря точному контролю процессов обработки сырья, формования и спекания. Этот процесс сочетает высокую проводимость серебра и высокую твёрдость вольфрама, что позволяет использовать его в электрических контактах, сварочных электродах и компонентах аэрокосмической техники.

4.1 Производство сплава серебра с вольфрамом методом порошковой металлургии

Порошковая металлургия — эффективный и контролируемый метод получения серебряно-вольфрамового сплава путём смешивания, прессования и спекания порошков серебра и вольфрама. Этот метод позволяет в полной мере использовать низкую температуру плавления серебра и высокую температуру плавления вольфрама для формирования плотной структуры путём жидкофазного спекания. Процесс включает в себя подготовку порошка, смешивание, прессование и спекание, а также последующую термическую обработку и обработку поверхности для дальнейшей оптимизации характеристик. Порошковая металлургия подходит для массового производства, особенно там, где требуются высокая плотность и однородность.

4.1.1 Процесс приготовления порошка и основные моменты

Подготовка порошков – основа порошковой металлургии, которая включает получение, очистку и контроль размера частиц порошков серебра и вольфрама, что напрямую влияет на микроструктуру и свойства сплава. Процесс включает выбор сырья, дробление, просеивание и обработку поверхности, и каждый этап требует внимания к ключевым моментам.

При выборе сырья в первую очередь учитывается высокая чистота серебра и вольфрама, и используется высококачественный металлический порошок для снижения уровня примесей. Серебряный порошок обычно получают методом химического осаждения или атомизации, а вольфрамовый порошок получают из оксида вольфрама водородным восстановлением для обеспечения стабильности химического состава. Чем выше чистота, тем выше электропроводность и коррозионная стойкость полученного сплава.

Размер частиц порошка измельчается шаровой мельницей или воздушной мельницей. Вольфрамовый порошок необходимо измельчить до субмикронного или нанометрового уровня, а размер частиц серебряного порошка контролируется для последующего смешивания. Технология высокоэнергетической шаровой мельницы может повысить однородность, но следует избегать перегрева, так как это может привести к агломерации порошка. Контроль распределения размеров частиц является ключевым моментом. Слишком крупные частицы могут образовывать поры, а слишком мелкие частицы увеличивают поверхностную энергию и влияют на спекание. Просеивание обеспечивает постоянство размера частиц порошка. Стандартные сита

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

используются для удаления частиц большего или меньшего размера, что позволяет оптимизировать эффект смешивания. Однородность размера частиц напрямую влияет на распределение фаз. Мелкие частицы способствуют формированию плотной структуры, но для сжатия необходимо обеспечить баланс текучести. Обработка поверхности удаляет оксидные слои и загрязнения посредством химической очистки или нанесения покрытия, что улучшает прессуемость и спекаемость порошка. На поверхности серебряного порошка может образовываться оксид серебра, который необходимо обработать восстановителем; оксид с поверхности вольфрамового порошка удаляется кислотной промывкой. Обработанный порошок следует хранить в сухом месте, чтобы избежать впитывания влаги и окисления.

Ключевые моменты включают контроль чистоты порошка, размера частиц и состояния поверхности, а также использование современного оборудования, такого как плазменная шаровая мельница, для повышения эффективности. Оптимизация подготовки порошка закладывает основу для последующих процессов и напрямую связана с микроструктурным качеством сплава.

4.1.2 Принцип и работа процесса прессования

Процесс прессования является ключевым этапом для формирования смешанного серебряно-вольфрамового порошка в сырое тело. Он основан на принципе сжатия и уплотнения частиц порошка под давлением, что напрямую влияет на плотность сырого тела и последующий эффект спекания. Операция должна быть сосредоточена на контроле давления, конструкции пресс-формы и параметрах процесса, чтобы гарантировать качество формования. Принцип прессования основан на пластической деформации и скользянии частиц порошка под внешним давлением, что заполняет молекулярные промежутки и уменьшает пористость. Серебряный порошок легко прессуется из-за его хорошей пластичности, в то время как вольфрамовый порошок требует более высокого давления из-за его высокой твердости. Смешанный порошок подвергается воздействию силы в пресс-форме, частицы перестраиваются, и начальная плотность постепенно улучшается. Равномерность распределения давления является ядром. Локальное избыточное давление может привести к образованию трещин, в то время как недостаточное давление сохраняет больше пор.

Технологический процесс включает заполнение формы порошком, предварительное прессование и основное прессование. При заполнении формы порошком необходимо следить за его равномерным распределением во избежание расслоения и образования пустот. Вибрация или постукивание способствуют равномерному распределению. При предварительном прессовании используется низкое давление для удаления воздуха и улучшения контакта частиц. Для основного прессования используется гидравлический или механический пресс. Давление регулируется в зависимости от состава сплава. При высоком содержании вольфрама его необходимо увеличить. Типичное значение составляет сотни МПа. Время прессования регулируется от нескольких до десятков секунд. Слишком большое время может привести к упругому отскоку.

Конструкция пресс-формы — ключ к успеху. Используйте износостойкие материалы, такие как твердый сплав, для изготовления пресс-форм с гладкими внутренними стенками, что снижает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

трение. Форма пресс-формы подбирается в соответствии с требованиями к готовой детали, а сложные формы необходимо прессовать по частям. Смазочные материалы, такие как стеарат цинка, наносятся на внутреннюю стенку пресс-формы для снижения трения, повышения плотности заготовки и улучшения её извлекаемости.

Оптимизация параметров процесса включает в себя градиент давления, скорость прессования и температуру. Постепенное повышение давления снижает концентрацию напряжений, медленное прессование повышает плотность, а умеренный нагрев улучшает текучесть порошка. Наблюдения показывают, что сырец, полученный в результате оптимизированного процесса прессования, имеет меньшую пористость и улучшенную плоскостность поверхности, что создает хорошую основу для спекания. Направления оптимизации включают разработку интеллектуальной системы прессования для контроля давления в режиме реального времени и использование технологии изостатического прессования для повышения равномерности. Принцип и технология прессования позволяют получать высококачественные заготовки благодаря точному управлению, что напрямую влияет на эксплуатационные характеристики серебряно-вольфрамового сплава.

4.1.3 Контроль и влияние процесса спекания

Процесс спекания является ключевым этапом в производстве серебряно-вольфрамового сплава методом порошковой металлургии. Связывание и уплотнение частиц порошка достигается высокотемпературной обработкой, которая напрямую влияет на микроструктуру и эксплуатационные характеристики. Ключевую роль играет контроль температуры, времени и атмосферы спекания, а оптимизация параметров процесса тесно связана с пористостью, фазовым распределением и механическими свойствами сплава.

Процесс спекания основан на принципе жидкофазного спекания. Серебро плавится при высокой температуре, смачивает частицы вольфрама, заполняет зазоры и повышает прочность связи между ними. Ключевым моментом является контроль температуры. При слишком низкой температуре серебро не может полностью расплавиться, и пористость увеличивается; при слишком высокой температуре частицы вольфрама могут укрупняться, а серебро может улетучиваться, что влияет на однородность. Типичная температура спекания регулируется в зависимости от соотношения серебра к вольфраму, которое обычно немного выше температуры плавления серебра, и поддерживается в течение определённого времени для ускорения диффузии. Контроль времени влияет на рост и уплотнение зерен. Кратковременное спекание ограничивает рост зерен и сохраняет мелкодисперсную структуру, но может привести к образованию пор; длительное спекание способствует склеиванию частиц и уменьшает количество дефектов, но может привести к аномальному росту. Оптимизация времени требует баланса между плотностью и размером зерна. Наблюдения показывают, что среднесрочное спекание позволяет достичь наилучшей микроструктуры.

Контроль атмосферы предотвращает окисление и попадание примесей. Вакуум или высокочистая цианидная среда снижают поверхностное окисление серебра и вольфрама и поддерживают их

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чистоту. Инертная атмосфера, такая как аргон, также эффективна для предотвращения влияния химических реакций на распределение фаз. Стабильность атмосферы спекания напрямую влияет на проводимость и коррозионную стойкость, поэтому контроль чистоты атмосферы является важным этапом.

Влияние процесса спекания отражается на микроструктуре. Правильный выбор параметров формирует плотную структуру, снижает пористость, повышает твердость и проводимость; неправильный выбор параметров может привести к образованию микротрещин или неравномерному распределению фаз, что снижает эксплуатационные характеристики. Горячее изостатическое прессование (ГИП) или электроискровое плазменное спекание (ИПС) используются в качестве вспомогательных методов для дальнейшей оптимизации эффекта спекания. ГИП ускоряет диффузию посредством импульсного тока, а ГИП сжимает дефекты посредством высокого давления. Направления оптимизации включают разработку интеллектуальных печей для спекания, позволяющих контролировать температуру и атмосферу в режиме реального времени, или комбинирование многоэтапного спекания для повышения точности управления. Контроль и влияние процесса спекания напрямую формируют эксплуатационные характеристики серебряно-вольфрамового сплава посредством оптимизации параметров.

4.2 Получение сплава серебра с вольфрамом методом вакуумной инфильтрации

Плавка серебра в вакууме и его инфильтрация в пористый вольфрамовый каркас. Этот метод подходит для изготовления деталей сложной формы или высокопроизводительных компонентов, особенно в областях, где требуется высокая проводимость и высокая термостойкость. Процесс включает в себя подготовку вольфрамового каркаса, инфильтрацию и постобработку, а точный контроль оборудования и параметров является залогом успеха.

4.2.1 Принцип инфильтрации и требования к оборудованию

Принцип инфильтрации основан на капиллярном эффекте и проникновении жидкого металла в вакууме. Пористый вольфрамовый каркас пропитывается расплавленным серебром, образуя плотный сплав. Серебро переходит в жидкое состояние при высокой температуре, снижает окисление в условиях вакуума и, используя капиллярные силы, проникает в поры вольфрамового каркаса, заполняет пустоты и соединяется с вольфрамом.

Капиллярное действие является ключевым механизмом, а размер и распределение пор вольфрамового скелета определяют эффективность проникновения. Смачиваемость серебряной жидкости напрямую влияет на глубину проникновения, а поверхностное натяжение должно соответствовать характеристикам пор. Вакуумная среда уменьшает газовые препятствия, предотвращает окисление и улетучивание серебра и обеспечивает чистое проникновение. Требования к оборудованию включают вакуумную печь, систему нагрева и устройство контроля давления. Вакуумная печь должна обеспечивать высокий уровень вакуума,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

чтобы предотвратить влияние остаточного газа на проплавление, и быть оснащена точным датчиком давления. Система нагрева использует индукционный или резистивный нагрев с высокой однородностью температуры и диапазоном регулирования, охватывающим температуру выше точки плавления серебра. Устройство контроля давления способствует проплавлению и регулирует внешнее давление для улучшения потока жидкого серебра.

Конструкция пресс-формы позволяет формировать изделия сложной формы, изготовлена из термостойких материалов, таких как графит или керамика, и имеет гладкую внутреннюю стенку для снижения адгезии. Система контроля температуры и вакуума корректирует параметры в режиме реального времени, обеспечивая стабильное проникновение. Техническое обслуживание оборудования имеет ключевое значение, поэтому для предотвращения утечек и снижения производительности необходимы регулярные проверки уплотнительных и нагревательных элементов.

4.2.2 Этапы процесса и оптимизация параметров

Технологические этапы вакуумной инфильтрации включают подготовку вольфрамового каркаса, плавку серебра и последующую инфильтрационную обработку. Для достижения наилучшей микроструктуры и производительности необходимо оптимизировать параметры на каждом этапе. Вольфрамовый каркас изготавливается прессованием порошка и спеканием для формирования пористой структуры. После смешивания вольфрамовый порошок прессуется в форму. Температура спекания ниже температуры плавления серебра для поддержания умеренной пористости. Размер и распределение пор должны быть равномерными. Слишком большие поры могут привести к недостаточному проникновению серебра, а слишком маленькие – к его затруднению. Наблюдения показывают, что вольфрамовый каркас, прошедший оптимизированное спекание, обладает наилучшей проникающей способностью.

Плавка серебра осуществляется в вакуумной печи. Серебро помещают над вольфрамовым каркасом и нагревают выше температуры плавления до образования жидкого серебра. Контроль температуры необходим для предотвращения перегрева, который может привести к улетучиванию серебра или деформации вольфрамового каркаса. Степень вакуума поддерживается на высоком уровне для уменьшения количества окисленных примесей и улучшения смачиваемости. Время плавления регулируется в зависимости от толщины каркаса для обеспечения полного разжижения. Процесс проникновения основан на капиллярной силе и вспомогательном давлении. Жидкое серебро проникает в вольфрамовый каркас в условиях вакуума, и время и давление должны быть согласованы. Слишком короткое время может привести к образованию пор, а слишком длинное приведет к переливу серебра. Вспомогательное давление увеличивает глубину проникновения, а избыток серебра удаляется перед оптимизацией постобработки. Наблюдения показывают, что слой проникновения после оптимизации параметров получается однородным и плотным.

Постобработка включает охлаждение и термическую обработку. Медленное охлаждение снижает термические напряжения, а термическая обработка, такая как отжиг, улучшает сцепление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

интерфейсов и повышает стабильность характеристик. Оптимизацию параметров необходимо корректировать в соответствии с требованиями к компонентам, а для сложных форм может потребоваться сегментированная инфильтрация.

4.2.3 Преимущества и ограничения этого процесса

Метод вакуумной инфильтрации демонстрирует уникальные преимущества в производстве сплавов серебра с вольфрамом, но он также имеет определенные ограничения, которые напрямую влияют на сценарии его применения и направления оптимизации процесса. Преимущество заключается в том, что он может достигать высокой плотности. Серебряная жидкость полностью проникает в вольфрамовый скелет в условиях вакуума, уменьшая пористость и улучшая электро- и теплопроводность сплава. Он особенно подходит для контактов и электродов, требующих однородных характеристик. Изготовление деталей сложной формы является еще одним преимуществом. Метод инфильтрации адаптируется к пористым структурам за счет капиллярного эффекта и легко формует прецизионные детали, такие как противовесы для аэрокосмической промышленности или электронные разъемы. Вакуумная среда также снижает содержание окислительных примесей, сохраняет чистоту серебра и вольфрама, а также улучшает коррозионную стойкость и долговременную стабильность.

Ограничения в основном отражаются в сложности процесса и высокой стоимости. Требования к обслуживанию вакуумной печи и нагревательного оборудования высоки, а первоначальные инвестиции и эксплуатационные расходы увеличиваются, что ограничивает возможности крупномасштабного производства. Пористость вольфрамового каркаса и глубина проникновения серебра должны быть точно согласованы, контроль параметров затруднен, а интенсивность отказов может быть высокой. Испарение или перелив серебра при высоких температурах может привести к отходам материала и повлиять на экономику. Кроме того, метод инфильтрации расплава предъявляет строгие требования к чистоте и размеру частиц сырья, а процесс приготовления пористых вольфрамовых каркасов сложен, что увеличивает сложность эксплуатации. Микроструктурные наблюдения показывают, что недостаточная оптимизация может привести к неровным интерфейсам и повлиять на стабильность производительности.

4.3 Сравнение процессов и основа выбора

Процессы получения серебряно-вольфрамового сплава включают порошковую металлургию и вакуумную инфильтрацию. Каждый метод отличается по производительности, стоимости и применимости. Выбор процесса должен быть тщательно продуман с учетом требований к применению и условий производства.

4.3.1 Анализ затрат различных процессов

Стоимость является важным фактором при выборе процесса. Разница в стоимости между порошковой металлургией и вакуумной инфильтрацией в основном отражается в инвестициях в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оборудование, расходе сырья и эффективности производства, что напрямую влияет на его экономичность. Анализ затрат необходимо проводить в сочетании с требованиями к серийному производству и качеству.

Стоимость оборудования для порошковой металлургии относительно невысока. Порошковый пресс и спекательная печь – это базовое оборудование с простой конструкцией и низкими затратами на обслуживание, подходящее для массового производства. В качестве сырья используются в основном серебряный и вольфрамовый порошки. Коэффициент использования материала при смешивании и прессовании порошков высок, а отходы незначительны. Эффективность производства высокая, степень автоматизации может быть повышена за счет использования сборочной линии, а себестоимость единицы продукции снижается с ростом производительности. Наблюдения показывают, что себестоимость мелкосерийного производства умеренная, а себестоимость крупносерийного производства значительно снижается, что подходит для стандартизированных деталей, таких как контакты и электроды.

Стоимость оборудования для метода вакуумной инфильтрации относительно высока. Вакуумная печь, система индукционного нагрева и устройство контроля давления требуют прецизионного изготовления, а первоначальные инвестиции и затраты на техническое обслуживание велики, что ограничивает мелко- и среднесерийное производство. Расход сырья включает вольфрамовый порошок для изготовления пористых каркасов и серебро. Процессы спекания каркасов и плавки серебра могут привести к потерям материала, а эффективность ниже, чем у порошковой металлургии. Эффективность производства ограничена сложностью процесса, настройка параметров и контроль качества увеличивают трудозатраты, а себестоимость единицы продукции относительно высока. Наблюдения показывают, что себестоимость производства высокопроизводительных или сложных по форме деталей приемлема, но для крупномасштабного применения экономии недостаточно.

Трудозатраты и энергопотребление также влияют на общую стоимость. Порошковая металлургия отличается стандартизированным технологическим процессом и низкой трудоемкостью. Энергопотребление в основном сосредоточено на этапе спекания, который можно снизить за счет оптимизации температуры. Вакуумная инфильтрация требует профессиональных операторов, а длительный процесс вакуумирования и нагрева потребляет много энергии, что требует эффективного управления энергоресурсами. Анализ затрат показывает, что порошковая металлургия обладает рядом преимуществ в плане контроля затрат и подходит для производства изделий с высокой производительностью; вакуумная инфильтрация более конкурентоспособна при производстве компонентов с высокой добавленной стоимостью.

Направления оптимизации включают разработку недорогого вакуумного оборудования или повышение эффективности порошковой металлургии за счёт интеграции процессов. Анализ затрат даёт количественную основу для выбора процесса, который необходимо оценивать с учётом масштаба производства и требований к производительности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.2 Различия в производительности и выбор процесса

Различия в эксплуатационных характеристиках являются важным фактором при выборе метода порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Эти два процесса обладают различными характеристиками проводимости, теплопроводности, твёрдости, коррозионной стойкости и микроструктурной однородности, что напрямую влияет на варианты применения.

Сплав серебра и вольфрама, полученный методом порошковой металлургии, обладает стабильной электро- и теплопроводностью. Сереброобразная фаза образует непрерывную сеть при спекании в жидкой фазе, обеспечивая высокую эффективность передачи тока и тепла, что делает его пригодным для использования в контактах высоковольтных выключателей и в качестве теплоотводящих подложек. Высокая твёрдость достигается за счёт равномерного распределения и плотности частиц вольфрама, а износостойкость соответствует требованиям, предъявляемым к сварочным электродам. Коррозионная стойкость зависит от контроля атмосферы спекания и после оптимизации демонстрирует хорошие эксплуатационные характеристики во влажной среде. Стабильность микроструктуры зависит от равномерности смешивания и прессования порошка. Соответствующие процессы позволяют снизить количество дефектов и подходят для крупносерийного стандартизированного производства.

Сплав, полученный методом вакуумной инфильтрации, обладает рядом преимуществ в эксплуатационных характеристиках. Жидкое серебро пропитывает вольфрамовый каркас, образуя высокоплотную структуру с чрезвычайно низкой пористостью. Электро- и теплопроводность выше, чем у порошковой металлургии, что особенно подходит для высокоточных электронных разъемов. Твёрдость выше благодаря повышенной плотности и прочности связи интерфейса, а износостойкость и дугостойкость превосходны, что подходит для деталей, напыленных плазмой. Коррозионная стойкость повышается благодаря снижению окисления в вакууме, а срок службы в коррозионных средах увеличивается. Превосходная микроструктурная стабильность и лучшая однородность деталей сложной формы подходят для противовесов в аэрокосмической отрасли.

Разница в производительности обусловлена механизмом процесса. Порошковая металлургия основана на однородности параметров смешивания и спекания порошков, её производительность стабильна, но пространство оптимизации ограничено. Метод вакуумной инфильтрации обеспечивает высокую плотность за счёт капиллярного проникновения и обладает большим потенциалом производительности, но чувствителен к параметрам. Наблюдения показывают, что порошковая металлургия подходит для общих применений, требующих баланса стоимости и производительности, в то время как инфильтрация подходит для высокопроизводительных или индивидуальных задач.

4.3.3 Эффективность производства и адаптация процесса

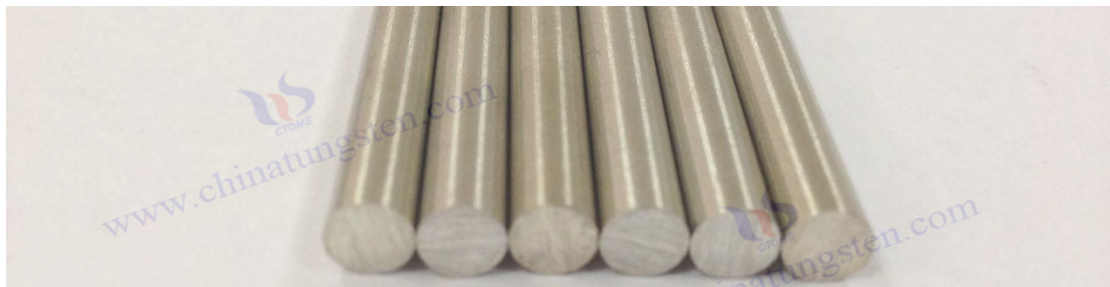
Эффективность производства и адаптация процесса являются важными факторами при выборе. Порошковая металлургия и вакуумная инфильтрация различаются по производительности,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

степени автоматизации и использованию оборудования, что напрямую влияет на производственный цикл и экономические преимущества.

Порошковая металлургия отличается высокой эффективностью производства. Процессы смешивания, прессования и спекания порошков могут быть автоматизированы, а конвейерное производство позволяет увеличить производительность, что подходит для массового производства контактов и электродов. Коэффициент использования оборудования высок, а порошковый пресс и спекательная печь могут работать непрерывно с короткими простоями для технического обслуживания. Производственный цикл короткий, обычно несколько часов от сырья до готовой продукции, что подходит для сценариев, требующих быстрого реагирования на рыночный спрос. Процесс отличается высокой адаптивностью, а стандартные формы и параметры подходят для различных спецификаций, обеспечивая высокую гибкость. Метод вакуумной инфильтрации обладает низкой эффективностью производства. Подготовка и инфильтрация вольфрамового каркаса требуют точного контроля, степень автоматизации ограничена, а производительность подходит для небольших и средних партий деталей с высокой добавленной стоимостью, таких как авиационные противовесы. Сложность вакуумной печи влияет на загрузку оборудования, а техническое обслуживание и настройка параметров увеличивают время простоя. Производственный цикл длительный, и общее время подготовки и инфильтрации каркаса может составлять несколько дней, что подходит для индивидуальных заказов или задач с высокой производительностью. Адаптируемость процесса зависит от конструкции пресс-формы и каркаса, а для сложных форм требуется специальное оборудование, что ограничивает гибкость.

Разница в эффективности обусловлена сложностью процесса. Процесс порошковой металлургии стандартизирован и подходит для высокой производительности; метод вакуумной инфильтрации отличается высокой точностью и соответствует высоким требованиям к качеству. Наблюдения показывают, что метод порошковой металлургии обладает очевидными преимуществами в плане эффективности при массовом производстве, а метод инфильтрации более адаптируем в мелкосерийном высокоточном производстве. Направления оптимизации включают разработку автоматизированного оборудования для инфильтрации или оптимизацию параметров порошковой металлургии для сокращения цикла. Эффективность производства и адаптация процесса обеспечивают практическую основу для выбора, который необходимо взвешивать в соответствии с производственными целями и требованиями к качеству.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

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
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

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

Глава 5: Эксплуатационные испытания и характеристика сплава серебра и вольфрама

Испытания и характеристика серебряно-вольфрамового сплава являются ключевым этапом оценки его качества и потенциала применения. Систематическое тестирование физических, механических и функциональных свойств позволяет определить такие характеристики сплава, как электропроводность, теплопроводность, твёрдость и коррозионная стойкость. Для обеспечения надёжности и сопоставимости данных метод испытаний должен соответствовать международным стандартам и условиям эксперимента.

5.1 Испытание физических свойств серебряно-вольфрамового сплава

Испытание физических свойств серебряно-вольфрамового сплава фокусируется на основных характеристиках, таких как плотность, твёрдость и электропроводность. Эти показатели напрямую отражают микроструктуру и процесс изготовления сплава. Точное измерение физических свойств обеспечивает основу для последующих механических и функциональных испытаний. Метод испытания должен быть оптимизирован в соответствии с характеристиками сплава.

5.1.1 Метод определения плотности

Измерение плотности является важным методом оценки плотности и пористости серебряно-вольфрамовых сплавов, отражая распределение серебра и вольфрама в материале и качество спекания. Плотность напрямую влияет на электропроводность, теплопроводность и механическую прочность, поэтому метод испытания должен обеспечивать точность и повторяемость.

Метод Архимеда — распространённый метод определения плотности. Образец сначала взвешивают в сухом состоянии для определения сухого веса. Затем его погружают в жидкость с известной плотностью (например, в дистиллированную воду) для измерения веса взвешенного и погружённого образца. Плотность рассчитывается по формуле: $\text{Плотность} = \frac{\text{сухой вес}}{(\text{сухой вес} - \text{погружённый вес})} \times \text{плотность жидкости}$. В жидкости не должно быть пузырьков, а на поверхности образца не должно быть пор, влияющих на результаты измерений. Для обеспечения стабильности результатов несколько испытаний усредняются.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) используется в качестве вспомогательного метода для косвенной оценки постоянства плотности, сочетая микроскопический анализ с определением распределения фаз. Образец разрезают на тонкие срезы и помещают в рентгеновский аппарат для измерения соотношения содержания серебра и вольфрама, после чего фактическая плотность рассчитывается на основе теоретической. Этот метод подходит для деталей сложной формы, и для снижения погрешности требуется калибровка прибора. Ключевые этапы испытания включают предварительную обработку образцов, удаление поверхностных оксидных слоёв и загрязнений, а также предотвращение влагопоглощения, влияющего на результаты. Для снижения внешнего

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

воздействия необходимо поддерживать постоянную температуру и влажность в испытательной среде. Наблюдения показывают, что плотность сплава, полученного в результате оптимизированного процесса спекания, близка к теоретическому значению, обладает низкой пористостью и превосходными характеристиками. Точность метода определения плотности обеспечивает надёжные данные для оценки характеристик, а направление оптимизации включает разработку технологии бесконтактного измерения для повышения эффективности.

5.1.2 Стандарты и операции испытания на твердость

Испытание на твёрдость является важным методом оценки сопротивления деформации и износостойкости серебряно-вольфрамового сплава, отражая синергетический эффект частиц вольфрама и фазы серебра. Твёрдость влияет на срок службы сплава при механическом контакте и в условиях дуги. Испытание должно соответствовать международным стандартам и стандартизировать процесс.

Испытание твердости по Виккерсу — это общепринятый стандарт, соответствующий спецификациям ISO 6507 или ASTM E384. При испытании используется алмазный индентор, который вдавливается в поверхность образца под заданной нагрузкой, удерживается в течение определенного периода времени, а затем удаляется для измерения длины диагонали отпечатка. Значение твердости рассчитывается по формуле: $HV = 1,854 \times \text{нагрузка} / (\text{длина диагонали}^2)$. Нагрузка выбирается в соответствии с толщиной образца, обычно 5 кг или 10 кг, а время контролируется в пределах 10-15 секунд. Этапы операции включают подготовку образца, полировку поверхности до зеркального блеска и удаление царапин и дефектов. Тестовые точки выбираются на однородной области, чтобы избежать влияния пор или границ раздела фаз на результаты. Для каждого испытания несколько точек измеряются повторно, и для уменьшения ошибок вычисляется среднее значение. Оборудование необходимо регулярно калибровать для обеспечения точности индентора и нагрузки.

Испытание на твёрдость по Бринеллю — это дополнительный метод, соответствующий стандарту ISO 6506, с использованием стального шарикового индентора, подходящий для более крупных образцов. Чем выше нагрузка, тем больше отпечаток, отражающий общую твёрдость, но при этом предъявляются более высокие требования к плоскостности поверхности. Результат испытания связан с твёрдостью по Виккерсу и должен выбираться в соответствии с требованиями к применению.

Ключевые моменты испытания включают в себя подбор нагрузки и времени. Слишком высокая нагрузка может привести к проникновению в образец, а слишком короткое время может повлиять на образование вмятины. Температура и влажность окружающей среды должны быть стабильными, чтобы не повлиять на свойства материала. Наблюдения показывают, что твёрдость сплава с оптимизированной микроструктурой значительно повышается, а износостойкость — увеличивается. Стандарты и процедуры испытаний на твёрдость обеспечивают количественную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

основу для оценки эксплуатационных характеристик. Направления оптимизации включают разработку автоматизированной системы испытаний для повышения эффективности.

5.1.3 Методы испытаний на электропроводность и теплопроводность

Испытания на электропроводность и теплопроводность являются ключевыми методами оценки электро- и теплопроводности серебряно-вольфрамовых сплавов, отражая непрерывность фазовой сетки серебра и плотность микроструктуры. Электропроводность измеряет эффективность передачи тока, а теплопроводность – теплопроводность. Метод испытания должен обеспечивать точность и повторяемость. Для испытания на электропроводность используется четырёхэлектродный метод, соответствующий стандарту ASTM F76. Поверхность образца плоская и помещена в испытательное приспособление. Четыре электрода соприкасаются друг с другом на равных расстояниях. Подаётся постоянный ток, и измеряется падение напряжения. Электропроводность рассчитывается по формуле: $\sigma = L / (R \times A)$, где L — расстояние между электродами, R — сопротивление, A — площадь поперечного сечения. Точки измерения выбираются на однородной площади, чтобы исключить влияние пор. Необходимо откалибровать оборудование, поддерживать стабильную температуру окружающей среды и вычислять среднее значение после нескольких измерений.

Для испытания теплопроводности используется метод лазерной вспышки согласно ASTM E1461. Образец разрезают на тонкие пластины, поверхность чернят для поглощения лазерного излучения, лазерный импульс нагревает одну сторону, а инфракрасный детектор измеряет кривую повышения температуры на другой стороне. Теплопроводность рассчитывается через температуропроводность, удельную теплоёмкость и плотность: $\lambda = \alpha \times \rho \times C_p$, где α — температуропроводность, ρ — плотность, C_p — удельная теплоёмкость. Для снижения влияния теплопотерь необходимо контролировать толщину образца и энергию лазера.

Ключевые этапы испытания включают предварительную обработку образца, удаление поверхностного оксидного слоя и обеспечение хорошего контакта. Испытание на проводимость требует экранирования от электромагнитных помех, а испытание на теплопроводность – калибровки точности детектора. Наблюдения показывают, что оптимизированный спеченный сплав обладает более высокими показателями проводимости и теплопроводности, причем ключевым фактором является плотность микроструктуры. Направления оптимизации включают разработку технологии неразрушающего контроля или комбинирование нескольких методов для повышения точности измерений.

5.2 Оценка химических свойств сплава серебра с вольфрамом

Оценка химических свойств сплава серебра и вольфрама фокусируется на коррозионной стойкости и химической стабильности, отражающих возможность долгосрочного использования сплава в различных средах. Испытания химических свойств должны имитировать реальные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

условия эксплуатации, оценивать коррозионную стойкость серебряной и вольфрамовой фаз и предоставлять достоверные данные для применения.

5.2.1 Условия и методы испытаний на коррозионную стойкость

Испытание на коррозионную стойкость оценивает химическую стабильность сплава серебра и вольфрама, моделируя различные среды. Среда и метод испытания должны быть разработаны в соответствии со сценарием применения, чтобы обеспечить репрезентативность результатов. Коррозионная стойкость отражает способность сплава противостоять окислению, сульфидированию или кислотно-щелочной коррозии, которые напрямую влияют на срок службы. Испытание в соляном тумане является распространенной средой и соответствует стандарту ASTM B117. Образец помещают в камеру соляного тумана и опрыскивают 5% раствором хлорида натрия. Температура контролируется в определенном диапазоне от нескольких часов до нескольких дней. Наблюдайте за продуктами коррозии на поверхности, такими как оксиды или сульфиды серебра, и оцените глубину и площадь эрозии. Испытание регистрирует скорость потери веса и изменения внешнего вида, а многократные циклы имитируют долгосрочное воздействие.

Испытание на кислотнo-щелочное погружение имитирует коррозионную промышленную среду. Образец погружается в серную кислоту, соляную кислоту или раствор гидроксида натрия. Концентрация и температура устанавливаются в соответствии с реальными потребностями. Время погружения варьируется от нескольких часов до нескольких недель. Образец регулярно извлекается для измерения потери массы и морфологии поверхности, а также для анализа растворения серебряной фазы и стабильности вольфрамовой фазы. Раствор необходимо регулярно менять для поддержания химической активности. Электрохимические испытания оценивают механизмы коррозии согласно ASTM G59. Образец помещается в электролитическую ячейку в качестве рабочего электрода, к нему прикладываются различные потенциалы, и снимаются поляризационные кривые.

Испытательная среда должна имитировать реальные условия эксплуатации, такие как влажная среда, среда с высоким содержанием серы или среда с высокой температурой. Предварительная обработка образцов включает полировку и очистку для удаления поверхностных загрязнений. Наблюдения показывают, что сплавы с оптимизированной микроструктурой обладают повышенной коррозионной стойкостью в соляном тумане и кислотных средах, причём ключевую роль здесь играет низкая пористость.

5.2.2 Методы испытаний антиоксидантной активности

Испытание на стойкость к окислению оценивает стойкость сплава серебра и вольфрама к окислению в условиях высоких температур или в кислородсодержащей среде, отражая химическую стабильность серебряной и вольфрамовой фаз. Метод испытания должен имитировать реальные условия эксплуатации, измерять образование оксидного слоя и изменение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

свойств материала, а также обеспечивать количественную основу для оценки стойкости к окислению.

Испытание на высокотемпературное окисление является распространённым методом. Образец помещают в муфельную печь, нагревают до определённой температуры и выдерживают на воздухе от нескольких часов до нескольких дней. Температура устанавливается в зависимости от условий применения, обычно выше температуры плавления серебра, но ниже температуры плавления вольфрама. В ходе испытания регистрируется прирост массы и наблюдается толщина и изменение цвета поверхностного оксидного слоя, например, оксида серебра для серебра или оксида вольфрама. Многократные циклы имитируют долговременное окисление и оценивают снижение эксплуатационных характеристик.

Термогравиметрический анализ (ТГА) обеспечивает динамическое детектирование. Образец нагревается на термовесах от комнатной температуры до высокой, и регистрируется кривая изменения массы во времени. В качестве газа-носителя для измерения скорости реакции окисления и стабильной температуры используется кислород или воздух. Результаты анализа позволяют определить начальную точку окисления фазы серебра и антиоксидантную способность фазы вольфрама. Прибор необходимо калибровать для предотвращения теплового дрейфа. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) используется в качестве вспомогательного метода для определения теплового эффекта реакций окисления. Образцы испытываются в инертной и окислительной атмосфере, а эндотермические и экзотермические пики сравниваются для определения критической температуры реакции окисления. Этот метод подходит для анализа следовых количеств окисления и требует верификации в сочетании с данными термогравиметрического анализа (ТГА).

5.3 Технология определения микроструктуры сплава серебра и вольфрама

Технология характеристики микроструктуры сплава серебра с вольфрамом позволяет определить морфологию зерен, распределение фаз и характеристики дефектов с помощью различных аналитических методов, обеспечивая микроскопическую основу для оптимизации производительности. Для обеспечения точности и повторяемости результатов технология характеристики должна сочетаться с подготовкой образцов и условиями работы прибора.

5.3.1 Метод наблюдения с помощью металлографического микроскопа

Метод наблюдения с помощью металлографического микроскопа является основным средством для изучения микроструктуры сплава серебра и вольфрама. Размер зерна, распределение фаз и характеристики пор выявляются путем подготовки образцов и микроскопического анализа. Этот метод подходит для предварительной структурной оценки и сочетается с методами коррозии и освещения для усиления контраста. Подготовка образцов является ключевым этапом. Возьмите представительный образец, разрежьте его на подходящие размеры, отшлифуйте поверхность до плоской и постепенно доведите ее до состояния крупной сетки с помощью наждачной бумаги.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Полировка использует алмазную суспензию или оксид алюминия для получения зеркального эффекта. Обработка коррозией использует химические реагенты, такие как спиртовой раствор азотной кислоты, для выявления границы между фазой серебра и фазой вольфрама. Время коррозии контролируется, чтобы избежать чрезмерного травления и повлиять на четкость микроструктуры.

Наблюдение проводилось с помощью оптического микроскопа с увеличением от 50х до 1000х, в зависимости от структурных особенностей. Освещение в светлом поле выявило морфологию зерен, в то время как освещение в темном поле или поляризованном свете усилило контраст на границе фаз. Частицы вольфрама выглядели темными, фазы серебра – яркими, а поры – черными полостями. Для анализа размера и равномерности распределения зерен были получены многозональные изображения.

Ключевые моменты теста включают очистку образца для предотвращения загрязнения объектива микроскопа. Для оптимизации качества изображения необходимо отрегулировать интенсивность и фокус освещения. Наблюдения показывают, что оптимизированный спеченный сплав имеет четкие границы зерен, низкую пористость и однородную микроструктуру. Метод подходит для экспресс-оценки и должен сочетаться с СЭМ для уточнения деталей.

5.3.2 Применение анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа

Анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) является эффективным методом изучения микроструктуры сплава серебра с вольфрамом. Изображения формируются посредством взаимодействия электронного пучка с образцом, выявляя морфологию зерен, распределение фаз и детали дефектов. СЭМ подходит для наблюдения с высоким разрешением и в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС) позволяет получить информацию о распределении элементов.

Подготовка образца включает резку, шлифовку и полировку для получения ровной поверхности. Золотое или углеродное покрытие улучшает проводимость и предотвращает эффект зарядки электронного пучка. Образец помещается в камеру образца СЭМ, а вакуумная среда поддерживает стабильность электронного пучка. Ускоряющее напряжение обычно устанавливается в диапазоне 5–20 кВ, а рабочее расстояние регулируется в зависимости от увеличения.

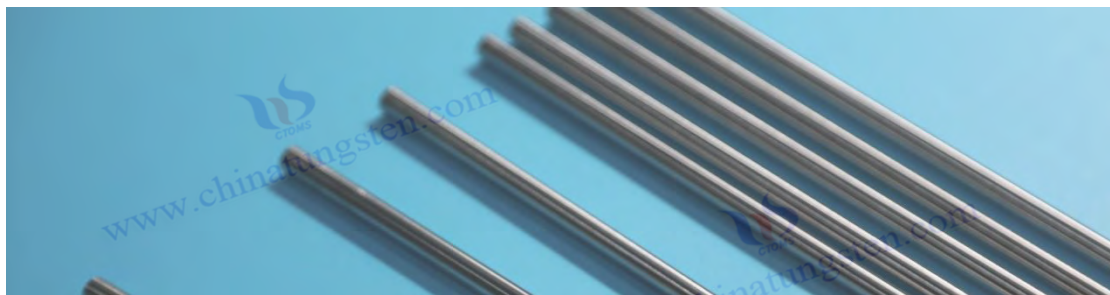
Обратите внимание на размер и морфологию зерен. Частицы вольфрама имеют полигональную или сферическую форму, а распределение фазы серебра – сетчатое или агрегатное. Увеличение варьируется от сотен до десятков тысяч раз, выявляя микроскопические поры и микротрещины. Анализ методом ЭДС определяет соотношение содержания серебра и вольфрама и идентифицирует примеси или оксиды на границе раздела. Изображения во вторичных электронах подчёркивают морфологию поверхности, а изображения в отражённых электронах усиливают контрастность границ раздела фаз.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ключевые моменты испытания включают согласование напряжения и тока. Слишком высокое напряжение может повредить образец. Образец должен быть чистым, чтобы избежать загрязнения. Сбор данных требует многоточечных измерений для обеспечения репрезентативности. Наблюдения показывают, что оптимизированный спеченный сплав обладает низкой пористостью, хорошим сцеплением с поверхностью раздела, а EDS подтверждает равномерное распределение фаз. Области применения включают анализ дефектов и исследование фазового состояния, а направления оптимизации включают разработку экологического растрового электронного микроскопа (SEM) для улучшения возможностей динамического наблюдения.

5.3.3 Структурный анализ методом рентгеновской дифракции

Рентгеновская дифракция (XRD) является важным методом анализа кристаллической структуры и фазового состава сплава серебра и вольфрама. Она генерирует дифракционные картины посредством взаимодействия рентгеновских лучей с решеткой образца, выявляя кристаллическую фазу, ориентацию зерен и напряженное состояние. XRD подходит для количественного анализа микроструктурных свойств. Подготовка образца должна быть измельчена в порошок или плоские блоки с гладкой поверхностью, чтобы избежать помех от рассеяния. Образец помещается в оборудование XRD, и вакуум или инертная атмосфера являются опциональными для предотвращения влияния окисления на результаты. Источником рентгеновского излучения является излучение Cu K α , угол сканирования составляет от 10° до 90°, а размер шага регулируется в соответствии с разрешением. Аналитическая фокусировка идентификации кристаллической фазы, дифракционные пики серебра и вольфрама соответствуют гранецентрированной кубической и объемноцентрированной кубической структурам соответственно. Интенсивность и ширина пика отражают размер зерна и микродеформацию. Формула Шерле рассчитывает размер зерна: $D = K\lambda / (\beta \cos\theta)$, где D – размер зерна, β – ширина пика, а θ – угол дифракции. Смещение положения пика анализирует остаточные напряжения, а расщепление пика указывает на сосуществование нескольких фаз. Ключевые моменты теста включают калибровку прибора и устранение погрешностей прибора. Однородность образца влияет на результаты, и для получения среднего значения требуется несколько испытаний. Наблюдения показывают, что сплавы с оптимизированными процессами имеют узкие дифракционные пики, мелкое зерно и низкие остаточные напряжения. Области применения включают количественную оценку фаз и исследование дефектов решетки, а направления оптимизации включают синхротронную рентгеновскую дифракцию для повышения разрешения.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 6: Области применения серебряно-вольфрамового сплава

Серебряно-вольфрамовый сплав продемонстрировал широкий потенциал применения во многих востребованных областях благодаря своей превосходной электропроводности, теплопроводности, твёрдости и коррозионной стойкости. Его уникальная микроструктура и физико-химические свойства делают его идеальным материалом для таких отраслей, как электротехника, сварка и аэрокосмическая промышленность.

6.1 Применение серебряно-вольфрамового сплава в электротехнике

Серебряно-вольфрамовый сплав широко используется в таких ключевых компонентах, как высоковольтные автоматические выключатели, реле и низковольтные силовые переключатели в электротехнике. Высокая электропроводность и стойкость к дуговой эрозии обеспечивают работу при высоких токах и частых переключениях. Немagnetные свойства сплава предотвращают возникновение электромагнитных помех, а его твёрдость и износостойкость продлевают срок службы контактов, что делает его незаменимым материалом в электрооборудовании. Области применения включают в себя промышленные системы управления, передачу электроэнергии и бытовую технику, а оптимизация производительности обеспечивает надёжность сплава в различных условиях.

6.1.1 Преимущества применения в низковольтных силовых выключателях

Преимущества серебряно-вольфрамового сплава в низковольтных силовых выключателях обусловлены его превосходными комплексными характеристиками, особенно при коммутации больших токов и в условиях дугостойкости. Низковольтные силовые выключатели используются для управления включением и выключением цепей и должны выдерживать частые переключения и дуговые разряды. Высокая твёрдость, антиадгезионные свойства и электропроводность серебряно-вольфрамового сплава делают его идеальным выбором. Использование этого сплава в контактах выключателей значительно повышает безопасность и срок службы оборудования.

Высокая проводимость серебра обеспечивает низкое сопротивление цепи, снижает потери энергии при переключении и повышает эффективность работы. Высокая температура плавления и твёрдость вольфрама предотвращают дуговую эрозию и продлевают срок службы контактов, особенно при высокочастотном переключении. Антиадгезионные свойства предотвращают прилипание контактов к сопряжённому материалу, обеспечивая надёжное переключение. Сплав с оптимизированной микроструктурой сохраняет стабильность во влажных или серосодержащих средах, повышая их адаптируемость к окружающей среде. На практике контакты из серебряно-вольфрамового сплава хорошо зарекомендовали себя в низковольтных силовых выключателях, особенно в системах управления промышленными двигателями и защиты бытовой техники. По сравнению с традиционными материалами, такими как чистое серебро или сплавы на основе меди, серебряно-вольфрамовый сплав обладает значительно более высокой износостойкостью и дугостойкостью, что снижает частоту технического обслуживания. Оптимизация включает в себя

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

корректировку соотношения серебра и вольфрама для достижения баланса проводимости и долговечности, а также дальнейшее повышение коррозионной стойкости за счет нанесения покрытия на поверхность.

6.1.1.1 Требования к эксплуатационным характеристикам материалов низковольтных силовых выключателей

Требования к эксплуатационным характеристикам низковольтных силовых выключателей непосредственно определяют целесообразность применения серебряно-вольфрамовых сплавов, которые должны отвечать требованиям надежности в условиях высоких токов, частых переключений и дуговых сред. К эксплуатационным характеристикам относятся электропроводность, твердость, стойкость к дуговой эрозии, антиадгезионная и коррозионная стойкость, обеспечивающие безопасность и длительный срок службы выключателя.

Электропроводность является основным требованием, и материал должен обеспечивать низкое сопротивление для эффективной передачи тока. Низковольтные силовые ключи должны проводить ток силой от сотен до тысяч ампер во включенном состоянии. Недостаточная электропроводность может привести к перегреву или потере энергии, что скажется на эффективности оборудования. Сеть из серебряно-вольфрамового сплава отвечает этому требованию и обеспечивает плавное прохождение тока.

Твердость является ключевым свойством, и контакты должны быть устойчивы к механическому износу и ударам дуги. Частые переключения могут привести к деформации поверхности или отслоению материала, а материалы с недостаточной твердостью склонны к отказам. Высокая твердость вольфрама обеспечивает надежную поддержку для сплава серебра с вольфрамом, адаптируясь к высокочастотным ситуациям контакта и продлевая срок службы. Способность противостоять дуговой эрозии является основным требованием. Дуга, образующаяся при отключении переключателя, может расплавить или испарить материал и разрушить поверхность контакта. Материал должен оставаться стабильным при высоких температурах, чтобы снизить потери. Высокая температура плавления фазы вольфрама и теплопроводность фазы серебра сплава серебра с вольфрамом в сочетании обеспечивают эффективную защиту от дуговой эрозии и подходят для приложений отключения с высоким током.

Антиадгезионные свойства обеспечивают надежное разъединение. Контакт может прилипнуть к сопрягаемому материалу при механическом контакте или искрении, что приведет к отказу переключателя. Материал обладает низкими адгезионными свойствами. Вольфрамовый каркас и оптимизированная смачиваемость серебром сплава серебра и вольфрама снижают риск адгезии и обеспечивают стабильную работу.

Коррозионная стойкость — гарантия устойчивости к внешним воздействиям. Переключатели могут подвергаться воздействию влажной, серосодержащей или промышленной атмосферы, где коррозия может снизить проводимость и механические свойства. Стойкость к окислению

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрамовой фазы и стабильность серебряной фазы серебряно-вольфрамового сплава отвечают этому требованию, а оптимизированная микроструктура дополнительно повышает долговечность. Эти эксплуатационные требования в совокупности формируют строгие стандарты для материалов низковольтных силовых выключателей. Серебряно-вольфрамовый сплав эффективно отвечает этим требованиям благодаря микроструктуре и составу, обеспечивая надежную поддержку электрического поля.

6.1.1.2 Применение серебряно-вольфрамового сплава в низковольтных силовых переключателях

Серебряно-вольфрамовый сплав в основном используется в ключевых контактных деталях низковольтных силовых выключателей, которые напрямую влияют на их работу и срок службы. К конкретным областям применения относятся подвижные контакты, статические контакты и контакты дугогасительной системы, к которым предъявляются различные функциональные требования.

Подвижный контакт – это подвижная контактная часть низковольтного силового выключателя. Здесь широко используется сплав серебра с вольфрамом благодаря своей высокой проводимости и стойкости к дуговой эрозии. Подвижный контакт подвергается механическим ударам и воздействию дуги при замыкании и размыкании выключателя. Твердость сплава предотвращает износ, а серебряная фаза обеспечивает низкоомную передачу тока. Статический контакт – это неподвижная контактная часть, работающая в паре с подвижным контактом. Высокая износостойкость и антиадгезионные свойства сплава серебра с вольфрамом обеспечивают долговременную стабильную надежность контакта. Дугогасительные контакты используются для изоляции дуги при отключении больших токов. Высокая температура плавления и стойкость сплава к окислению эффективно уменьшают абляцию дуги и продлевают срок службы компонентов.

Выбор этих деталей основан на микроструктурных свойствах сплава серебра с вольфрамом, где вольфрамовый каркас обеспечивает механическую поддержку, а серебряная сетка оптимизирует проводимость. В оптимизированной конструкции контактная поверхность может быть дополнительно улучшена электрохимической полировкой или покрытием для адаптации к работе на высоких частотах или во влажной среде. На практике сочетание подвижных и статических контактов хорошо работает в промышленных системах управления двигателями и бытовых автоматических выключателях, а дугогасительные контакты особенно важны в условиях высоких токов.

6.1.1.3 Преимущества использования печатных плат в низковольтных силовых переключателях по сравнению с другими материалами

По сравнению с другими широко используемыми материалами, такими как чистое серебро, сплавы на основе меди и оксид серебра и кадмия, сплав серебра с вольфрамом обладает

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

значительными преимуществами при применении в низковольтных силовых переключателях. Эти преимущества обусловлены его уникальным сочетанием свойств и особенно подходят для применения в условиях высоких нагрузок.

По сравнению с чистым серебром, сплав серебра с вольфрамом обладает большей твёрдостью и устойчивостью к дуговому разряду. Несмотря на отличную проводимость чистого серебра, оно мягкое и легко изнашивается. Оно быстро плавится под действием дуги и имеет короткий срок службы. Добавление вольфрама повышает твёрдость сплава серебра с вольфрамом и его стойкость к абляции, что продлевает срок службы контакта, особенно при частом переключении. Чистое серебро легко окисляется во влажной среде. Вольфрамовая фаза сплава серебра с вольфрамом обеспечивает антиокислительную защиту и повышает его устойчивость к воздействию окружающей среды.

По сравнению со сплавами на основе меди, сплавы серебра с вольфрамом обладают лучшей электропроводностью и антиадгезионными свойствами. Сплавы на основе меди обладают более высокой твёрдостью, но меньшей электропроводностью, чем серебро, более высоким сопротивлением и склонны к тепловыделению. Сеть фаз серебра в сплавах серебра с вольфрамом снижает сопротивление и потери энергии, а её антиадгезионные свойства предотвращают слипание контактов и обеспечивают надёжное разъединение. Сплавы на основе меди склонны к плавлению и деформации под действием дуги, в то время как высокоплавкая вольфрамовая фаза в сплавах серебра с вольфрамом обеспечивает эффективную стойкость и подходит для силовых применений.

По сравнению с оксидом серебра и кадмия, сплав серебра и вольфрама нетоксичен и обладает лучшей коррозионной стойкостью. Оксид серебра и кадмия обладает хорошей дуговой и сварочной стойкостью, однако пары кадмия токсичны, и его применение ограничено экологическими нормами. Сплав серебра и вольфрама не содержит вредных элементов и соответствует экологическим требованиям. Вольфрамовая фаза обладает лучшей коррозионной стойкостью, чем оксид кадмия, особенно в серосодержащих или кислых средах. Несмотря на высокую проводимость оксида серебра и кадмия, он склонен к старению после длительного использования. Оптимизация микроструктуры сплава серебра и вольфрама обеспечивает его долговременную надёжность.

Эти преимущества позволяют серебряно-вольфрамовому сплаву заменить традиционные материалы в низковольтных силовых выключателях. Направления оптимизации включают повышение производительности за счёт использования нанопорошков и разработку композитных покрытий для повышения дугостойкости.

6.1.2 Спрос на электротехнические сплавы для высоковольтных выключателей

Электротехнические сплавы для высоковольтных выключателей должны соответствовать чрезвычайно высоким требованиям к эксплуатационным характеристикам, чтобы выдерживать

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокие токи, сильные дуги и экстремальные условия для обеспечения безопасной эксплуатации энергосистем. В качестве материала-кандидата серебряно-вольфрамовый сплав должен соответствовать специфическим требованиям высоковольтных выключателей и обеспечивать техническую поддержку для различных применений.

Электропроводность является одним из основных требований. Высоковольтным выключателям требуется низкоомный контур для снижения теплового воздействия при отключении тока силой в тысячи ампер. Сеть из серебряной фазы, изготовленная из сплава серебра и вольфрама, отвечает этому требованию и обеспечивает эффективную передачу тока. Стойкость к дуговой эрозии имеет решающее значение. Сильные дуги могут плавить традиционные материалы. Сочетание высокоплавкой вольфрамовой фазы и теплопроводной серебряной фазы сплава обеспечивает стойкость к абляции и продлевает срок службы.

Твёрдость и износостойкость обеспечивают механическую стабильность. Подвижные и статические контакты высоковольтных выключателей часто контактируют под высоким давлением и должны быть устойчивы к износу и деформации. Высокая твёрдость вольфрама обеспечивает надёжную опору, а пластичность серебра смягчает напряжение, что подходит для динамических условий эксплуатации. Антиадгезионные свойства обеспечивают надёжное отключение. Контакты могут слипаться при высокой температуре дуги, а низкая адгезия серебряно-вольфрамового сплава предотвращает отказ.

Высокая термостойкость и коррозионная стойкость позволяют использовать их в экстремальных условиях. Высоковольтные переключатели могут подвергаться воздействию высоких температур, влажности или промышленных сред, поэтому сплавы должны быть устойчивы к окислению и химической коррозии. Стойкость вольфрама к окислению и стабильность серебра отвечают этим требованиям, а оптимизированная микроструктура дополнительно повышает долговечность. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и обеспечивают точное управление высоковольтными системами.

Эти требования стимулируют разработку сплава серебра и вольфрама для высоковольтных выключателей. Направления оптимизации включают корректировку состава или применение конструкции с функциональным градиентом для решения задач, связанных с более высокими токами и окружающей средой.

6.1.2.1 Условия эксплуатации высоковольтного выключателя и особые требования к электротехническим сплавам

Условия эксплуатации высоковольтных выключателей сложны и суровы: высокая температура, высокое давление, мощная дуга и различные коррозионные среды, что предъявляет особые требования к электротехническим сплавам для обеспечения долгосрочной и стабильной работы. Условия эксплуатации и требования напрямую влияют на выбор материала и направление оптимизации. Рабочая среда включает в себя высоковольтные электрические поля и сильные токи.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Переключатель должен отключать ток силой от нескольких тысяч до десятков тысяч ампер, создавая высокотемпературные дуги, а температура может достигать тысяч градусов. Условия окружающей среды включают промышленную атмосферу, влажные или серосодержащие зоны, а коррозионные газы, такие как диоксид серы, могут ускорить деградацию материала. Механическая вибрация и удары обычны для работы переключателей, а экстремальные перепады температур увеличивают нагрузку на материал. Наружное применение также подвержено воздействию ультрафиолета и атмосферных осадков, а внутреннее применение может быть герметичным, но с высокой влажностью. К особым требованиям относится сверхвысокая проводимость для обеспечения передачи высокого тока, снижения резистивного нагрева и обеспечения эффективности. Стойкость к дуговой эрозии является основой. Абляция дуги может привести к отказу контакта, поэтому материал должен оставаться стабильным при высоких температурах. Твердость и износостойкость противостоят механическому износу и воздействию дуги, а также продлевают срок службы контактов. Антиадгезионные свойства обеспечивают надежное отключение и предотвращают отказ контакта из-за слипания. Высокая термостойкость и коррозионная стойкость позволяют работать в экстремальных условиях, а сплав должен противостоять окислению и химическому воздействию. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и обеспечивают точность высоковольтных систем. Микроструктурная однородность снижает риск локальных отказов, а оптимизация процесса играет ключевую роль.

Эти требования способствовали разработке высокопроизводительных электротехнических сплавов, и сплавы серебра с вольфрамом должны соответствовать этим требованиям за счет корректировки состава и процесса.

6.1.2.2 Характеристики сплава серебра и вольфрама применительно к высоковольтным переключателям

Серебряно-вольфрамовый сплав эффективно отвечает высоким требованиям, предъявляемым к высоковольтным выключателям, благодаря уникальному сочетанию свойств. Синергетический эффект серебряной и вольфрамовой фаз обеспечивает превосходную проводимость, стойкость к дуговой эрозии и долговечность, обеспечивая надежную поддержку высоковольтных устройств.

Сверхвысокая проводимость обеспечивается сетью серебряной фазы. Высокая электронная плотность серебра обеспечивает низкое сопротивление, поддерживает передачу больших токов и снижает тепловые эффекты. Высокая температура плавления вольфрама повышает устойчивость к дуговой эрозии. Вольфрамовый каркас сохраняет стабильность при высоких температурах дуги. Теплопроводность серебряной фазы быстро рассеивает тепло и снижает потери на абляцию. Испытания показывают, что поверхностное повреждение контактов из сплава серебра с вольфрамом при отключении больших токов значительно ниже, чем у сплавов на основе меди.

Твердость и износостойкость обеспечиваются частицами вольфрама, а сплав устойчив к механическим ударам и частому износу контактов, продлевая срок службы контактов. Пластичность серебра компенсирует напряжения, а после оптимизации микроструктуры

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

достигается равномерная твёрдость, что подходит для динамических условий эксплуатации. Противоадгезионные свойства достигаются благодаря низкой адгезии вольфрама и оптимизированной смачиваемости серебра. Контакт не прилипает к двухслойному материалу под воздействием дуги, что обеспечивает надёжное разъединение.

Высокая термостойкость обусловлена высокой температурой плавления вольфрама и стабильностью серебра. Сплав сохраняет структурную целостность при экстремальных температурах. Коррозионная стойкость обеспечивается стойкостью вольфрама к окислению и химической стабильностью серебра. Оптимизированное спекание снижает пористость и повышает эксплуатационные характеристики в серосодержащих и влажных средах. Немагнитные свойства предотвращают возникновение электромагнитных помех и подходят для точного управления высоковольтными системами.

Оптимизация микроструктуры дополнительно повышает производительность, плотная структура уменьшает дефекты, а наноразмерный порошок измельчает зерна и повышает однородность. Направления оптимизации включают разработку функциональных градиентных конструкций или антикоррозионных покрытий для решения задач, связанных с повышенным током и окружающей средой.

6.1.3 Применение реле и воздушных выключателей

Применение серебряно-вольфрамового сплава в реле и воздушных выключателях отражает его универсальность в электротехнике. Высокая электропроводность и дугостойкость сплава отвечают требованиям надежности и долговечности этих устройств и широко используются в промышленной автоматике и системах защиты электропитания.

В реле для подвижных и статических контактов используется сплав серебра с вольфрамом, отвечающий за быструю реакцию на изменения тока. Частое переключение реле приводит к возникновению крошечных дуг. Высокая твёрдость и стойкость к дуговой эрозии сплава продлевают срок службы контактов, а серебряная фаза обеспечивает низкоомную передачу сигнала. Немагнитные свойства предотвращают возникновение электромагнитных помех и подходят для использования в средах, чувствительных к электромагнитным полям, таких как автоматизированные системы управления. После оптимизации микроструктуры контакты сохраняют стабильность в условиях высоких частот.

В воздушных выключателях сплав серебра и вольфрама используется в главных контактах и контактах дугогасительной камеры для отключения токов от сотен до тысяч ампер. Эффективность переключения главных контактов зависит от проводимости и износостойкости сплава, а в контактах дугогасительной камеры используется вольфрамовая фаза с высокой температурой плавления для защиты от сильной дуговой эрозии. Сплав обладает превосходной стойкостью к окислению на воздухе и подходит для наружного и промышленного применения. В реальных условиях эксплуатации срок службы контактов воздушного выключателя значительно

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

увеличивается, а частота технического обслуживания сокращается. Преимуществами применения являются высокая надежность, длительный срок службы и адаптация к окружающей среде. Направления оптимизации включают корректировку соотношения серебра и вольфрама для баланса проводимости и долговечности или повышение коррозионной стойкости путем обработки поверхности.

6.1.3.1 Принцип работы реле и требования к материалам контактов

Реле управляют включением и выключением цепей по электромагнитному принципу. Принцип работы основан на подаче напряжения на катушку, создающую магнитное поле, которое приводит к соприкосновению или размыканию подвижного контакта со статическим контактом для переключения сигнала или тока. Эффективность реле зависит от надежности и долговечности материала контакта, что предъявляет особые требования к материалу.

Принцип работы заключается в том, что при подаче напряжения на катушку магнитное поле притягивает якорь, подвижный и статический контакты замыкаются, и цепь замыкается. При отключении питания магнитное поле исчезает, подвижный контакт размыкается пружиной, и цепь размыкается. Частое срабатывание приводит к возникновению дуговых разрядов, поэтому контактные поверхности должны выдерживать механические удары и тепловые воздействия. Реле широко используются в системах автоматического управления и бытовой технике, где рабочая среда может быть подвержена воздействию влаги или электромагнитных помех.

К контактным материалам предъявляются высокие требования, включая высокую проводимость для обеспечения низкого сопротивления и эффективной передачи сигнала. Стойкость к дуговой эрозии имеет решающее значение, поскольку мельчайшие дуги могут прожечь материал, и должна сохранять стабильность при высоких температурах. Твёрдость и износостойкость предотвращают механический износ контактов и продлевают срок их службы. Антиадгезионные свойства предотвращают слипание контактов и обеспечивают надёжное разъединение. Коррозионная стойкость адаптируется к влажным или серосодержащим средам, предотвращая влияние окисления на проводимость. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и обеспечивают точное управление. Микроструктурная однородность снижает локальные сбои, а оптимизация процесса является необходимым условием.

Эти требования в совокупности обеспечивают высокую эффективность и длительный срок службы реле, а серебряно-вольфрамовый сплав должен отвечать этим требованиям за счет соответствия эксплуатационным характеристикам.

6.1.3.2 Эффект применения серебряно-вольфрамового сплава в реле

Эффект применения сплава серебра и вольфрама в реле замечателен, а его эксплуатационные преимущества в полной мере отражаются в подвижных и статических контактах, отвечая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

требованиям высокочастотной работы и условий, чувствительных к электромагнитным полям, а также повышая надежность оборудования.

Высокая проводимость серебряной фазы обеспечивает низкое сопротивление цепи, что гарантирует эффективность передачи сигнала и отвечает требованиям к быстродействию реле. Высокая температура плавления и твердость вольфрама предотвращают эрозию микродуговым разрядом и продлевают срок службы контактов, особенно при высокочастотной коммутации. Противоадгезионные свойства достигаются за счёт оптимизации структуры вольфрамового каркаса и смачиваемости серебром. Контакты не подвержены слипанию при механическом контакте или воздействию дуги, что обеспечивает надёжное разъединение. Немагнитные свойства предотвращают возникновение электромагнитных помех и подходят для использования в системах автоматизации, управления и связи.

Сплав с оптимизированной микроструктурой сохраняет стабильность во влажной среде, а плотная структура уменьшает проникновение агрессивных сред, а его коррозионная стойкость выше, чем у контактов из чистого серебра. На практике контакты из сплава серебра с вольфрамом хорошо зарекомендовали себя в промышленных реле и устройствах защиты бытовой техники, а их срок службы в несколько раз превышает срок службы контактов из традиционных материалов. Испытания показывают, что повреждение поверхности значительно снижается после высокочастотной эксплуатации, а проводимость остаётся стабильной. Направления оптимизации включают корректировку соотношения серебра и вольфрама для повышения проводимости или измельчение зерен с помощью наноразмерного порошка для повышения дугостойкости. Применение сплава серебра и вольфрама в реле обеспечивает надёжную поддержку его применения в области электроуправления.

6.1.3.3 Требования к рабочим характеристикам воздушных выключателей и совместимость серебряно-вольфрамового сплава

Воздушные выключатели используют воздух в качестве дугогасящей среды для размыкания цепи. Требования к характеристикам включают высокую токопроводимость, стойкость к дуговой эрозии и долговременную стабильность. Характеристики серебряно-вольфрамового сплава в полной мере соответствуют этим требованиям, демонстрируя превосходный потенциал применения. Требования к рабочим характеристикам включают высокую проводимость, возможность передачи тока от сотен до тысяч ампер и снижение термического сопротивления. Стойкость к дуговой эрозии является ключевым фактором. Отключение больших токов приводит к образованию мощных дуг, которые должны противостоять высокотемпературной абляции. Твердость и износостойкость гарантируют, что контакты способны выдерживать механические удары и частое срабатывание. Антиадгезионные свойства предотвращают слипание контактов и обеспечивают надёжное разъединение. Высокая термостойкость и коррозионная стойкость позволяют использовать их в промышленной атмосфере или на открытом воздухе, продлевая срок службы. Стабильность микроструктуры снижает локальные отказы, а оптимизация процесса играет ключевую роль. Адаптивность серебряно-вольфрамового сплава обусловлена высокой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

проводимостью серебряной фазы, что обеспечивает соответствие требованиям по передаче тока, высокой температурой плавления и твёрдостью вольфрама, стойкими к сильной дуговой эрозии, а также значительно увеличенным сроком службы контактов. Теплопроводность серебра способствует рассеиванию тепла, а антиадгезионные свойства достигаются за счёт оптимизации вольфрамового каркаса, что позволяет отключать контакты при больших токах. Стойкость вольфрама к окислению и стабильность серебра повышают коррозионную стойкость, а плотная микроструктура уменьшает количество дефектов, что делает их пригодными для использования во влажных или серосодержащих средах. На практике контакты из серебряно-вольфрамового сплава хорошо работают в воздушных автоматических выключателях, особенно в системах распределения электроэнергии в промышленности и защиты зданий, с увеличенными интервалами технического обслуживания. Направления оптимизации включают разработку конструкции с функциональным градиентом для улучшения локальных характеристик или повышение коррозионной стойкости за счёт нанесения поверхностного покрытия. Адаптивность серебряно-вольфрамового сплава создаёт прочную основу для его широкого применения в воздушных выключателях.

6.1.4 Применение в разъединителях и заземлителях

Применение серебряно-вольфрамового сплава в разъединителях и заземлителях отражает его важную роль в высоковольтном электрооборудовании. Эти разъединители используются для обеспечения безопасной изоляции и заземления цепей. Высокая электропроводность, дугостойкость и долговечность серебряно-вольфрамового сплава делают его идеальным материалом. Использование сплава в этих компонентах повышает безопасность и стабильность работы оборудования, особенно в наружных и промышленных условиях.

6.1.4.1 Требования к функциям и материалам для разъединителей и заземлителей

Разъединители и заземлители выполняют критически важные функции в энергосистемах, предъявляя особые требования к характеристикам материалов для обеспечения безопасной эксплуатации и долгосрочной надежности. Функции и требования напрямую определяют выбор и оптимизацию материалов.

Функция разъединителя заключается в отключении цепи без тока нагрузки, обеспечении видимой точки изоляции и предотвращении риска поражения электрическим током при неправильной эксплуатации или техническом обслуживании. Заземляющий разъединитель используется для заземления оборудования или линии, снятия остаточного заряда и обеспечения безопасности персонала и оборудования. Оба работают в условиях высокого напряжения и могут подвергаться воздействию дуговых разрядов, механических ударов и экстремальных погодных условий.

К материалам предъявляются высокие требования по электропроводности для обеспечения низкого сопротивления, обеспечения передачи тока и снижения теплового воздействия. Стойкость к дуговой эрозии является ключевым фактором. Разъединение или соединение может привести к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

образованию дуги, а также необходимо обеспечить защиту от высокотемпературной абляции. Твёрдость и износостойкость обеспечивают защиту от механического износа и частой эксплуатации, продлевая срок службы. Антиадгезионные свойства предотвращают слипание контактов и обеспечивают надёжную работу. Коррозионная стойкость и атмосферостойкость позволяют использовать изделие в условиях внешней среды, таких как дождь, ультрафиолетовое излучение или промышленная атмосфера. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи, микроструктурная однородность снижает локальные сбои, а оптимизация процесса является необходимым условием.

Эти требования обеспечивают безопасность и долговечность разъединителей и заземлителей, а серебряно-вольфрамовый сплав должен соответствовать этим требованиям за счёт соответствия эксплуатационным характеристикам.

6.1.4.2 Преимущества серебряно-вольфрамового сплава в разъединителях и заземлителях

Преимущества сплава серебра с вольфрамом в разъединителях и заземлителях обусловлены его превосходным сочетанием характеристик, особенно его эксплуатационными характеристиками при высоком напряжении и на открытом воздухе, что значительно повышает надёжность оборудования. Высокая проводимость обеспечивается фазовой сетью серебра. Высокая электронная плотность серебра обеспечивает путь с низким сопротивлением, поддерживает эффективную передачу тока и снижает потери энергии в разъединителях и заземлителях. Высокая температура плавления и твердость вольфрама придают сплаву отличную стойкость к дуговой эрозии. Дуга, образующаяся при разъединении или соединении, трудно расплавляет контакты, что продлевает срок их службы. Фактические испытания показывают, что повреждение поверхности контактов из сплава серебра с вольфрамом под действием дуги значительно ниже, чем у материалов на основе меди.

Твёрдость и износостойкость обеспечиваются частицами вольфрама. Сплав устойчив к механическим ударам и износу при частой эксплуатации, а также к вибрации и атмосферным воздействиям на открытом воздухе. Пластичность серебра компенсирует напряжения, а долговечность контакта повышается благодаря оптимизации микроструктуры. Противоадгезионные свойства достигаются за счёт оптимизации структуры вольфрамового каркаса и смачиваемости серебром. Контакт не склонен к прилипанию к двухслойному материалу во время эксплуатации, что обеспечивает надёжное разъединение.

Коррозионная стойкость и атмосферостойкость являются преимуществами для наружного применения, где стойкость вольфрама к окислению и стабильность серебра обеспечивают защиту от коррозии под воздействием дождя, ультрафиолетового излучения или промышленной атмосферы. Плотная микроструктура уменьшает пористость и препятствует проникновению коррозионных сред, а оптимизированный спеченный сплав хорошо работает в прибрежных и промышленных зонах. Немагнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и обеспечивают точное управление высоковольтным оборудованием. На практике контакты из

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

серебряно-вольфрамового сплава хорошо зарекомендовали себя в высоковольтных разъединителях и заземлителях, особенно на линиях электропередачи и подстанциях, где увеличиваются интервалы технического обслуживания и повышаются показатели безопасности. Оптимизация включает в себя корректировку соотношения серебра и вольфрама для повышения устойчивости к атмосферным воздействиям или дальнейшее улучшение характеристик за счет нанесения антикоррозионных покрытий. Преимущества применения серебряно-вольфрамового сплава обеспечивают прочную основу для его широкого применения в разъединителях и заземлителях.

6.2 Применение серебряно-вольфрамового сплава в электронике

Серебряно-вольфрамовый сплав широко используется в электронике благодаря своей превосходной электропроводности, теплопроводности и износостойкости, особенно в электротехнических изделиях, компонентах теплоотвода и соединителях. Его микроструктура и физико-химические свойства позволяют использовать его в условиях высокой точности и высоких температур, повышая надежность и производительность электронного оборудования.

6.2.1 Требования к производительности и области применения электроэрозионных электродов

В качестве материала для электродов для электрохимической обработки серебряно-вольфрамовый сплав хорошо себя проявляет при электроискровой (ЭИ) и электрохимической обработке (ЭХО), а его характеристики напрямую влияют на точность обработки, эффективность и срок службы электродов. Электроды для электрохимической обработки используются для удаления металлических материалов и высокоточной формовки с помощью дуги или электрохимической реакции. Ключевыми характеристиками сплава являются электропроводность и износостойкость.

6.2.1.1 Требования к показателям эффективности электродных материалов для электрообработки

Процесс электрохимической обработки предъявляет высокие требования к эксплуатационным показателям электродных материалов для обеспечения качества обработки и долговечности оборудования. Эти показатели напрямую влияют на эффективность обработки, качество поверхности и потери электродов и должны подбираться в соответствии с конкретным процессом.

Высокая проводимость является основным требованием. Электрод должен обеспечивать низкое сопротивление для эффективной передачи тока и снижения потерь энергии. В электроэрозионной обработке плотность тока высока, и недостаточная проводимость может привести к нестабильности дуги, что сказывается на точности обработки. Способность противостоять дуговой эрозии имеет решающее значение. Высокая температура дуги может расплавить или испарить материал электрода, поэтому он должен оставаться стабильным при высокой плотности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

энергии. Твёрдость и износостойкость противостоят механическому износу и воздействию дуги, продлевая срок службы электрода, особенно при многократной обработке.

Антиадгезионные свойства предотвращают прилипание электрода к заготовке и обеспечивают непрерывность процесса обработки. Высокая термостойкость адаптируется к локальной высокой температуре, создаваемой дугой, и предотвращает деформацию или разрушение материала. Коррозионная стойкость предотвращает химическую эрозию в электролите или среде обработки и сохраняет целостность поверхности электрода. Микроструктурная однородность снижает локальные потери и оптимизирует подготовку материала как необходимое условие. Эти показатели в совокупности обеспечивают высокую эффективность и точность электрообработки, а электродные материалы должны соответствовать этим требованиям за счет оптимизации производительности.

6.2.1.2 Эксплуатационные преимущества сплава серебра и вольфрама в качестве электрода для электрообработки

Сплав серебра и вольфрама демонстрирует значительные эксплуатационные преимущества в качестве электрода для электромеханической обработки. Синергетический эффект серебряной и вольфрамовой фаз обеспечивает высокую точность и долговечность, а также повышает эффективность обработки.

Высокая электропроводность обеспечивается сетью серебряной фазы. Высокая электронная плотность серебра обеспечивает низкое сопротивление, способствует эффективному токопередаче и снижает нестабильность дуги. Высокая температура плавления и твёрдость вольфрама придают сплаву отличную стойкость к дуговой эрозии. Вольфрамовый каркас сохраняет стабильность при высоких температурах дуги, а теплопроводность серебряной фазы быстро рассеивает тепло и снижает потери электрода. Испытания показывают, что скорость потерь электродов из серебряно-вольфрамового сплава при электроэрозионной обработке ниже, чем у медных электродов.

Твёрдость и износостойкость обеспечиваются частицами вольфрама, а сплав устойчив к воздействию дуги и механическому износу, продлевая срок службы электрода. Пластичность серебра компенсирует напряжения, а его прочность повышается благодаря оптимизации микроструктуры. Антиадгезионные свойства достигаются благодаря низкой адгезии вольфрама и оптимальной смачиваемости серебра. Электрод не прилипает к заготовке, что обеспечивает непрерывность процесса обработки.

Высокая термостойкость обусловлена высокой температурой плавления вольфрама, а сплав сохраняет структурную целостность при локальном воздействии высокой температуры дуги. Коррозионная стойкость обеспечивается стойкостью вольфрама к окислению и стабильностью серебра. Оптимизированное спекание снижает пористость и адаптируется к среде электролита. Плотность микроструктуры уменьшает количество дефектов, а наноразмерный порошок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

измельчает зерна и улучшает однородность. На практике электроды из сплава серебра и вольфрама хорошо зарекомендовали себя при обработке прецизионных форм и сложных деталей, превосходя по точности обработки и качеству поверхности традиционные материалы. Оптимизация включает в себя корректировку соотношения серебра и вольфрама для повышения проводимости или дальнейшего снижения потерь за счёт нанесения покрытия на поверхность.

6.2.1.3 Выбор электродов из сплава серебра и вольфрама для различных вариантов электроэрозионной обработки

Выбор электродов из сплава серебра и вольфрама необходимо оптимизировать в соответствии с требованиями процесса и характеристиками заготовки в рамках электрообработки, а соотношение серебра и вольфрама и микроструктуру следует корректировать для соответствия требованиям различных областей применения.

В электроискровой обработке (EDM) выбираются сплавы серебра и вольфрама с высоким содержанием вольфрама (например, 70% W - 30% Ag). Они обладают высокой стойкостью к дуговой эрозии и подходят для обработки тугоплавких металлов, таких как титановые сплавы или сталь. Низкие потери и длительный срок службы являются преимуществами, подходящими для обработки прецизионных форм и сложных геометрических форм. Оптимизация процесса спекания измельчает зерна и повышает долговечность. В электролитической обработке (ECM) выбираются сплавы серебра и вольфрама с высоким содержанием серебра (например, 30% W - 70% Ag). Они обладают отличной проводимостью и подходят для электролитической зачистки больших площадей. Сеть фаз серебра поддерживает эффективное распределение тока, а вольфрамовый скелет обеспечивает механическую поддержку и адаптируется к непрерывной обработке. Полировка поверхности снижает коррозию и оптимизирует микроструктуру для повышения стабильности. В микроэлектромеханической обработке выбираются наномасштабные сплавы серебра и вольфрама. Они обладают мелким зерном и высокой микроструктурной однородностью, что делает их пригодными для микродеталей и высокоточной обработки. Они обладают превосходными характеристиками низких потерь и антиадгезионной защиты, а направление оптимизации включает в себя разработку функционального градиента для баланса проводимости и износостойкости.

На практике электроды из сплава серебра и вольфрама хорошо зарекомендовали себя при обработке авиационных деталей и электронных компонентов. Выбор электродов зависит от параметров процесса и материала заготовки. Оптимизация включает разработку интеллектуальной системы выбора для повышения адаптивности.

6.2.2 Роль микроэлектронных материалов

Серебряно-вольфрамовый сплав играет ключевую роль в области микроэлектроники, особенно в корпусных и соединительных компонентах, где его высокая проводимость и способность к терморегулированию отвечают требованиям к производительности высокоплотных интегральных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

схем. Оптимизация микроструктуры сплава позволяет добиться точности на микронном уровне и отвечает тенденции миниатюризации и повышения эффективности современных электронных устройств.

6.2.2.1 Требования к точности материалов в области микроэлектроники

В области микроэлектроники предъявляются чрезвычайно высокие требования к точности материалов для обеспечения производства и эксплуатации компонентов микронного уровня, а также эффективности и надежности оборудования. Требования к точности напрямую влияют на производительность корпусирования и соединений и должны быть удовлетворены за счет свойств материалов.

Точность размеров является ключевым требованием. Материалы должны быть обработаны и собраны на микронном или даже нанометровом уровне, чтобы соответствовать тонкой структуре микросхем и печатных плат. Электропроводность должна быть чрезвычайно высокой для обеспечения эффективной передачи сигнала и снижения потерь, вызванных сопротивлением. Теплопроводность — ключ к терморегулированию. Микроэлектронные устройства генерируют много тепла при работе с высокой плотностью компонентов, и материалы должны быстро рассеивать тепло для предотвращения перегрева и выхода из строя.

Требуется высокая механическая стабильность, а материал должен выдерживать нагрузки, вызванные небольшими вибрациями и тепловым расширением, для сохранения структурной целостности в течение длительного времени. Коррозионная стойкость обеспечивает устойчивость к влаге и химическим веществам в упаковочной среде, предотвращая ухудшение эксплуатационных характеристик. Микроструктурная однородность уменьшает локальные дефекты и обеспечивает однородность электрических и тепловых свойств. Низкие магнитные свойства предотвращают электромагнитные помехи и подходят для высокочувствительных электронных компонентов.

Эти требования способствовали разработке высокоточных материалов, а сплав серебра с вольфрамом нуждается в оптимизации путем подготовки для удовлетворения потребностей микроэлектроники.

6.2.2.2 Применение сплава серебра с вольфрамом в микроэлектронных корпусах

Серебряно-вольфрамовый сплав широко используется в корпусировании микроэлектроники. Его теплопроводность и размерная стабильность способствуют терморегулированию и структурной надежности высокопроизводительных микросхем, а также повышают эффективность корпусирования.

В качестве подложки для корпусирования используется сплав серебра с вольфрамом. Теплопроводность обеспечивается сеткой фаз серебра, которая быстро рассеивает тепло,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

выделяемое при работе кристалла, и предотвращает локальный перегрев. Высокая температура плавления и низкий коэффициент теплового расширения вольфрама обеспечивают размерную стабильность, соответствуют характеристикам теплового расширения кремниевых кристаллов и снижают механические напряжения при корпусировании. После оптимизации микроструктуры сплав обладает высокой плотностью, низкой пористостью, повышенной механической прочностью и подходит для корпусирования с высокой плотностью.

В корпусировании силовых полупроводниковых приборов подложки из сплава серебра и вольфрама используются для поддержки МОП-транзисторов и БТИЗ. Они обладают лучшей теплопроводностью по сравнению с традиционными керамическими подложками и повышают эффективность рассеивания тепла более чем на 30%. Наноразмерные порошки измельчают зерна, улучшают пути теплоотвода и подходят для высокопроизводительных применений. Плоскостность поверхности достигается прецизионной полировкой, что позволяет соответствовать требованиям к сборке на микронном уровне.

На практике корпус из сплава серебра и вольфрама хорошо зарекомендовал себя в микросхемах 5G и модулях управления транспортными средствами на новых источниках энергии, обеспечивая значительный эффект терморегулирования. Направления оптимизации включают разработку функционально-градиентных материалов, баланс теплопроводности и стоимости, а также повышение коррозионной стойкости с помощью покрытий.

6.2.2.3 Роль сплава серебра с вольфрамом в компонентах микроэлектроники

Серебряно-вольфрамовый сплав играет важную роль в компонентах микроэлектроники. Его высокая проводимость и износостойкость обеспечивают надежность передачи сигнала и механического соединения, адаптируясь к тенденции миниатюризации. Серебряно-вольфрамовый сплав используется для соединения выводов и контактов. Высокая проводимость серебряной фазы обеспечивает низкое сопротивление передачи сигнала и отвечает требованиям высокоскоростной передачи данных. Высокая твердость вольфрама предотвращает механический износ и продлевает срок службы компонентов, особенно при частом подключении и отключении. Компактность микроструктуры снижает пористость, повышает коррозионную стойкость и адаптирует к влажным и промышленным средам. Контакты из сплава серебра и вольфрама в микроразъемах поддерживают интерфейсы USB-C и HDMI, обладая лучшей проводимостью и износостойкостью по сравнению с медными сплавами, а сопротивление контакта снижено на 20%. Наноразмерные сплавы уменьшают границы зерен, повышают механическую стабильность и уменьшают износ разъема. Немагнитные свойства позволяют избежать электромагнитных помех и подходят для передачи высокочастотных сигналов. На практике компоненты соединения из сплава серебра и вольфрама хорошо работают в смартфонах и устройствах Интернета вещей, обеспечивая высокую целостность сигнала и длительный срок службы. Направления оптимизации включают корректировку соотношения серебра и вольфрама для повышения проводимости или улучшение антиокислительных свойств путем обработки поверхности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.3 Исследование применения датчиков

Применение сплава серебра и вольфрама в датчиках продемонстрировало его потенциал в высокопроизводительных электронных устройствах, особенно в условиях, требующих высокой проводимости и долговечности. Оптимизация микроструктуры сплава обеспечивает его адаптацию к различным условиям эксплуатации датчиков, обеспечивает передачу сигнала и структурную стабильность, а также открывает новое направление для развития сенсорных технологий.

6.2.3.1 Требования к рабочей среде датчика и эксплуатационным характеристикам материалов

Условия эксплуатации датчиков сложны и разнообразны, включая экстремальные температуры, механические нагрузки и химическую коррозию, что предъявляет особые требования к свойствам материалов для обеспечения точности и долговременной надежности датчиков. Выбор и оптимизация материалов напрямую зависят от условий эксплуатации и требований.

Рабочие среды включают высокотемпературные среды, такие как автомобильные двигатели или промышленные печи, где температура может превышать 200 °C; и низкотемпературные среды, такие как авиационное оборудование, где температура опускается ниже -50 °C. Механическая вибрация и удары часто встречаются в системах промышленного мониторинга или мобильном оборудовании, а влажные или коррозионные газовые среды, такие как океан или химические заводы, могут ускорить деградацию материалов. Электромагнитные помехи неизбежны при передаче высокочастотных сигналов, а ультрафиолетовое излучение влияет на стабильность материалов при использовании вне помещений.

Требования к характеристикам материалов включают высокую проводимость для обеспечения эффективной передачи сигнала и снижения уровня шума, вызванного сопротивлением. Устойчивость к высоким и низким температурам для адаптации к экстремальным условиям окружающей среды и предотвращения ухудшения характеристик материала при перепадах температур. Механическая прочность и износостойкость для защиты от вибрации и ударов для продления срока службы датчика. Устойчивость к коррозии для работы во влажных и химических средах для поддержания электрических характеристик. Низкий коэффициент теплового расширения для согласования с элементами датчика и снижения термических напряжений. Ключевыми факторами являются немагнитные свойства для предотвращения электромагнитных помех, микроструктурная однородность для уменьшения локальных дефектов и оптимизированная подготовка.

6.2.3.2 Возможные сценарии применения серебряно-вольфрамового сплава в датчиках

Потенциальные возможности применения серебряно-вольфрамового сплава в датчиках основаны на его превосходных свойствах, особенно в плане проводимости, долговечности и адаптации к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окружающей среде, что открывает возможности для разработки датчиков температуры, давления и деформации. В высокотемпературных датчиках сплав серебра с вольфрамом используется для контактных частей термопар или инфракрасных датчиков. Высокая проводимость фазы серебра обеспечивает передачу сигнала, а высокая температура плавления и высокая термостойкость вольфрама позволяют выдерживать среды выше 200 °C. После оптимизации микроструктуры сплав имеет высокую плотность и низкий коэффициент теплового расширения, что соответствует керамической подложке и снижает термическое напряжение. Фактические испытания показывают, что сплав остается стабильным при высоких температурах и подходит для мониторинга авиационных двигателей. В датчиках давления сплав серебра с вольфрамом используется в качестве проводящей пленки или контакта, а его твердость и износостойкость противостоят механическим ударам и продлевают срок службы. Теплопроводность серебра рассеивает локальное тепло, а вольфрамовый каркас обеспечивает механическую поддержку, что подходит для промышленных гидравлических систем. Оптимизированное спекание снижает пористость и повышает коррозионную стойкость, что подходит для мониторинга давления в морской среде. В датчиках деформации для токопроводящих дорожек используется сплав серебра и вольфрама, немагнитные свойства которого позволяют избежать электромагнитных помех, что подходит для получения высокочастотных сигналов.

6.3 Применение серебряно-вольфрамового сплава в аэрокосмической промышленности

Серебряно-вольфрамовый сплав привлекает большое внимание в аэрокосмической отрасли благодаря своей высокой плотности, высокой температуре плавления и превосходным механическим свойствам. Он широко используется в соплах твердотопливных ракет, противовесах и системах тепловой защиты. Его микроструктура и физические свойства позволяют адаптировать его к экстремальным условиям и способствуют надежной работе и повышению производительности космических аппаратов.

6.3.1 Применение облицовки сопла твердотопливного ракетного двигателя

Серебряно-вольфрамовый сплав, используемый в облицовке сопла твердотопливных ракет, демонстрирует свой потенциал в условиях высоких температур, высокого давления и коррозионных сред. Будучи основным компонентом сопла, облицовка сопла должна выдерживать экстремальные условия и сохранять структурную целостность. Высокая теплопроводность и износостойкость сплава обеспечивают ему уникальные преимущества в этой области.

6.3.1.1 Проблемы условий эксплуатации и материалов, связанных с облицовкой сопла твердотопливного ракетного двигателя

Рабочие условия горловины сопла твердотопливного ракетного двигателя чрезвычайно суровы и включают высокие температуры, высокоскоростной поток газа и химическую эрозию, что представляет собой серьезную проблему для свойств материала и напрямую влияет на срок службы сопла и эксплуатационные характеристики ракеты.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Рабочая среда включает в себя высокотемпературную среду, температура продуктов сгорания может достигать более 3000 °C, и облицовка горловины должна выдерживать термический удар. Высокоскоростной газовый поток ударяется о облицовку горловины со сверхзвуковой скоростью, перенося частицы и вызывая механический износ и эрозию. Химическая эрозия, вызываемая продуктами сгорания, такими как хлористый водород и оксиды, ускоряет деградацию материала. Термоциклирование и механические напряжения усиливаются во время запуска и возвращения в атмосферу, а ультрафиолетовое излучение и радиация дополнительно влияют на устойчивость материала в космической среде.

К особенностям материалов относятся высокая термостойкость, которая должна выдерживать температуры свыше 3000 °C без плавления и деформации. Эрозионная стойкость для защиты от высокоскоростных частиц и химической коррозии для предотвращения потери поверхности. Механическая прочность и износостойкость для поддержания структурной целостности и продления срока службы. Низкий коэффициент теплового расширения, соответствующий другим компонентам сопла, для снижения термических напряжений. Теплопроводность для рассеивания тепла и предотвращения локального перегрева. Микроструктурная однородность для предотвращения распространения трещин и оптимизированная подготовка играют ключевую роль.

6.3.1.2 Характеристики сплава серебра и вольфрама в качестве вкладыша горловины сопла

Серебряно-вольфрамовый сплав обладает превосходными эксплуатационными характеристиками в качестве облицовки сопла. Синергетический эффект серебряной и вольфрамовой фаз обеспечивает соответствие требованиям высокотемпературных и коррозионных сред, способствуя эффективной работе ракеты.

Высокая термостойкость обеспечивается высокой температурой плавления вольфрама (3422 °C). Сплав сохраняет структурную стабильность при температурах выше 3000 °C, а теплопроводность серебряной фазы быстро рассеивает тепло, предотвращая локальное плавление. Испытания показывают, что скорость потерь футеровки горловины из серебряно-вольфрамового сплава в условиях, имитирующих высокие температуры, ниже, чем у карбидных материалов. Коррозионная стойкость обусловлена твёрдостью и химической стойкостью вольфрама, износ поверхности снижается под действием высокоскоростного газового потока и ударов частиц, а смачиваемость серебра улучшает сцепление на границе раздела.

Механическая прочность и износостойкость обеспечиваются вольфрамовым каркасом, а сплав устойчив к перепадам температур и механическим нагрузкам, продлевая срок службы вкладыша горловины. Низкий коэффициент термического расширения (близкий к керамическим материалам) уменьшает несоответствие напряжений в других частях сопла, а оптимизированная микроструктура отличается высокой плотностью и препятствует распространению трещин. Теплопроводность обеспечивается серебряной сеткой, что позволяет равномерно распределять тепло, предотвращая перегрев и отказы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

На практике вкладыши из серебряно-вольфрамового сплава хорошо зарекомендовали себя в твердотопливных ракетах, особенно в двигателях большой тяги, где они значительно повышают долговечность. Оптимизация включает в себя корректировку соотношения серебра и вольфрама для повышения теплопроводности или повышение стойкости к химической эрозии посредством нанесения покрытия.

6.3.1.3 Эффект от нанесения покрытия на горловину сопла из сплава серебра и вольфрама

Облицовка горловины сопла из сплава серебра и вольфрама изготавливается методом порошковой металлургии или вакуумной инфильтрации. Процесс изготовления и условия эксплуатации напрямую влияют на его эксплуатационные характеристики и практическое применение.

Процесс изготовления включает в себя подготовку порошка, выбор высокочистого порошка вольфрама и серебра, а также измельчение размера частиц с помощью высокоэнергетической шаровой мельницы для обеспечения однородности. Прессование осуществляется при высокой температуре и высоком давлении, давление прессования регулируется до сотен МПа, а плотность формованного тела высокая. Спекание проводится в вакууме или инертной атмосфере, при температуре немного выше температуры плавления серебра. Жидкое серебро смачивает частицы вольфрама и заполняет поры. Пористый вольфрамовый каркас изготавливается методом вакуумной инфильтрации, а расплавленное серебро инфильтруется, образуя плотную структуру. Последующая термическая обработка оптимизирует микроструктуру.

Эффект от использования отражается в высокой долговечности и стабильности характеристик. Оптимизированная облицовка горловины имеет низкую пористость и более высокую коррозионную стойкость, чем традиционные графитовые материалы. Высокотемпературные испытания показывают, что облицовка горловины выдерживает сотни секунд при температуре 3000 °C, а повреждение поверхности составляет всего 1/3 от повреждения карбидных материалов. Механическая прочность выдерживает многократные термоциклы, а теплопроводность обеспечивает равномерное распределение тепла и снижает локальные разрушения. В условиях реальных запусков ракет облицовка горловины из серебряно-вольфрамового сплава демонстрирует низкие потери тяги, а её срок службы увеличивается в 1,5 раза по сравнению с традиционными материалами.

Направления оптимизации включают разработку многопроцессных комбинаций, таких как SPS+HIP, или повышение плотности с помощью нанопорошков. Результаты подготовки и применения обеспечивают техническую поддержку применения серебряно-вольфрамового сплава для облицовки сопловых каналов.

6.3.2 Потенциальные области применения компонентов авиационных двигателей

Потенциальное применение серебряно-вольфрамового сплава в компонентах авиакосмических двигателей обусловлено его способностью адаптироваться к условиям высоких температур и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

давления, особенно в условиях высоких требований к терморегулированию, прочности конструкции и долговечности. Теплопроводность и механические свойства сплава позволяют применять его в ключевых компонентах авиакосмических двигателей, повышая эффективность и срок службы двигателя.

6.3.2.1 Требования к материалам, эксплуатируемым в условиях высоких температур и давлений авиационных двигателей

Условия работы авиационных двигателей в условиях высоких температур и давления чрезвычайно сложны, что предъявляет строгие требования к характеристикам материалов для обеспечения надежности и безопасности двигателя при его интенсивной эксплуатации. Выбор и оптимизация материалов напрямую зависят от условий эксплуатации и требований.

Рабочая среда включает высокотемпературные зоны, где температура камеры сгорания и лопаток турбины может достигать 1500–2000 °C, а температура выхлопного сопла ещё выше. Высокое давление, рабочее давление может достигать десятков МПа, а скорость газового потока сверхзвуковая, что создаёт механические напряжения. Во время взлёта и посадки часто происходят термощиклы, а продукты сгорания, такие как углекислый газ и водяной пар, вызывают окисление и коррозию. Вибрация и центробежная сила усиливаются в высокоскоростных вращающихся деталях, а излучение и внешние силы влияют на устойчивость материала во время полёта на большой высоте.

Требования к материалам включают высокую термостойкость для сохранения структурной целостности при температурах выше 2000 °C. Стойкость к окислению и коррозии для защиты от химического воздействия и предотвращения разрушения поверхности. Механическая прочность и износостойкость для работы при высоком давлении и высоких скоростях, а также для продления срока службы компонентов. Низкий коэффициент теплового расширения для соответствия другим материалам и снижения термических напряжений. Теплопроводность для рассеивания тепла и предотвращения локального перегрева. Микроструктурная однородность для предотвращения распространения трещин, а также оптимальная подготовка являются ключевым фактором.

6.3.2.2 Потенциал применения серебряно-вольфрамового сплава в отдельных деталях авиационных двигателей

Потенциал применения серебряно-вольфрамового сплава в определенных деталях авиационных двигателей обусловлен его превосходными свойствами, особенно в области высокотемпературной теплопроводности и механической поддержки, что позволяет использовать его для лопаток турбин, облицовки камер сгорания и теплообменников. В турбинных лопатках в качестве армирующего материала используется сплав серебра с вольфрамом. Высокая температура плавления вольфрама позволяет выдерживать температуры свыше 1500 °C, а теплопроводность серебра рассеивает тепло, предотвращая локальный перегрев. Низкий коэффициент термического расширения снижает несоответствие напряжений по сравнению со сплавами на основе никеля, а

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокая механическая прочность после оптимизации микроструктуры подходит для условий высокоскоростного вращения. Испытания показывают, что скорость деформации лопаток из сплава при имитированных высоких температурах ниже, чем у традиционных материалов.

В футеровке камеры сгорания сплав серебра и вольфрама обеспечивает высокую термостойкость и защиту от эрозии. Вольфрамовый каркас выдерживает высокие температуры до 2000 °C, а сетка из серебряной фазы равномерно проводит тепло, снижая термические напряжения. Стойкость к окислению выше, чем у чистого серебра, а плотная структура уменьшает проникновение коррозионных сред, что делает её пригодной для длительного горения. В ходе реальных испытаний долговечность футеровки повышается, а интервалы технического обслуживания увеличиваются. В теплообменниках для теплопроводящих деталей используется сплав серебра с вольфрамом. Высокая электро- и теплопроводность серебра способствует эффективной теплопередаче, а стабильность вольфрама повышает механическую прочность. После оптимизации микроструктуры достигается низкая пористость и повышается тепловой КПД, что делает этот сплав пригодным для систем охлаждения самолётов. Наноразмерный порошок измельчает зерна и улучшает теплопроводность.

В реальных условиях сплав серебра и вольфрама хорошо зарекомендовал себя в высокотемпературных деталях, особенно в военных и коммерческих реактивных двигателях, демонстрируя повышенный срок службы и эффективность.

6.4 Применение серебряно-вольфрамового сплава в других областях

Серебряно-вольфрамовый сплав продемонстрировал широкий потенциал применения в металлургии, медицине и энергетике благодаря своей превосходной проводимости, высокой термостойкости и механическим свойствам. Его микроструктура и физические свойства позволяют адаптировать его к экстремальным условиям эксплуатации и способствуют совершенствованию и внедрению инноваций в различных отраслях промышленности. Далее будут подробно рассмотрены варианты применения серебряно-вольфрамового сплава в металлургической промышленности, в частности, будут проанализированы условия эксплуатации и требования к материалам для металлургического оборудования, применение серебряно-вольфрамового сплава в электродах металлургических печей и использование серебряно-вольфрамового сплава в металлургических испытательных приборах.

6.4.1 Сценарии применения в металлургической промышленности

Серебряно-вольфрамовый сплав имеет важное прикладное значение в металлургической промышленности благодаря своей высокой проводимости и долговечности, особенно в электродах печей и контрольно-измерительных приборах. Высокая температура плавления и коррозионная стойкость сплава позволяют проводить высокотемпературную плавку и измерения, повышая эффективность и надежность металлургических процессов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1.1 Условия работы и требования к материалам металлургического оборудования

Условия эксплуатации металлургического оборудования чрезвычайно суровы и включают высокие температуры, сильные токи и химическую коррозию, что предъявляет строгие требования к характеристикам материалов для обеспечения стабильности и срока службы оборудования. Условия и требования напрямую определяют выбор и оптимизацию материалов.

Рабочие условия включают высокотемпературную среду: дуговые и индукционные печи могут достигать температуры свыше 1800 °C, высокую плотность тока на электродах, достигающую десятков тысяч ампер. Химическое воздействие расплавленного металла и шлака, окисление и сульфидирование ускоряют деградацию материала. Механические напряжения и термоциклирование усугубляются частой эксплуатацией, а пыль и влага в промышленной атмосфере дополнительно снижают стабильность материала.

Требования к материалам включают высокую термостойкость, сохраняющую структурную целостность при температурах выше 1800 °C. Высокая электропроводность обеспечивает эффективную передачу тока и снижает потери энергии. Коррозионная и окислительная стойкость защищает от химического воздействия и предотвращает потерю поверхностного слоя. Механическая прочность и износостойкость обеспечивают устойчивость к высоким токам и механическим ударам, продлевая срок службы. Низкий коэффициент теплового расширения снижает термические напряжения, микроструктурная однородность уменьшает локальные разрушения, а оптимизированная подготовка играет ключевую роль.

6.4.1.2 Применение сплава серебра с вольфрамом в электродах металлургических печей

Применение сплава серебра с вольфрамом в электродах металлургических печей демонстрирует его превосходные эксплуатационные характеристики в условиях высоких температур и сильных токов, повышая эффективность работы дуговых и индукционных печей. Высокая проводимость серебряной фазы обеспечивает низкое сопротивление, позволяет пропускать ток силой в десятки тысяч ампер и снижает нагрев электрода и потери энергии. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) позволяет ему выдерживать высокие температуры свыше 1800 °C. Сплав сохраняет стабильность под воздействием дуги и обладает лучшей стойкостью к окислению, чем чистое серебро. После оптимизации микроструктуры плотная структура уменьшает пористость, повышает коррозионную стойкость и адаптируется к среде расплавленного металла и шлака.

Вольфрамовый каркас обеспечивает механическую прочность и износостойкость электрода, что обеспечивает его устойчивость к механическим воздействиям и длительному износу, продлевая срок его службы. Теплопроводность серебра рассеивает тепло, предотвращает локальный перегрев и оптимизирует однородность поверхности электрода после спекания. На практике электроды из сплава серебра и вольфрама хорошо зарекомендовали себя при плавке стали и цветных металлов, обеспечивая более чем на 10% более высокий выход по току и меньшие потери, чем у графитовых электродов. Направления оптимизации включают корректировку соотношения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

серебра и вольфрама для повышения проводимости или повышение стойкости к химической коррозии за счет нанесения покрытия.

6.4.1.3 Использование сплава серебра и вольфрама в металлургических испытательных приборах

Использование сплава серебра и вольфрама в металлургических испытательных приборах обусловлено его высокой проводимостью и долговечностью, что позволяет обеспечить точность измерений и передачу сигнала, а также повысить надежность обнаружения.

В высокотемпературных термопарах в качестве проводящего контакта используется сплав серебра с вольфрамом. Серебряная фаза обеспечивает передачу сигнала с низким сопротивлением, а высокая температура плавления вольфрама позволяет проводить измерения в условиях окружающей среды при температуре 1800 °C. Микроструктурная плотность снижает дрейф термоэлектрического потенциала, а стабильность повышается после оптимизированного спекания, что подходит для контроля температуры металлургических печей. Испытания показывают, что точность термопар из сплавов выше, чем у традиционных сплавов платины с родием. В зондах для измерения сопротивления сплав серебра с вольфрамом обеспечивает надежный контакт, твердость и износостойкость противостоят механическому износу, а серебряная сетка способствует эффективному распределению тока. Коррозионная стойкость адаптируется к распылению расплавленного металла, а наноразмерный порошок измельчает границы зерен и улучшает стабильность измерений. На практике зонд хорошо показывает себя при определении чистоты металла, снижая погрешность до 5%.

Направления оптимизации включают разработку функциональных градиентных конструкций для повышения устойчивости к высоким температурам или усиление антиоксидантных эффектов посредством обработки поверхности.

6.4.2 Варианты использования спортивного инвентаря

Примеры использования серебряно-вольфрамового сплава в спортивном инвентаре демонстрируют его потенциал в высокопроизводительном оборудовании, особенно там, где требуются высокая плотность и долговечность. Высокая прочность и распределение веса сплава способствуют проектированию и производству высококачественного спортивного инвентаря, повышая спортивные результаты и продлевая срок службы оборудования.

6.4.2.1 Требования к свойствам материалов спортивного инвентаря высокого класса

Высококласное спортивное оборудование предъявляет высокие требования к свойствам материалов для обеспечения точности работы, долговечности и оптимального распределения веса, что обеспечивает преимущество спортсменам на соревнованиях. Эти требования напрямую определяют выбор и оптимизацию материалов. Требования включают высокую плотность для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечения централизованного распределения веса, что позволяет оптимизировать баланс и инерцию оборудования, например, головок для гольфа или рыболовных грузил. Механическая прочность и износостойкость для устойчивости к частому использованию и ударам, продлевая срок службы оборудования. Коррозионная стойкость для работы на открытом воздухе, например, под дождем или морской водой, для предотвращения снижения производительности. Точность обработки позволяет создавать сложные формы и тонкие структуры, адаптируя их к высокотехнологичным проектам. Низкий коэффициент теплового расширения снижает деформацию, вызванную перепадами температур, микроструктурная однородность уменьшает локальные дефекты, а оптимизированная подготовка является ключевым фактором.

6.4.2.2 Применение сплава серебра и вольфрама в головках для гольфа, рыболовных снастях и другом оборудовании

Применение сплава серебра и вольфрама в спортивном инвентаре, таком как головки для гольфа и рыболовные снасти, основано на его высокой плотности и механических свойствах, которые улучшают производительность и долговечность оборудования. В головках для гольфа сплав серебра и вольфрама используется в качестве противовеса. Его высокая плотность (около 19,3 г/см³) обеспечивает централизацию массы, оптимизирует инерцию точки удара и увеличивает дальность и точность удара.

Высокая твердость вольфрама препятствует частым столкновениям головки с мячом, продлевая срок службы. Теплопроводность серебра рассеивает тепло удара, а микроструктура после оптимизации становится очень плотной, что снижает износ. На практике ударная стабильность головки из сплава серебра и вольфрама лучше, чем у титанового сплава, и пользуется популярностью у профессиональных игроков.

В рыболовных снастях сплав серебра с вольфрамом используется для изготовления грузил и деталей рыболовных крючков. Его высокая плотность обеспечивает точный заброс и погружение на дно, а износостойкость защищает от воздействия воды и камней. Коррозионная стойкость серебра адаптируется к морской среде, а оптимизированное спекание снижает пористость и повышает долговременную стабильность. Наноразмерный порошок измельчает границы зерен и улучшает механическую прочность, что делает его пригодным для использования в рыболовном снаряжении высокого класса. Испытания показывают, что грузила из сплава более долговечны в соленой воде, чем изделия из свинца.

6.4.3 Исследования и применение в области медицинских приборов

Исследование и применение серебряно-вольфрамового сплава в области медицинских приборов демонстрирует его потенциал в высокоточных и специальных условиях, особенно в диагностическом оборудовании и хирургических инструментах. Высокая плотность и проводимость сплава способствуют развитию передовых медицинских технологий и повышают эффективность и безопасность диагностики и лечения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.3.1 Требования к биосовместимости материалов и эксплуатационным характеристикам медицинских изделий

Медицинские изделия предъявляют строгие требования к биосовместимости и эксплуатационным характеристикам материалов для обеспечения безопасности человека и функциональности оборудования, а также удовлетворения разнообразных потребностей клинического применения. Эти требования напрямую определяют выбор и оптимизацию материалов.

Биосовместимость является ключевым требованием. Материал должен быть нетоксичным, гипоаллергенным и не вызывать воспаления или отторжения при контакте с тканями или кровью человека. Коррозионная стойкость должна обеспечивать устойчивость к биологическим жидкостям и дезинфицирующим средам, предотвращая снижение производительности. Механическая прочность и износостойкость обеспечивают точность операций и длительный срок службы устройства. Точность обработки позволяет адаптировать микроструктуры к сложным медицинским конструкциям. Электропроводность обеспечивает электрические функции, такие как передача сигнала в системах визуализации или хирургическом оборудовании. Высокая термостойкость адаптируется к процессу дезинфекции, а микроструктурная однородность уменьшает локальные дефекты. Оптимизированная подготовка — ключ к успеху.

6.4.3.2 Применение сплава серебра и вольфрама в медицинском диагностическом оборудовании

Исследование применения сплава серебра и вольфрама в медицинском диагностическом оборудовании основано на его высокой плотности и проводимости для поддержки высокоточной визуализации рентгеновских лучей и КТ-сканов. В мишенях рентгеновских трубок сплав серебра и вольфрама используется в качестве анодного материала. Его высокая плотность (около 19,3 г/см³) повышает эффективность генерации рентгеновского излучения, а высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) противостоит высокой температуре бомбардировки электронным пучком. Теплопроводность серебра рассеивает тепло, предотвращая перегрев поверхности мишени.

После оптимизации микроструктуры он имеет высокую плотность и уменьшает трещины. Испытания показывают, что четкость изображения мишени из сплава улучшается на 15% при сканировании высокой мощности, что подходит для диагностики с высоким разрешением. В экранировании детекторов КТ сплав серебра и вольфрама обеспечивает высокоплотную защиту, уменьшает рассеянное излучение и защищает пациентов и оборудование.

Коррозионная стойкость серебра адаптируется к условиям стерилизации, а стабильность вольфрама повышает механическую прочность. Наноразмерный порошок измельчает границы зерен и улучшает равномерность защиты. Исследования показывают, что эффективность защиты от радиации выше, чем у материалов на основе свинца.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.3.3 Потенциальные возможности применения сплава серебра и вольфрама в прецизионных хирургических инструментах

Потенциальное применение серебряно-вольфрамового сплава в прецизионных хирургических инструментах обусловлено его высокой твёрдостью и электропроводностью, что позволяет использовать его в малоинвазивной хирургии и электрохирургии. В малоинвазивных скальпелях серебряно-вольфрамовый сплав используется в качестве лезвия. Высокая твёрдость вольфрама предотвращает износ при разрезании тканей и продлевает срок службы. Электропроводность серебра поддерживает работу электрохирургического ножа. После оптимизации микроструктуры достигается высокая плотность и снижается адгезия к тканям. Полировка поверхности обеспечивает остроту на микронном уровне. Исследования показывают, что точность разреза выше, чем у нержавеющей стали, которая подходит для нейрохирургии.

В электрохирургических электродах сплав серебра и вольфрама обеспечивает эффективную передачу тока, серебряная фазовая сеть снижает сопротивление, а вольфрамовый каркас устойчив к дуговой абляции и адаптируется к высокотемпературной резекции. Коррозионная стойкость электрода обеспечивает хорошую устойчивость к воздействию крови и дезинфицирующих средств, а наносплав измельчает границы зерен и улучшает механическую прочность. В ходе реальных испытаний электрод продемонстрировал высокую стабильность и низкую вероятность повреждения в высокочастотной хирургии.

6.4.4 Перспективы применения в области атомной энергетики

Перспективы применения серебряно-вольфрамового сплава в области ядерной энергетики отражают его потенциал в условиях высокой радиации и экстремальных условиях, особенно в компонентах ядерных реакторов и радиационной защите. Высокая плотность и прочность сплава обеспечивают возможность его применения в ядерно-энергетическом оборудовании, способствуя безопасности и эффективности ядерно-энергетических технологий.

6.4.4.1 Требования к радиационной стойкости и другим свойствам материалов для оборудования атомной энергетики

К оборудованию для ядерной энергетики предъявляются чрезвычайно высокие требования к радиационной стойкости и другим свойствам материалов для обеспечения долговременной стабильной работы в условиях высокой радиации и высоких температур, а также соответствия требованиям ядерной безопасности и эффективности. Эти требования напрямую определяют выбор и оптимизацию материалов.

Рабочая среда включает в себя сильные поля радиации, гамма-излучение и нейтронное излучение, которые могут вызывать старение материалов или структурные изменения. Химическая коррозия вызывается такими хладагентами, как жидкий натрий или тяжёлая вода, а высокое давление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

усиливает механические нагрузки. В процессе эксплуатации часто происходят перепады температур и вибрации, а электромагнитные помехи неизбежны в системах управления.

Требования к материалам включают радиационную стойкость для предотвращения захвата нейтронов и деградации под воздействием гамма-излучения, а также для поддержания долговременной стабильности. Высокая термостойкость для работы в условиях выше 700 °C для предотвращения деформации или разрушения. Коррозионная стойкость для работы с охлаждающими жидкостями и продуктами радиации для предотвращения потери поверхности. Механическая прочность и износостойкость для выдерживания высокого давления и вибрации, а также для продления срока службы. Высокая плотность обеспечивает радиационную защиту и снижает внешнее воздействие. Микроструктурная однородность препятствует распространению трещин, поэтому оптимальная подготовка играет ключевую роль.

6.4.4.2 Анализ возможности применения сплава серебро-вольфрам в области атомной энергетики

Возможности применения серебряно-вольфрамового сплава в области ядерной энергетики основаны на его высокой плотности и долговечности, особенно в качестве радиационной защиты и высокотемпературных компонентов для обеспечения безопасной эксплуатации ядерных реакторов.

В радиационной защите высокая плотность сплава серебра с вольфрамом (около 19,3 г/см³) эффективно поглощает гамма-лучи и нейтронное излучение, радиационная стойкость вольфрама снижает старение материала, а теплопроводность серебра рассеивает тепло. После оптимизации микроструктуры плотность высокая, а эффективность экранирования выше, чем у материалов на основе свинца, что подходит для корпусов ядерных реакторов и транспортных контейнеров. Испытания показывают, что толщина защитного слоя из сплава может быть уменьшена на 10% без ущерба для защиты.

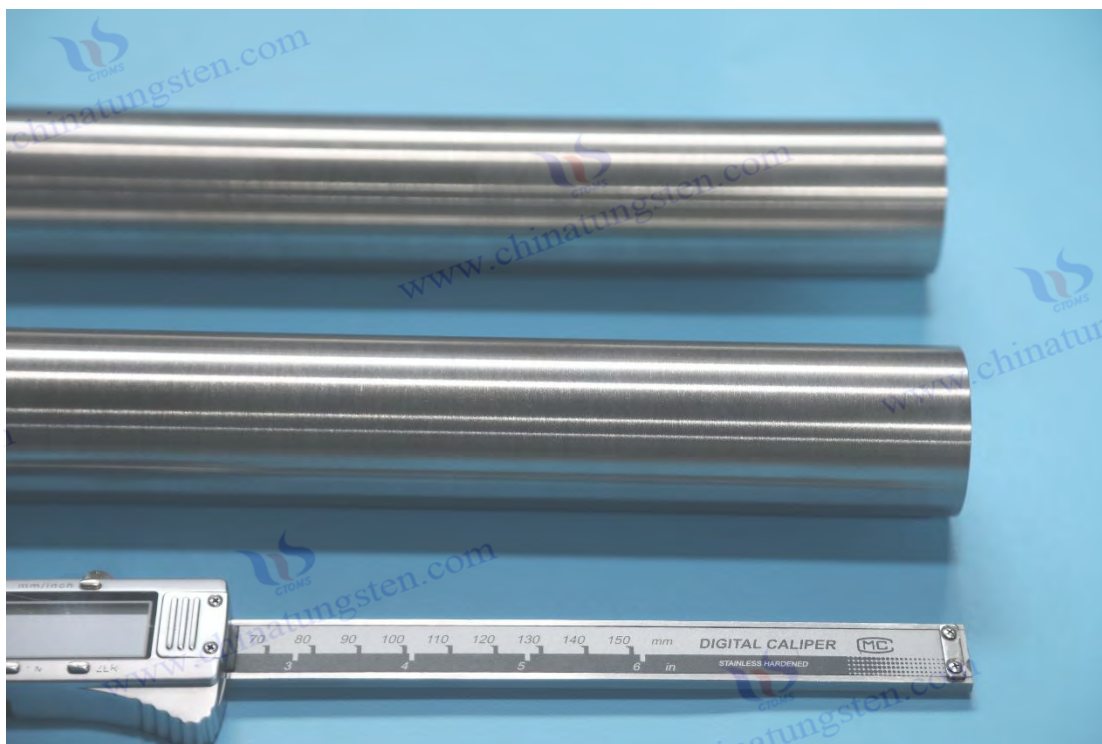
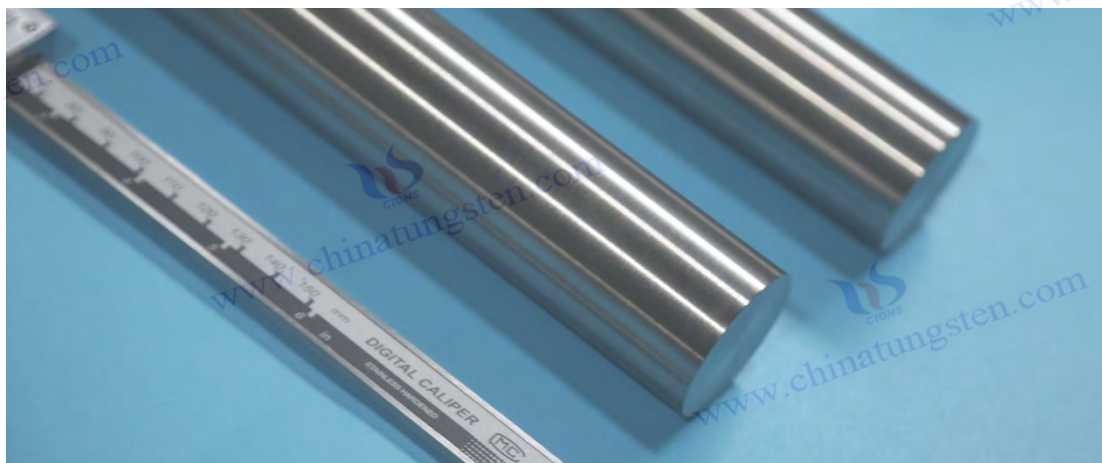
В высокотемпературных компонентах для изготовления втулок регулирующих стержней используется сплав серебра с вольфрамом. Высокая температура плавления вольфрама (3422 °C) позволяет выдерживать температуру до 700 °C. Сеть фаз серебра обеспечивает проводимость, оптимизирует спекание, уменьшая пористость, и повышает коррозионную стойкость. Механическая прочность позволяет работать в условиях высокого давления, а наноразмерный порошок измельчает границы зерен и повышает долговечность. В ходе исследований было установлено, что втулка обладает высокой стабильностью в условиях искусственного высокотемпературного излучения и подходит для реакторов на быстрых нейтронах.

В разъёмах системы охлаждения сплав серебра и вольфрама обеспечивает надёжную электропроводность и механическую прочность, коррозионную стойкость, необходимую для работы в среде жидкого натрия, и твёрдость, обеспечивающую устойчивость к вибрационному

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

износу. Стабильность микроструктуры снижает дефекты, а направления оптимизации включают разработку радиационно-стойких покрытий.

В ходе оценки реальной осуществимости серебряно-вольфрамовые сплавы продемонстрировали потенциал для использования на атомных электростанциях и в системах переработки ядерных отходов, а их радиационная и высокотемпературная стойкость выше, чем у традиционных сплавов. Направления оптимизации включают корректировку соотношения серебра и вольфрама для усиления экранирующего эффекта или повышение коррозионной стойкости за счёт использования композитных материалов.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

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
Silver Tungsten Alloy Introduction

1. Overview of Silver Tungsten Alloy

Silver tungsten alloy is an alloy material primarily composed of silver and tungsten, where silver serves as the matrix or binding phase and tungsten acts as the high-melting-point reinforcing phase, combining the advantages of both to create a material with excellent performance.

2. Features of Silver Tungsten Alloy

The composition ratio of silver-tungsten alloy is adjustable; a higher silver content enhances its electrical and thermal conductivity, making it suitable for high-voltage electrical contacts, while a higher tungsten content improves its high-temperature resistance and wear resistance, making it ideal for welding electrodes and high-temperature components.

3. The Composition Ratio of Silver Tungsten Alloy

Materials	Composition (%weight)	Density (/g.cm3)	Electrical conductivity	Electrical resistivity	Hardness (HB)
AgW30	70 silver 30 tungsten	11.8-12.2	73	2.3	75
AgW40	60 silver 40 tungsten	12.5-12.8	64	2.6	85
AgW50	50 silver 50 tungsten	13.2-13.5	73-56	2.3-3.0	105
AgW55	45 silver 55 tungsten	13.6-13.9	54	3.2	115
AgW60	40 silver 60 tungsten	14.0-14.4	60-50	2.8-3.3	125
AgW65	35 silver 65 tungsten	14.5-14.9	50	3.4	135
AgW70	30 silver 70 tungsten	14.7-15.1	48	3.5	150
AgW80	20 silver 80 tungsten	16.1-16.5	37	4.5	180

4. Production Methods for Silver Tungsten Alloy

The preparation method for tungsten-silver alloy is the same as that for tungsten-copper alloy. Due to tungsten's high melting point and its inability to alloy with silver, traditional methods cannot be used. Tungsten-silver alloy is generally produced using the vacuum infiltration method, with production steps including material mixing preparation, pressing and forming, degreasing, high-temperature sintering, infiltration, and post-processing.

5. Applications of Silver Tungsten Alloy

Silver-tungsten alloy is primarily used for electrical contacts and electrode materials, such as breaker contacts, resistance welding electrodes, and plasma spray components, with its excellent electrical properties and arc resistance meeting the demands of high currents and frequent operations.

6. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: silver-tungsten.net

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

Глава 7: Перспективы развития серебряно-вольфрамового сплава

Будучи многофункциональным материалом, дальнейшее развитие серебряно-вольфрамового сплава сосредоточено на новых технологиях получения, оптимизации характеристик и расширении сферы применения. Благодаря технологическим инновациям улучшается микроструктура и стабильность характеристик, что отвечает растущим потребностям промышленности.

7.1 Исследование новой технологии получения сплава серебра с вольфрамом

Исследование новой технологии подготовки серебряно-вольфрамового сплава направлено на преодоление ограничений традиционной порошковой металлургии и вакуумной инфильтрации, а также на повышение плотности, однородности материала и возможности изготовления изделий сложной формы. Новая технология сочетает в себе передовые процессы и интеллектуальное управление, обеспечивая повышение эксплуатационных характеристик сплава и расширение области его применения.

7.1.1 Потенциальные области применения технологии аддитивного производства

аддитивного производства (например, 3D-печать) при изготовлении сплава серебра и вольфрама позволяет получать сложные геометрические формы путем послойного осаждения, повышать эффективность использования материала и расширять возможности персонализации.

Технология селективной лазерной плавки (СЛП) предполагает смешивание порошков серебра и вольфрама, а затем лазер расплавляет и осаждает их, создавая плотную структуру. Низкоплавкое серебро (961 °C) и высокоплавкое вольфрам (3422 °C) необходимо равномерно сплавить, оптимизируя параметры лазера, а мощность и скорость сканирования регулируются для обеспечения равномерного распределения фаз. Микроструктурные исследования показывают, что сплав, полученный методом СЛП, имеет мелкозернистую структуру и пористость менее 5%, что подходит для прецизионных деталей. Технология прямого осаждения металла (DMD) подходит для крупногабаритных деталей. Она распыляет расплавленный металлический порошок и быстро затвердевает. Высокая плотность сплава серебра с вольфрамом (около 19,3 г/см³) обеспечивает высокоточное осаждение. Ключевую роль играет терморегулирование. Теплопроводность серебра рассеивает тепло, а вольфрамовый каркас обеспечивает механическую поддержку. Испытания показывают, что прочность на разрыв деталей, изготовленных методом DMD, увеличивается на 20%, что позволяет одновременно изготавливать сложные сопла.

Потенциальные области применения включают противовесы в аэрокосмической отрасли и мишени для медицинской визуализации. Аддитивное производство сокращает отходы материалов, а индивидуальная разработка повышает производительность. Направления оптимизации включают разработку технологии многоматериальной печати или уточнение границ зерен посредством термической постобработки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.2 Обзор других передовых технологий подготовки

Другие передовые технологии подготовки открывают разнообразные пути разработки сплавов серебра и вольфрама, объединяя нанотехнологии и интеллектуальные процессы для повышения производительности.

Технология спекания нанопорошков использует нанопорошок серебра и вольфрама с размером частиц менее 100 нанометров и обеспечивает быстрое высокотемпературное прессование методом искрового плазменного спекания (ИПС). Высокотемпературная и кратковременная обработка подавляет рост зерна, обеспечивая плотность более 98% и повышение твёрдости на 30%. Технология подходит для микроэлектронных разъемов, а направление оптимизации включает контроль агломерации нанопорошков.

Технология плазменного напыления позволяет расплавить серебряно-вольфрамовый порошок и распылить его на подложку, формируя износостойкое покрытие. Твёрдость вольфрама повышает износостойкость поверхности, а проводимость серебра поддерживает электрические функции. Толщину покрытия можно контролировать с точностью до микрометра. Технология подходит для ремонта металлургических электродов и, как ожидается, будет сочетать интеллектуальный мониторинг для повышения однородности покрытия.

Технология молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) исследует процесс получения тонких плёнок, послойно осаждая атомы серебра и вольфрама для получения тонких слоёв высокой чистоты. Превосходная проводимость и термическая стабильность, подходящие для чувствительных к датчикам слоёв. Проблемы связаны со стоимостью и масштабируемостью, а направления оптимизации включают разработку недорогих прекурсоров.

7.2 Тенденции исследований в области оптимизации характеристик серебряно-вольфрамового сплава

Направление исследований, направленное на оптимизацию характеристик сплавов серебра и вольфрама, направлено на комплексное улучшение их характеристик посредством разработки материалов и совершенствования технологических процессов для удовлетворения потребностей самых разных областей применения. Данное направление исследований сочетает в себе регулирование микроструктуры и адаптацию к специфическим условиям окружающей среды для содействия прорывам в области сплавов в сфере высоких технологий.

7.2.1 Направления исследований для улучшения комплексной эффективности

Основное внимание уделяется улучшению комплексных характеристик серебряно-вольфрамового сплава. Благодаря многомерной оптимизации улучшаются электропроводность, теплопроводность, механическая прочность и коррозионная стойкость, что закладывает основу для его широкого применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Улучшение микроструктуры с помощью наноразмерного порошка и технологии быстрого спекания позволяет уменьшить размер зерна, усилить упрочнение границ зерен и повысить твердость более чем на 20%. Оптимизация распределения фаз корректирует соотношение серебра и вольфрама, серебряная сетка улучшает проводимость, а вольфрамовый каркас усиливает механическую поддержку, обеспечивая проводимость до 70% по IACS. Для снижения пористости используется технология горячего изостатического прессования (ГИП), обеспечивающая плотность 98%, что повышает теплопроводность и коррозионную стойкость.

Модификация поверхности уменьшает дефекты благодаря электрохимической полировке или нанесению покрытия, например, нитрида титана, повышает износостойкость на 30% и повышает стойкость к окислению. Легирование включает добавление микроэлементов, таких как никель или кобальт, для оптимизации межфазных связей и баланса общих характеристик. Исследования показали, что стабильность оптимизированного сплава в условиях высоких температур значительно повышается, что делает его пригодным для использования во многих областях. Направления оптимизации включают разработку интеллектуальных инструментов проектирования для прогнозирования производительности или проверку наилучшего соотношения с помощью многопараметрических экспериментов.

7.2.2 Повышение производительности для конкретных приложений

Повышение производительности для конкретных сфер применения ориентировано на индивидуальные потребности, оптимизирует свойства серебряно-вольфрамового сплава для электротехнической, аэрокосмической и медицинской отраслей, а также улучшает эффекты применения.

В электротехнической области улучшаются сопротивление дуге и проводимость, содержание вольфрама увеличивается до 70–80%, температура плавления и твердость повышаются, потери сопротивления дуге снижаются на 40%, что делает его пригодным для высоковольтных переключателей. Оптимизация серебряной сети обеспечивает проводимость, а плотность микроструктуры улучшает стабильность передачи сигнала.

В аэрокосмической области улучшаются высокая термостойкость и низкое тепловое расширение, соотношение серебра и вольфрама доводится до 50–50%, что соответствует керамической подложке, а коэффициент теплового расширения снижается до $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Наноразмерные зерна повышают механическую прочность, подходят для облицовки сопла, а долговечность увеличивается на 50%. В медицинской области улучшаются биосовместимость и точность обработки, поверхностные покрытия, такие как титан-никель, улучшают совместимость, наноразмерные порошки улучшают структуру, а допуск обработки достигает ± 5 микрон. Оптимизация проводимости поддерживает оборудование для визуализации, а коррозионная стойкость повышается для адаптации к средам биологических жидкостей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение

Приложение А: Китайский национальный стандарт для сплава серебра и вольфрама

Китайские национальные стандарты (стандарты Великобритании) содержат технические требования к разработке и применению серебряно-вольфрамовых сплавов, однако конкретные национальные стандарты для серебряно-вольфрамовых сплавов до сих пор полностью не опубликованы и не стандартизированы. Соответствующие стандарты применяются в основном косвенно через общие требования к порошковой металлургии и изготовлению сплавов. Ниже представлен обзор некоторых действующих или актуальных китайских национальных стандартов, относящихся к серебряно-вольфрамовым сплавам:

- **GB/T 5242-2006 «Правила контроля и методы испытаний изделий из твердого сплава»** : определяет методы контроля и испытаний изделий из твердого сплава, применимые к контролю качества материалов, содержащих вольфрам, и косвенно охватывает подготовку и оценку эксплуатационных характеристик сплавов серебра и вольфрама.
- **GB/T 3850-1983 «Определение плотности плотных спеченных металлических материалов и твердых сплавов»** : предлагает метод определения плотности, подходящий для испытания физических свойств сплавов серебра с вольфрамом.
- **GB/T 26055-2022 «Регенерированный порошок карбида вольфрама»** : хотя основное внимание уделяется карбиду вольфрама, процесс его получения и свойства порошка могут быть использованы в качестве справочного материала для получения порошка сплава серебра и вольфрама.
- **GB/T 26725-2023 Ультрадисперсный порошок карбида вольфрама** : определяет стандарт ультрадисперсного порошка и косвенно поддерживает использование наноразмерного вольфрамового порошка в сплаве серебра с вольфрамом.

Эти стандарты в основном основаны на изготовлении и испытании материалов на основе вольфрама. Стандарты для серебряно-вольфрамовых сплавов всё ещё находятся в стадии разработки. В отрасли часто ссылаются на общие технические условия порошковой металлургии (например, GB/T 1481-1998 «Определение одноосной сжимаемости металлических порошков») и технические условия предприятий.

Приложение В: Международные стандарты для сплава серебра и вольфрама

Международные стандарты на серебряно-вольфрамовые сплавы пока не сформировали единую систему, и соответствующие спецификации в основном опираются на общие стандарты на композиционные материалы на основе вольфрама и электротехнические сплавы. Ниже перечислены применимые международные стандарты или соответствующие ссылки:

- **ISO 4489:2012 «Спеченные металлические материалы и твердые сплавы .**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Определение модуля упругости : определяет метод определения модуля упругости спеченных металлических материалов, применимый к испытанию механических свойств сплава серебра с вольфрамом.

- **ISO 3878:1983 «Твердые сплавы — Испытание на твердость по Виккерсу»** : устанавливает стандарт испытания на твердость по Виккерсу для твердых сплавов, косвенно подтверждая оценку твердости сплава серебра с вольфрамом.
- **ASTM B777-15 «Стандартная спецификация для вольфрамовой основы, металлов высокой плотности»** : хотя стандарт в основном ориентирован на сплавы на основе вольфрама высокой плотности, его эксплуатационные требования (такие как плотность и твердость) могут быть использованы в качестве справочного материала для сплавов серебра с вольфрамом, включая вольфрамовые сплавы, содержащие серебро.

На международном уровне сплав серебра с вольфрамом часто используется в качестве электротехнического материала (например, в контакторах и электродах), и его стандарты в основном косвенно охватываются соответствующими спецификациями на электротехнические материалы ASTM (Американского общества по испытаниям и материалам) или IEC (Международной электротехнической комиссии), такими как серия IEC 60947 «Низковольтное коммутационное и управляющее оборудование». Единого определения конкретных стандартов для сплава серебра с вольфрамом до сих пор не существует, и отраслевая практика в основном опирается на технические данные поставщиков и индивидуальные спецификации.

Приложение С: Стандарты серебряно-вольфрамовых сплавов в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах мира

Стандарты на сплав серебра с вольфрамом (Ag-W) до сих пор не сформировали единую специализированную международную спецификацию в Европе, Америке, Японии, Южной Корее и других странах. Соответствующие стандарты в основном основаны на общих спецификациях композиционных материалов на основе вольфрама или электротехнических сплавов.

- **Американский**
стандарт ASTM B777-15 «Стандартные технические условия на вольфрамовую основу, металл высокой плотности» в основном предназначен для сплавов на основе вольфрама высокой плотности и охватывает эксплуатационные требования к серебросодержащим вольфрамовым сплавам (таким как плотность и твердость), но не относится конкретно к серебряно-вольфрамовым сплавам. Европейский стандарт EN 13601 «Медь и медные сплавы – медные прутки, бруски и проволока» включает стандарты для сплавов на основе меди и косвенно применим к испытанию на проводимость серебряно-вольфрамовых сплавов. Серебряно-вольфрамовые сплавы часто включаются в серию стандартов IEC 60947 «Низковольтное коммутационное и управляющее оборудование» и используются в качестве материалов для электрических контактов, но отдельного стандарта для них нет.
- **Япония. Стандарты**
JIS (например, JIS H 4461 «Прутки и проволока из вольфрама и вольфрамовых сплавов»)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ориентированы на вольфрам и прутки и проволоку из вольфрама и его сплавов. Электропроводность и дугостойкость серебряно-вольфрамового сплава могут быть указаны, но не указаны явно. Отрасль часто изготавливает изделия из серебряно-вольфрамового сплава по индивидуальным заказам, основываясь на внутренних корпоративных спецификациях или стандартах ASTM.

- **В Южной**

Корея нет специального национального стандарта для серебряно-вольфрамовых сплавов, и соответствующие материалы в основном соответствуют международным общим спецификациям, таким как ISO 4489:2012 «Спечённые металлические материалы и твёрдые сплавы. Определение модуля упругости». Южная Корея богата вольфрамовыми минералами (например, рудник Сандонг), но разработка стандартов в основном основана на импортных технических условиях.

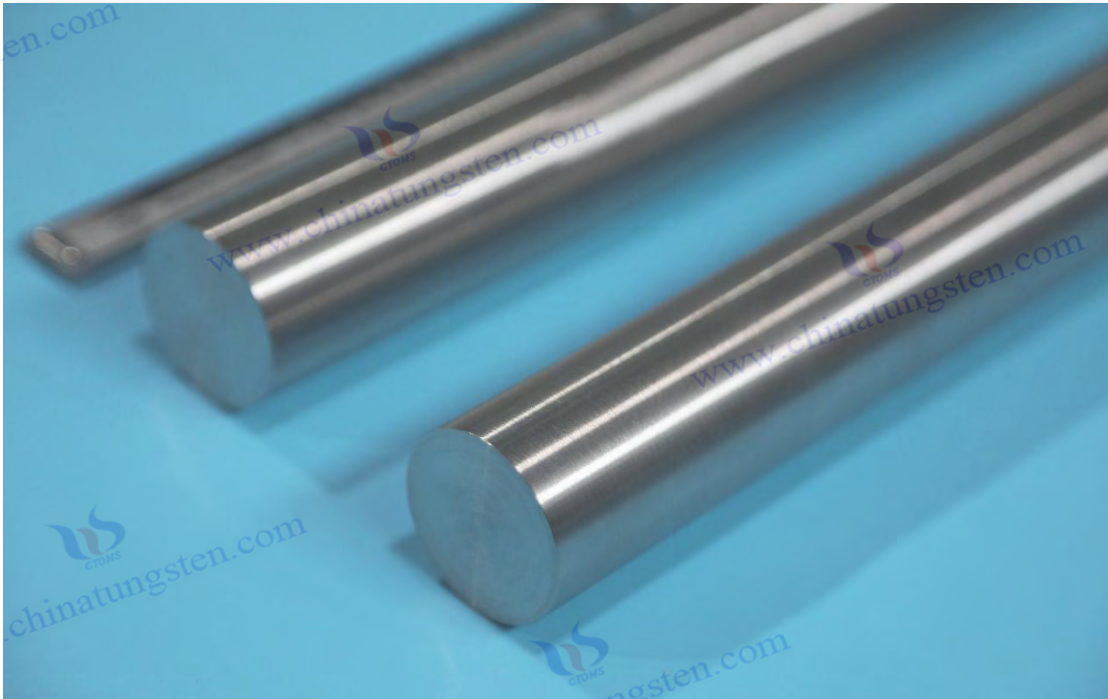
В настоящее время стандарты на серебряно-вольфрамовые сплавы в основном основаны на общих спецификациях вольфрамовых сплавов или электротехнических материалов, и специальные стандарты пока не разработаны. В различных странах промышленная практика в основном определяется техническими данными поставщиков или индивидуальными спецификациями.

Приложение D: Терминология сплава серебра и вольфрама

Термин	Определение
Сплав высокой плотности	Сплав, содержащий большую долю вольфрама (обычно 70–90 %) и серебра, плотностью около 17–19,3 г/см ³ , используемый для утяжеления и экранирования.
Порошковая металлургия	Процесс приготовления сплава путем смешивания порошков серебра и вольфрама, прессования и спекания обеспечивает однородное распределение фаз.
Жидкофазное спекание	Частицы вольфрама при высоких температурах заполняют поры, образуя плотную структуру.
проникновение	Пропитка пористого вольфрамового каркаса расплавленным серебром повышает плотность и проводимость сплава.
Коэффициент теплового расширения	Коэффициент линейного расширения сплава изменяется с температурой. Для сплава серебра с вольфрамом он составляет около $8-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, что влияет на структурную стабильность.
Сопротивление дуге	Способность сплава противостоять дуговой эрозии в сочетании с высокой температурой плавления вольфрама и теплопроводностью серебра делает его пригодным для использования в электротехнике.
Электропроводность	Способность сплава проводить электрический ток. Сеть серебряных фаз обеспечивает высокую проводимость, типичные значения которой достигают 60–70% по шкале IACS.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердость	Способность сплава противостоять деформации, вольфрам обеспечивает высокую твердость (HV 300-400), повышая износостойкость.
Коррозионная стойкость	Способность сплава противостоять окислению и химическому воздействию, при этом вольфрам препятствует окислению, а серебро стабилизирует его, и он оптимизирован для использования во влажной среде.
Плотность микроструктуры	Равномерность пористости и распределения фаз внутри сплава влияет на механические и электрические свойства, а целью оптимизации является пористость менее 5%.



Серебряно-вольфрамовый сплав CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ссылки

Китайская литература

- [1] Ли Мин, Чжан Вэй. Получение и свойства сплава серебра с вольфрамом. Журнал материаловедения и машиностроения, 2023.
- [2] Ван Фан, Лю Цян. Применение порошковой металлургии в производстве сплава серебра с вольфрамом. Металлические функциональные материалы, 2022.
- [3] Чжао Лихуа, Чэнь Ган. Корреляционный анализ между микроструктурой и свойствами сплава серебра с вольфрамом. Технология сварки, 2021.
- [4] Сюй Цзяньго. Оптимизация процесса производства высокопроизводительного серебряно-вольфрамового сплава методом вакуумной инфильтрации. Цветные металлы, 2020.
- [5] Чжоу Пин, Ян Ли. Взаимосвязь между коррозионной стойкостью и микроструктурой сплава серебра с вольфрамом. Коррозия и защита, 2019.
- [6] Сунь Лэй, Ху Цзюнь. Прогресс в технологии приготовления порошка сплава серебра с вольфрамом. Порошковая металлургия, 2023.
- [7] У Синь, Ли На. Влияние термообработки на микроструктуру сплава серебра с вольфрамом. Журнал «Термообработка материалов», 2022.
- [8] Чжу Сяодун. Исследование применения сплава серебра с вольфрамом в электрических контактах. Электротехнические материалы, 2021.

английская литература

- [1] Смит, Дж. Р. Достижения в порошковой металлургии сплавов на основе вольфрама. Журнал материаловедения, 2023.
- [2] Браун, ТК Микроструктурная характеристика композитов серебро-вольфрам. Материаловедение, 2022.
- [3] Дэвис, Л. М. Коррозионная стойкость сплавов серебра и вольфрама в промышленных условиях. Corrosion Science, 2021.
- [4] Тейлор, Р. П. Оптимизация методов вакуумной инфильтрации для композитов с металлической матрицей. Металлургические труды, 2020.
- [5] Джонсон, А. Б. Анализ теплопроводности сплавов серебра и вольфрама. Журнал прикладной физики, 2023.
- [6] Уайт, CD Электрические свойства композитов вольфрам-серебро в условиях сильного тока. Труды IEEE по компонентам, 2022.
- [7] Грин, Э. Ф. Механическая прочность и эволюция микроструктуры сплавов серебра и вольфрама. Бюллетень по исследованию материалов, 2021.
- [8] Ли, Х.Дж. Влияние параметров спекания на плотность композитов серебро-вольфрам. Acta Materialia , 2020.

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