

УДК 669.27:621.762.8

Ю.М.Королев, В.А.Соргин, В.С.Фастовский

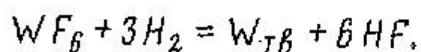
КОМБИНИРОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ГАЗОФАЗНОГО  
ВОЛЬФРАМА

Прогресс в современных отраслях машиностроения и электронного приборостроения обусловил расширение областей применения тугоплавких металлов и различных комбинированных материалов на их основе. Одновременно наблюдается тенденция повышения требований к физико-механическим и служебным характеристикам этого класса материалов, среди которых особое место принадлежит вольфраму. Однако его уникальные теплофизические и механические характеристики используются до сего времени не в полной мере из-за склонности к низкотемпературной хрупкости, высокой окисляемости и недостаточной жаропрочности изготавливаемых из него изделий и полуфабрикатов. Перечисленные факторы сдерживают практическое использование вольфрама и его сплавов во многих областях техники.

Вместе с тем благодаря успехам современного материаловедения [1,2], нетрадиционным подходам к процессам легирования и созданию сплавов со специальными свойствами [3], новым направлениям в технологии обработки металлов давлением [4] наметились определенные тенденции повышения низкотемпературной пластичности вольфрама, его жаропрочности, длительной прочности и др. Однако результаты, достигнутые материаловедением, все еще не обеспечивают существенного подъема потолка рабочих температур, давлений и сопротивления окисляемости изделий из вольфрама, работающих в экстремальных условиях, в том числе при длительных термоциклических нагрузках, интенсивной электронной бомбардировке в глубоком вакууме и воздействии знакопеременных напряжений.

Одним из изделий, работающих в экстремальных условиях, является вращающийся анод рентгеновской диагностической трубы, на фокусной дорожке которого развивается температура, достигающая  $3000^{\circ}\text{C}$ . Приведенные выше условия его эксплуатации свидетельствуют о том, что радикальное повышение служебных характеристик изделий подобного типа может быть достигнуто лишь при условии повышения жаропрочности, длительной прочности, низкотемпературной пластичности и эрозионной стойкости вольфрама. Поставленная задача может быть решена путем создания сплава, обладающего комплексом требуемых свойств, и выбором рациональных схем его термомеханической обработки. Альтернативным вариантом является создание комбинированного материала, в котором должны быть реализованы лучшие качества входящих в его состав отдельных компонентов.

Нами при создании долговечных и надежных вращающихся анодов, работающих в экстремальных условиях, предпочтение отдано комбинированному материалу. В качестве основы комбинированного материала был выбран газофазный вольфрам, плотность которого, теплофизические характеристики и химическая чистота отвечают требованиям, предъявляемым к материалам такого класса [4]. В качестве армирующего элемента использовали горячекатаные полосы из спеченного вольфрама сечением  $2 \times 30$  мм и длиной до 500 мм. Суммарная степень деформации полос составляла 60–70%, прочность на растяжение – 900–1000 МПа. На эти полосы равномерно по всему сечению методом газофазного осаждения наносили слои вольфрама заданной толщины по реакции



Реакция сдвигается в сторону образования металлического

вольфрама при температуре выше  $300^{\circ}\text{C}$  и протекает на нагретой поверхности, т.е. полосе, используемой в качестве подложки. Наиболее эффективно процесс осаждения протекает при  $520\text{--}560^{\circ}\text{C}$  и концентрации основного реагента – гексафторида вольфрама в газовой фазе 24–26% мольн. (остальное – водород). Скорость осаждения вольфрама при указанных режимах достигает 0,5–0,8 мм/ч.

Характерной особенностью осажденного вольфрама является столбчатая, ориентированная в направлении роста структура с большим отношением длины кристаллитов к диаметру. Такая структура с относительно малой протяженностью границ зерен обуславливает склонность газофазного вольфрама к хрупкому разрушению при относительно высоких температурах. Показано [5], что температура перехода газофазного вольфрама из пластичного в хрупкое состояние после осаждения составляет  $550\text{--}650^{\circ}\text{C}$ , а после часового отжига при  $1500^{\circ}\text{C}$  –  $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$ .

Сформированная методом газофазного осаждения комбинированная заготовка в виде сутунки сечением  $18\text{--}22 \times 50\text{--}65$  мм и длиной до 500 мм представлена на рис. I, а. На рис. I, б приведена микроструктура комбинированной заготовки в поперечном сечении, на которой видны армирующая полоса из спеченного горячекатаного вольфрама и наружное покрытие из газофазного вольфрама с характерной столбчатой структурой. С целью получения проката заданной толщины, устранения столбчатой структуры и ее влияния на пластические характеристики комбинированной заготовки последнюю подвергали горячей прокатке в валках с гладкой бочкой. При этом для снижения уровня растягивающих напряжений в очаге деформации и формирования схемы напряженного состояния, близкой к всестороннему неравномерному сжатию, степень деформации на первом проходе достигала максимальной величины для выбранных условий деформации и составляла 38–45%. На последующих проходах степень деформации варьировали от 20 до 25%, формируя прокат толщиной 4,5–5 мм, из которого затем изготавливали аноды. Металлографические исследования показали, что после деформации комбинированной заготовки с обжатиями 60–65% столбчатая структура полностью устраняется (рис. 2). После суммарной деформации 75–78%, при которой достигается требуемая толщина проката, и получасового отжига при  $1200^{\circ}\text{C}$  формируется полностью рекристаллизованная структура наружных слоев заготовки. Армирующий слой, объемная доля которого составляет 5–7%, сохраняет деформированное состояние (рис. 3). Температура перехода из пластичного в хрупкое состояние такого проката составляет  $140\text{--}180^{\circ}\text{C}$ . Это позволяет методом горячей штамповки формовать из него рентгенов-

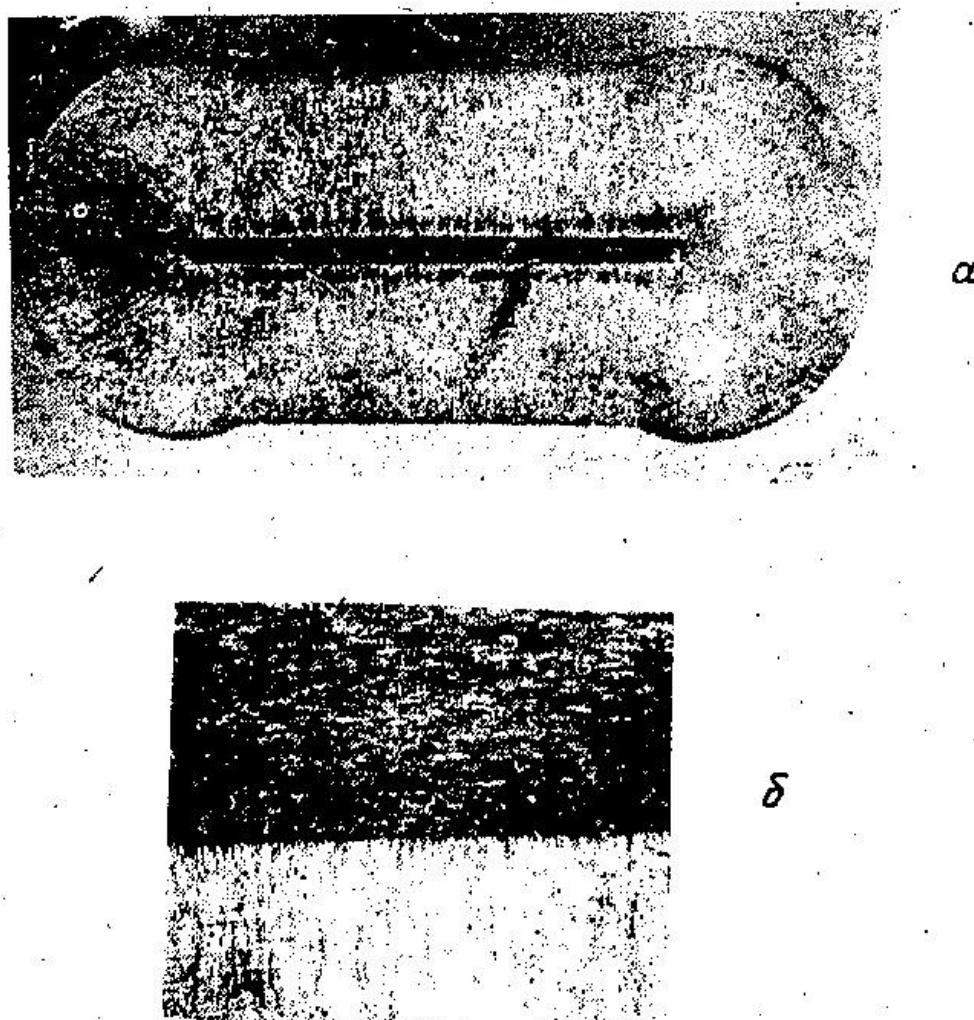


Рис.1. Макроструктура (а) и микроструктура (б) сутунки из комбинированного материала



Рис.2. Микроструктура сутунки после первого прохода с обжатием 62%

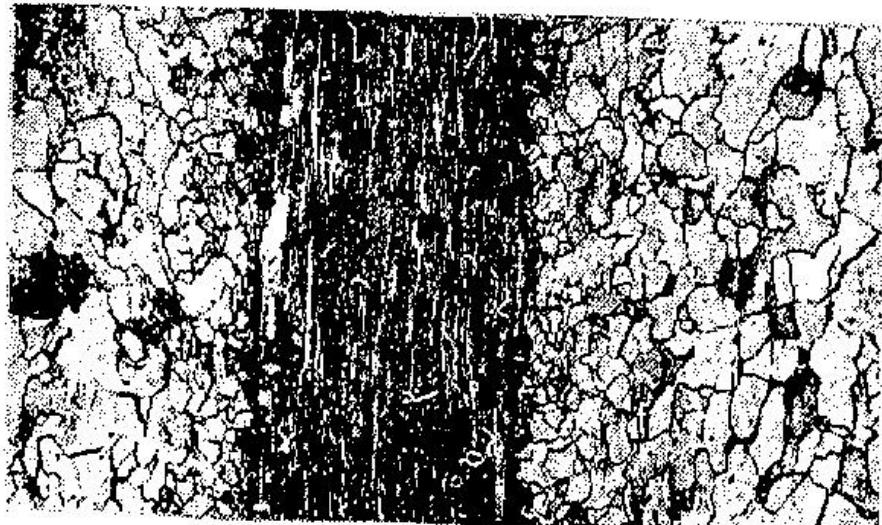


Рис.3. Микроструктура проката для изготовления анодов (после отжига при 1200°С, 30 мин), полученного из комбинированного материала ( $\varepsilon = 75\text{--}78\%$ )

ские аноды с выходом в годное до 95%.

Известно, что прочностные характеристики комбинированного материала определяются не только структурным состоянием составляющих его элементов, но и прочностью сцепления между ними. По данным [6], прочность сцепления на отрыв между молибденом и осажденным на него вольфрамом составляет 19–40 МПа. В случае формирования комбинированного материала по схеме, которая описана в настоящей статье, прочность сцепления должна определяться двумя факторами: величиной сцепления наружных слоев с подложкой и эффектом термодиффузионной сварки, осуществляемой при горячей прокатке, которую проводили при температуре 1500°С и давлении металла на валки порядка 6 МН. Экспериментальная проверка подтвердила наличие эффекта термодиффузионной сварки при прокатке пакетов, составленных из отдельных листов вольфрама, однако прочность сварного соединения не определяли. Оценку прочности сцепления элементов комбинированного материала после горячей деформации проводили расчетным путем по усилию сдвига, используя эмпирическое уравнение, полученное авторами ранее:

$$T = 19,72(1,0 + 0,5084H^{0,1787} + 0,6739 \pm 0,3172)e^{-0,8195\frac{\theta}{180}} ,$$

где  $T$  – напряжение сдвига, МПа;

- Л – накопленная деформация;
- Н – интенсивность скоростей деформации сдвига;
- θ – температура испытаний, °С.

Расчеты, проведенные на ЭВМ, показали, что прочность сцепления между армирующим слоем и наружным – рабочим на сдвиг при 20°С составляет 367 МПа, при 1500°С – порядка 118,3 МПа. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что основной вклад в прочность сцепления слоев комбинированного материала вносит эффект термодиффузионной сварки, условия реализации которой рассмотрены в [7].

Комплексные испытания анодов, изготовленных из комбинированного материала, в составе серийно выпускаемых рентгеновских трубок показали, что их эксплуатационная долговечность, оцениваемая количеством включений без потери интенсивности излучения, формоустойчивостью и эрозионной стойкостью поверхности, более чем в 3,5 раза превосходит аналогичные аноды из спеченного вольфрама. Пониженное содержание летучих металлических и газовых примесей в газофазном вольфраме обусловило сокращение длительности откачки вакуумного объема колбы трубы с 45–60 до 15–20 мин. Спеченный вольфрам, заключенный в плотную "рубашку" из газофазного вольфрама, не оказывает влияния на длительность откачки. Вместе с тем формаустойчивость и прочность анода, подвергающегося воздействию растягивающих радиальных напряжений и термоциклированию, при котором температура за 3–4 с повышается с 400 до 3000°С и затем падает до исходной, существенно зависят от прочности армирующего слоя.

При таком высокоспектральном термоциклировании в сочетании с воздействием растягивающих напряжений велика вероятность зарождения одной или нескольких трещин, приводящих к полному разрушению анода. Имеет место случай разрушения анодов после нескольких термоциклов. Анод, изготовленный из комбинированного материала, не разрушается даже при наличии нескольких трещин. Объясняется это тем, что армирующий слой, граничащий с наружными рабочими слоями газофазного вольфрама, играет роль энергетического барьера, препятствующего распространению магистральной трещины при ее зарождении. В газофазном вольфраме, по существу однофазном материале, барьеры для блокирования трещин отсутствуют. Следовательно, зародившись, трещина беспрепятственно развивается до тех пор, пока не "сбросит" избыточную энергию на образование новых поверхностей раздела. В данном случае трещина, пройдя газофазный вольфрам, выйдет на границу раздела и заблокируется. За счет прочного

сцепления с армирующим слоем разрушение анода не происходит даже при наличии нескольких трещин. Работоспособность анода при зарождении трещин не нарушается. Так, анод, у которого после 5 тыс. включений зародились трещины, полноценно работал до 30 тыс. включений, после чего был снят с эксплуатации для металловедческих исследований, подтвердивших описанный выше механизм.

Разработанный авторами комбинированный материал успешно применяется для производства вращающихся рентгеновских анодов и проката различного назначения.

#### Список литературы

1. Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В. Металловедение вольфрама. М.: Металлургия. 1978. 222 с.
2. Колецкий Ч.В. Структура и свойства тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1974. 205 с.
3. Григорович В.К., Шефталь Е.М. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. М.: Наука, 1980. 301 с.
4. Коликов А.П., Полухин П.И., Кручин А.В. и др. Технология и оборудование для обработки тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1982. 327 с.
5. Мальцев М.В., Фастовский В.С., Ермаков Б.Г. и др. // Цв. металлы. 1972. № 4. С.67-69.
6. Соколов В.К., Королев Ю.М., Глаголев В.В. и др. // Цв. металлы. 1982. № 4. С.66-67.
7. Производство изделий из тугоплавких металлов: Сб. статей / Пер. с англ. М.: Мир. 1968. 221 с.

МИНИСТЕРСТВО МЕТАЛЛУРГИИ СССР  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ  
И ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ  
(ВНИИТС)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА  
МОЛИБДЕНОВЫХ И ВОЛЬФРАМОВЫХ  
СПЛАВОВ

Тематический сборник научных трудов