

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ИХ СВОЙСТВА

А.А. Строев, В.Б. Арзамасов, В.С. Антипенко

В работе представлены результаты изучения жаропрочности и термоэмиссионных свойств вольфрамовых катодов плавильных плазмотронов, легированных различными присадками. На основе классических положений теории активированного катода Лэнгмюра предложена модель структурных изменений электродов в процессе их работы. Рассмотрены поверхностные явления, протекающие в процессе работы катодов плавильных плазмотронов. Проведен анализ диффузии и испарения легирующих добавок в процессе длительной работы электродов. Установлены закономерности твердофазного взаимодействия между основой и легирующими добавками и время обеднения матрицы присадками. Изучено влияние деформации сплавов на основе вольфрама на их электросопротивление, пористость и другие свойства, определяющие их рабочие качества, а также влияние деформации на структуру, свойства и распределение легирующих добавок. Определены рекомендуемые степени деформации и содержание легирующих добавок, которые позволяют увеличить срок службы катодов плавильных плазмотронов при их длительной работе в среде аргона.

Ключевые слова: электрод, деформация, диффузия, жаропрочность, электросопротивление, плотность, легирование, термоэмиссия, эрозия.

INFLUENCE OF DEFORMATION AT TUNGSTEN ELECTRODES PRODUCTION ON THEIR PROPERTIES

A.A. Stroeв, V.B. Arzamasov, V.S. Antipenko

The paper presents the study results of thermal stability and thermoionic emission properties of tungsten cathodes for melting plasmotrons alloyed by various additives. The model of electrodes structural changes at thier operation has being developed on the base of the classical principles of Lengmyur's activated cathode theory. The phenomena have been considered occuring on the surface of melting plasmotron cathodes during their operation. The analysis of the diffusion and evaporation of the alloying elements in the course of electrodes' longterm operation has been carried out. Regularities of solid-phase interaction between the basis and alloying elements, as well as the time of alloying elements de-enrichment of a matrix have been determined. The influence of tungsten base alloys deformation on their electrical resistance, porosity and other properties effecting the quality of their operation, as well as its influence on structure, properties and distributions of the alloying elements has been studyied. The rates of deformation and oncentration of alloying elements have been recommended in order to increase the service life of melting plasmotrons athodes during their long period operation in argon atmosphere.

Keywords: electrode, deformation, diffusion, thermal stability, lectroresistance, density, alloying, thermoionic emission, erosion.

Введение

В настоящее время для изготовления высокотемпературных электродов, работающих в инертной среде, в качестве основы, главным образом, используют вольфрам, легированный различными присадками, способствующими повышению эрозионной стойкости, жаропрочности и термоэмиссии [1].

Значительная величина силы тока дугового разряда (> 1 кА), относительно низкое напряжение горения и низкое катодное падение потенциала (≤ 20 В), высокие значения плотности тока у поверхности катода ($\sim 10^6$ А/Ом²) и температуры столба электрической дуги (до 8000 °С) приводят к исключительно большим тепловым нагрузкам на электроды (рис. 1).

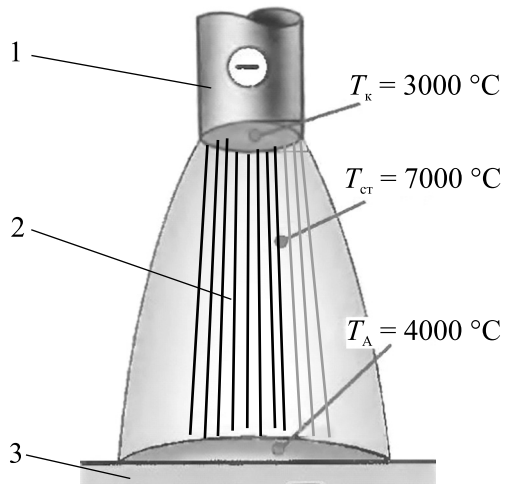


Рис. 1. Схема тепловой нагрузки на работающий электрод во время плазменной сварки прямого действия:
1 – катод; 2 – столб дуги; 3 – анод;
 T_k – температура катода; $T_{ст}$ – температура столба дуги; T_a – температура анода

Наиболее стойкими из используемых сегодня электродов в среде аргона являются электроды из итрированного вольфрама (с содержанием оксидной добавки 1,8–3,5 %). Однако в результате длительной работы происходит разрушение катодов путем эрозии и расплавления, что вызывает загрязнение плазменной струи и, соответственно, обрабатываемого материала, ограничивает ресурс непрерывной работы плазменной установки, снижает качество изделий и производительность труда (на рис. 2 показаны вольфрамовые электроды с оплавлениями).

В связи с этим вопрос создания электродов, способных сохранять длительное время свои термостойкие и эмиссионные свойства, приобретает большое значение. Однако если в решении вопросов повышения жаропрочности тугоплавких металлов достигнуты значительные успехи, то изучению повышения прочностных и эмиссионных свойств посвящено относительно мало работ.

Как показано в ряде работ [1–3], увеличения жаростойкости и эрозионной стойкости легированных сплавов можно добиться усложнением составов твердых растворов и введенных в них вторых фаз. Это возможно только после тщательного и серьезного изучения особенностей фазовых превращений и химических реакций в твердых телах, так как вопрос эрозии при высоких температурах связан с решением вопросов твердофазного взаимодействия между матрицей и легирующими добавками. Однако на сегодняшний день без усложнения гетерогенезации структуры сплавов катодов удалось продлить их срок службы при помощи оптимизации их геометрии [4].

В работе [5] было отмечено, что увеличение плотности катодного материала (чистого вольфрама и чистого молибдена) на 15 % повышает его термостойкость на 30 %. При этом твердофазное взаимодействие и поверхностные явления, протекающие в процессе работы легированных электродов, еще до конца не изучены. Поэтому представляет интерес рассмотрение влияния деформации электродов при их изготовлении в качестве технологического приема по улучшению работоспособности вольфрамовых катодов.

Целью настоящей работы является определение влияния деформации легированных вольфрамовых электродов при их изготовлении на свойства и структурные изменения электродов, а также выявление оптимальных степеней деформации для улучшения их жаропрочностных и термоэмиссионных свойств.

Механизмы процесса структурных изменений

В классических работах Лэнгмюра, а впоследствии и других исследователей [6], было показано, что при адсорбции на поверхности металла атомов или ионов постороннего вещества существенно меняется работа выхода

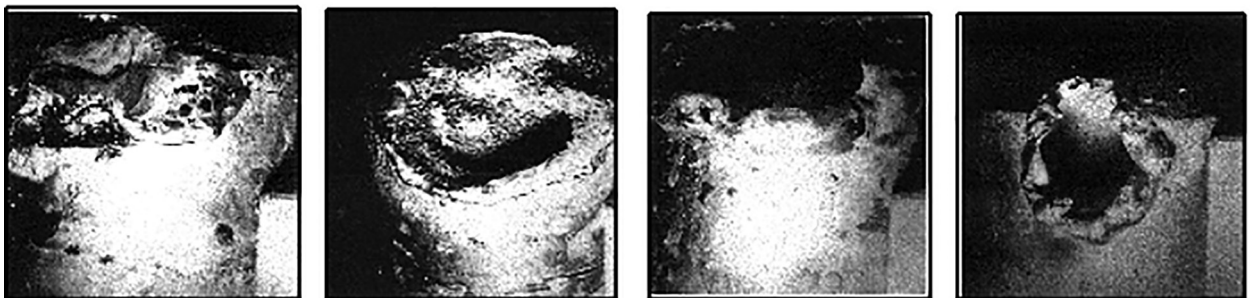


Рис. 2. Отработавшие вольфрамовые электроды

основы, причем при соответствующем подборе материала плавки можно получить значительное увеличение эмиссионного тока.

По теории Лэнгмюра, адсорбированный на поверхности электрода атом электроположительного металла поляризуется адсорбционными силами и обращается в электрический диполь, направленный к поверхности электрода отрицательным полюсом. Совокупность таких диполей образует двойной электрический слой. Образуется скачок потенциала, и работа выхода электрона электрода, покрытого слоем атомов электроположительного металла, уменьшается.

Анализ имеющихся теоретических и экспериментальных исследований термокатодов [7–15] позволяет предложить модель структурных изменений электродов, основанную на положениях теории активированного катода Лэнгмюра. Теплоотвод температуры от рабочего торца внутрь катода путем теплопроводности вызывает разогрев его внутренних сечений, при этом происходит диссоциация тугоплавких соединений. Под действием градиентов химического и электрохимического потенциалов происходит диффузия растворенных атомов с последующей их адсорбцией на рабочем торце электрода, что приводит к снижению работы выхода электрона на поверхность и снижению температуры рабочего торца. Высокие температуры приводят к испарению активирующих атомов с поверхности катода, а их недостаток восполняется за счет диффузии из внутренних областей. В процессе длительной работы катода область диссоциации тугоплавких соединений передвигается вглубь катода, что приводит к ускорению роста зерен матрицы и, в свою очередь, к замедлению скорости зернограничной диффузии. Подпитка поверхности катода только за счет объемной диффузии недостаточна, и наступает нарушение массобаланса эмиссионно-активных элементов, что способствует возрастанию значений работы выхода электрона на поверхности, повышению ее температуры, расплавлению и выходу электрода из строя.

Таким образом, в процессе работы электродных материалов происходит диффузия атомов легирующих элементов к поверхности образца, т.е. адсорбция атомов из внутренних областей. Причем, выдвинутая авторами работы [16] гипотеза о том, что испарившиеся атомы ионизируются в прикатодной области и в виде ионов возвращаются на катод (за счет чего создается

металлопленочная система, несмотря на уменьшение скорости подпитки поверхности электрода атомами легирующих компонентов в результате диффузии), подтверждается рядом экспериментальных данных [14].

Необходимо также отметить, что в случае самокалящихся электродов, время обеднения матрицы легирующим компонентом будет зависеть не только от температуры поверхности электрода, но и от распределения температуры по его длине (в отличие от электродов электронных приборов, у которых $\Delta T \approx 0$). Отсюда следует, что при работе самокалящихся электродов на определенном расстоянии от рабочего торца будет возникать зона, обедненная атомами легирующего компонента, граница залегания которой будет определяться градиентом температур по длине электрода, качеством и типом активирующих добавок, состоянием структуры и т.п.

Поэтому параметры диффузии и испарения с поверхности электродов атомов легирующих добавок напрямую влияют на характеристики жаропрочности и термоэмиссии, а также на работоспособность электродных материалов. Поскольку деформация сплава влечет за собой изменение его структуры и, соответственно, комплекса физико-механических характеристик, влияющих на параметры диффузии и испарения легирующих добавок, представляет интерес изучение влияния деформации на свойства и работоспособность вольфрамовых электродов.

Анализ диффузии и испарения легирующих добавок

На основе данных из справочника [17] были определены значения коэффициентов активностей, скорости притока и испарения легирующих компонентов с поверхности вольфрама с учетом состояния поверхности и условий перехода испаряющегося вещества с поверхности в газовую фазу.

На рисунке 3 приведены графики изменения скорости диффузии и испарения (V , А/см²·с) легирующих элементов (при равенстве размеров эмиттеров) в зависимости от температуры (T , К).

Анализ представленных данных показывает, что в системах вольфрама с иттрием и лантаном при температурах, соответственно, выше 2000 и 1950 К скорость испарения становится больше по сравнению со скоростью притока атомов за счет диффузии, что делает невозможным сохранение слоя атомов легирую-

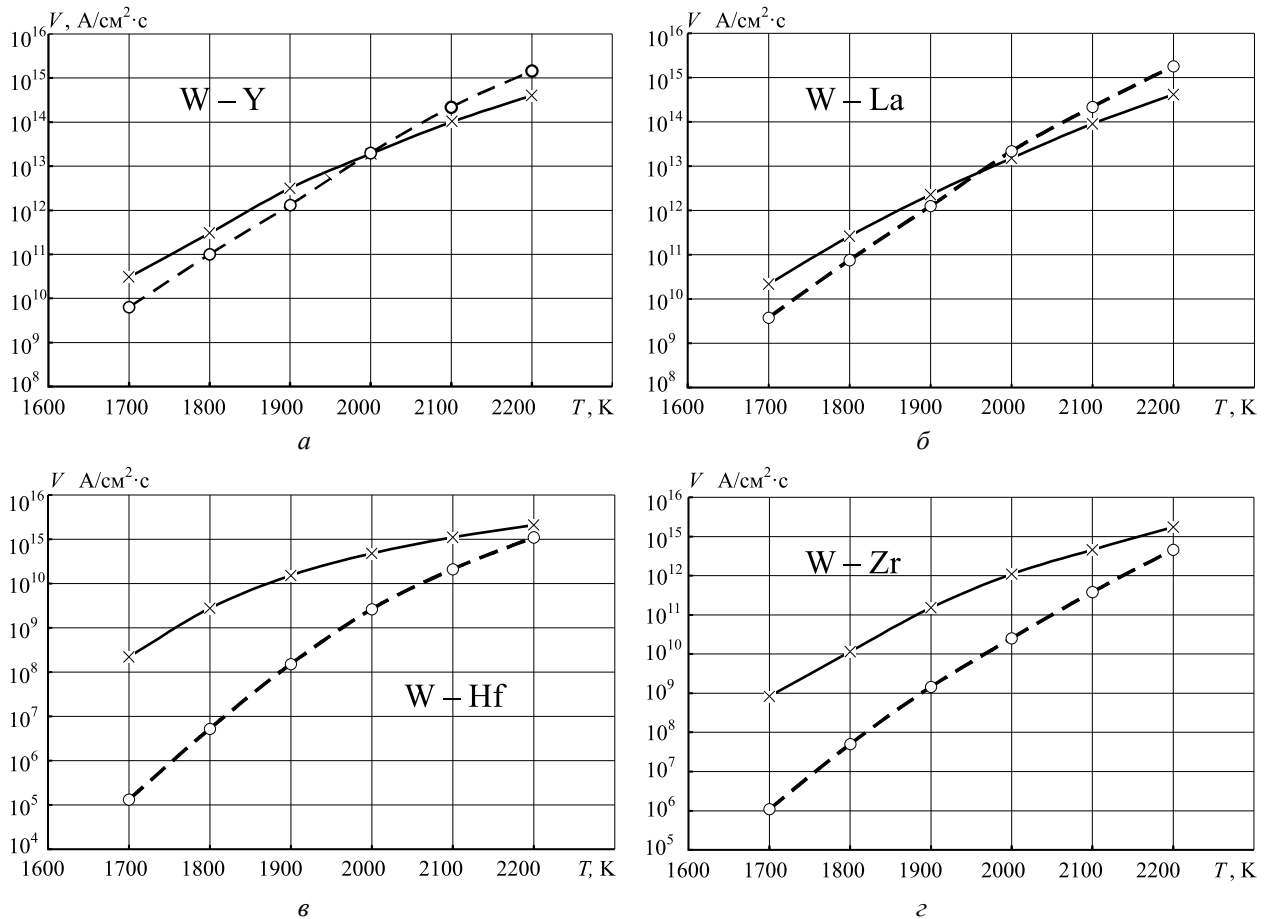


Рис. 3. Зависимость скорости (V , $\text{A/cm}^2 \cdot \text{c}$) притока к поверхности вольфрама и испарения атомов легирующих элементов от температуры (T , K) в системах: а – W-Y; б – W-La; в – W-Hf; г – W-Zr; (о-о) – испарение; (х-х) – диффузия

щего компонента на поверхности вольфрама и приводит к уменьшению эмиссии. В системах вольфрама с цирконием и гафнием скорость притока атомов за счет диффузии превышает скорость их испарения до более высоких температур (2300–2350 K), при этом образование слоя атомов легирующих элементов на поверх-

ности вольфрама будет происходить быстрее, чем в системах вольфрама с редкоземельными металлами. Приведенные на рис. 3 данные позволяют рассчитать время обеднения матрицы легирующим компонентом. Так, например, для катодов с цилиндрической геометрией, работающих при температуре 2073 K, результаты расчета времени обеднения $\tau_{\text{обедн}}$ матрицы легирующим компонентом, представлены на рис. 4.

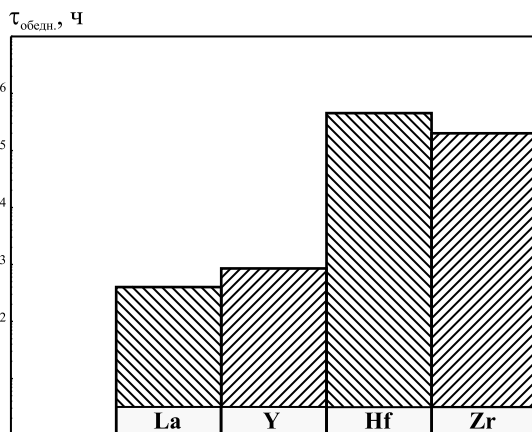


Рис. 4. Время исчезновения атомов легирующего элемента из катода с цилиндрической геометрией ($d = 9 \text{ мм}$; $l = 30 \text{ мм}$) при $T = 2073 \text{ K}$

Проведение исследований

Для изучения физико-химических свойств сплавов на основе вольфрама и проведения различных исследований, в том числе влияния деформации, были подготовлены сплавы, представленные в табл. 1. Сплавы указанных композиций были приготовлены в виде прутков ($d = 18 \text{ мм}$, $l = 62 \pm 1 \text{ мм}$) методами порошковой металлургии с механическим перемешиванием, гидропрессованием и косвенным спеканием в индукционных электропечах. В результате токарной обработки получали катоды с размерами $d = 16 \text{ мм}$, $l = 60 \text{ мм}$.

Таблица 1

Маркировка, состав и свойства спеченных сплавов на основе вольфрама

Сплав	Легирующие добавки, % по массе	f , %	ρ , г/см ³		Π , %	$\rho = 1/\sigma$, мкОм·см		H_{μ}
			теор.	эксп.		теор.	эксп.	
ВИ5	0,4–0,7 Y ₂ O ₃	1,9	19,03	18,27	4	5,92	5,95	340
ВИ10	0,8–1,1 Y ₂ O ₃	3,7	18,77	17,91	4,5	6,16	6,2	344
ВИ15	1,3–1,5 Y ₂ O ₃	5,5	18,52	17,65	4,7	6,38	6,42	346
ВИ20	1,9–2,2 Y ₂ O ₃	8,5	18,2	17,26	5,16	6,74	6,8	351
ВИ25	2,3–2,5 Y ₂ O ₃	9	18,02	16,7	6,3	7,01	7,25	360
ВИ30	2,9–3,2 Y ₂ O ₃	11,5	17,37	16,05	7,6	7,49	7,7	365
ВЛ15	1,2–1,5 La ₂ O ₃	4,8	18,75	17,57	6,3	6,42	6,8	366
ВИ615	1,2–1,5 YB ₆	7,3	18,16	15,2	9,0	7,15	8,0	392
ВГМ15-5	1–3 HfO ₂ 5–10 Mo	5,89	18,48	17,64	4,5	6,45	6,67	355
ВЦН15	1,5 ZrN	4,46	18,72	17,58	6,1	6,47	6,74	380

Примечание: f – объемная доля включений; ρ – плотность; Π – пористость; $\rho = 1/\sigma$ – удельное электросопротивление; H_{μ} – микротвердость.

Исследование физико-механических свойств сплавов, а также металлографический анализ проводились на образцах различной конфигурации, вырезанных электроэрозионным способом из полученных электродов. При этом свойства катодных материалов исследовались как в исходном, так и в деформированном состоянии.

Термическая обработка образцов проводилась на установке, созданной на базе электропечи СНОЛ-1,6/МОИ, разогревающей образцы до 3200 °С прямым пропусканием электрического тока в атмосфере инертного газа или в вакууме. Термообработка проводилась по режиму: нагрев до 1000–3000 °С в течение 0,5 ч, выдержка при температуре 1–10 ч и быстрое охлаждение со скоростью до 300 °С/с для фиксации высокотемпературного состояния.

Измерения температуры образцов производились оптическим пирометром ЛОП-72 с пределами измерений 900–6000 °С с систематической погрешностью 3–5 °С и среднеквадратичным отклонением случайной погрешности ± 3 °С.

Структура сплавов изучалась с помощью светового микроскопа «Неофот-2» на травленных шлифах, приготовленных обычным способом в реактиве Мураками (10 г K₃FeC₆ + ЮгКОН + 100 мл H₂O), затем горячее травление в реактиве Шрайер (33 мл. HNO₃ + 33 мл. HF + 34 мл. H₂O), что позволяло выявить элементы тонкой структуры.

Для изучения фазового состава сплавов образцы подвергались электролитическому растворению в спиртовом 10 %-м растворе HCl в области потенциалов 0,28–0,35 В. Затем выделенные избыточные фазы исследовались методами рентгеноструктурного (РСА), рентгенографического (РГА), электронографического (ЭГА) и микрорентгеноспектрального (МРСА) анализов на установках ДРОН-2 и MS-46 Camasca.

Микротвердость сплавов измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г с погрешностью $\Delta H_{\mu} = \pm 5$ –10 %. При анализе распределения микротвердости в пределах зерна в целях охвата деформаций возможно меньших объемов применялись нагрузки 5 г. В этом случае наряду с микротвердостью оценивалось рассеяние ее значений в зависимости от содержания легирующих добавок в сплавах:

$$D = \sum_1^n (H_{\mu i} - H_{\mu \text{ср}})^2 / Pi, \quad (1)$$

где $Pi = \frac{ni}{n}$; $H_{\mu i}$ – микротвердость, соответствующая i -му зерну; $H_{\mu \text{ср}}$ – среднее значение микротвердости; n_i – число измерений, соответствующих $H_{\mu i}$; n – общее число измерений.

Плотность образцов до и после испытаний измерялась пинкометрическим методом [19] с точностью $5 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Образцы взвешивались на аналитических весах АДВ-200М.

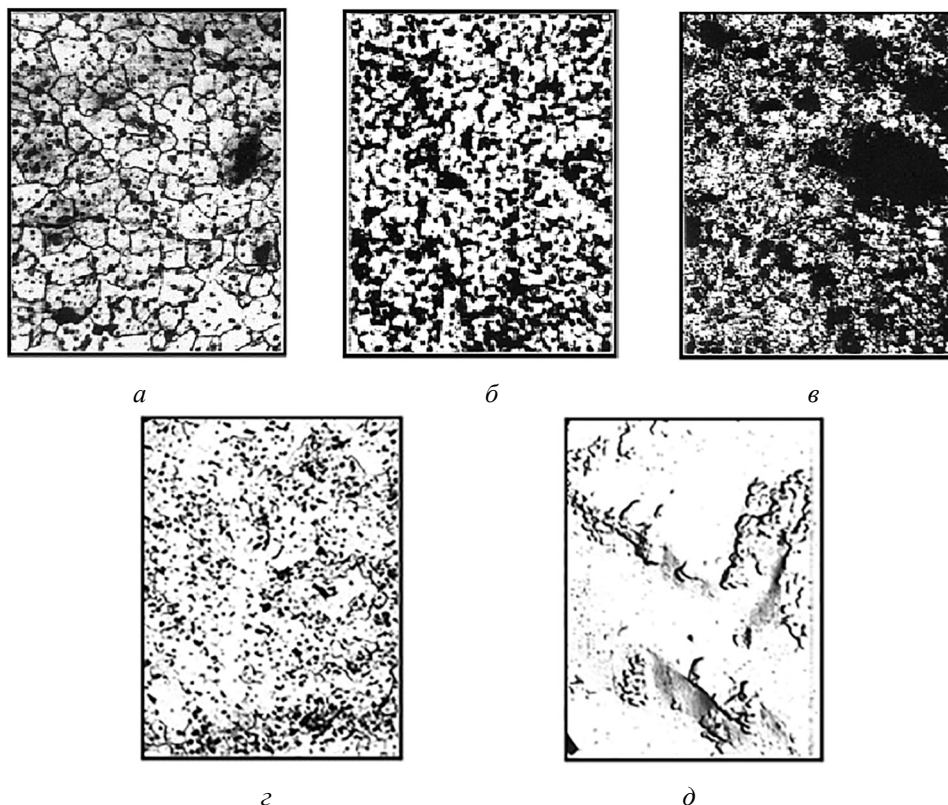


Рис. 5. Микроструктура сплавов вольфрама в спеченном состоянии ($\times 340$):
а – ВИ15; б – ВЛ15; в – ВБ15; г – ВГМ 15-5; д – ВИ15 ($\times 4750$)

Измерения работы выхода электрона сплавов проводились на специально сконструированной вакуумной установке, обеспечивающей безмаслянный вакуум не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ Па. Для исследований изготавливались образцы размерами ($10 \times 10 \times 1,5$ мм) в различных состояниях (исходное, отожженное, деформированное).

Измерения коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления проводились по методу Кольрауша [19].

На рисунке 5 представлены результаты металлографического анализа сплавов на основе вольфрама с различными легирующими добавками.

Анализ приведенных данных показал, что частицы второй фазы размером порядка микрона (рис. 6, а, табл. 2) располагаются как по границам, так и по телу зерен, имеющих полиэдрическую форму с извилистыми границами. При этом состав второй фазы и ее морфология сильно влияют на особенности структуры сплавов. Так, в сплаве на основе вольфрама, легированного гексаборидом иттрия, наблюдались крупные, сообщающиеся поры (см. рис. 5, в), для остальных сплавов была характерна мелкая рассеянная пористость (см. рис. 5, а, б, г).

Отмеченные различия в структуре спеченных сплавов на основе вольфрама приводят

к их неодинаковым физико-механическим характеристикам в исходном состоянии. Хотя все материалы имели значения плотности, отличающиеся от теоретической (см. табл. 1), что характерно для спеченных материалов и указывает на наличие пористости, однако наибольшие значения пористости наблюдались для сплава вольфрама с гексаборидом иттрия. При этом данные измерения удельного электросопротивления и значения микротвердости также показали максимальные значения этих характеристик у сплава W – 1,5 % YB_6 . В соответствии с данными физико-химическо-

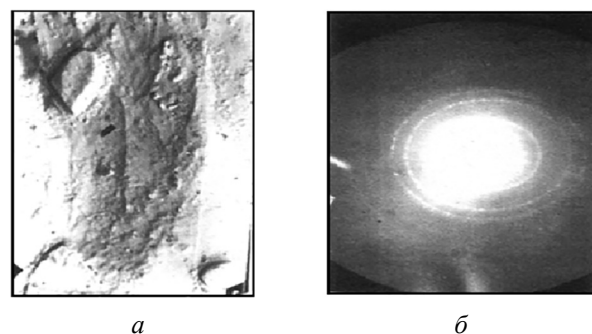


Рис. 6. Форма и состав второй фазы в итрированном вольфраме в исходном состоянии:
а – частицы Y_2O_3 , электронный микроскоп, реплика ($\times 9900$); б – электронограмма Y_2O_3

Таблица 2

Данные фазового анализа сплава ВИ15, полученные методом электронографии (рис. 6, б)

Расчетные данные				Табличные данные [18]		Фаза
№ кольца	r , мм	I	d_{HKL}	d_{HKL}	I	
1	8,9	средняя	3,06	3,06	100	Y_2O_3
2	10,4	средняя	3,618	2,648	31	Y_2O_3
3	14,5	средняя	1,878	1,873	31	Y_2O_3
4	17,10	средняя	1,593	1,597	43	Y_2O_3

Примечание: r – радиус дифракционного кольца; I – относительная интенсивность линий; d_{HKL} – межплоскостное расстояние.

го анализа стабильности тугоплавких соединений в вольфрамовой матрице это указывает на более раннюю диссоциацию и последующее растворение гексаборида иттрия в основе (уже на стадиях спекания), в отличие от других соединений, стабильность которых в вольфрамовой матрице выше.

В процессе исследований было установлено, что оптимальные характеристики жаропрочности (оцениваемой по стабильности структурного состояния) и термоэмиссии достигаются при содержании в вольфраме не менее 1 % (по массе) тугоплавких соединений переходных и редкоземельных металлов.

Анализ результатов влияния количества оксида иттрия на физико-механические свой-

ства сплавов на основе вольфрама (см. табл. 1) показал, что увеличение содержания Y_2O_3 до 3 % (по массе) приводит к закономерному снижению плотности сплава, причем наиболее резкое уменьшение этой характеристики наблюдалось, начиная с 2 % Y_2O_3 . Это, в свою очередь, приводит к более резкому увеличению пористости и значений электросопротивления, ухудшает спекаемость и, как будет показано ниже, оказывает отрицательное влияние на свойства электродного материала.

На рисунке 7 представлены фотографии микроструктур сплава ВИ15 со степенью деформации $\xi = 10, 35$ и 55 % и сплава ВИ5 со степенью деформации $\xi = 90$ %, а также фрактограмма ВИ15.

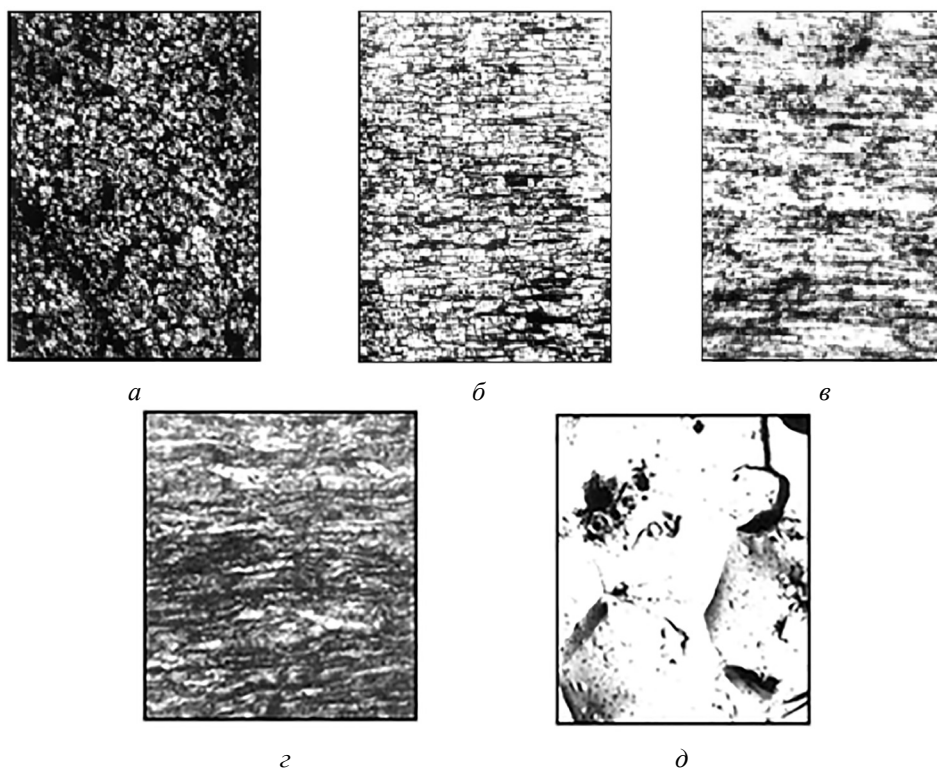


Рис. 7. Микроструктура иттрированного вольфрама ($\times 200$) в сплаве ВИ15 со степенью деформации $\xi = 10$ % (а), $\xi = 35$ % (б), $\xi = 55$ % (в) и в сплаве ВИ5 $\xi = 90$ % (г); фрактограмма ВИ15 при $\xi = 55$ % (д)

Как следует из приведенных данных, по мере увеличения степени деформации образцов увеличивается степень ориентированности зерен и коэффициент асимметрии их формы (см. рис. 7, а, б, в). Одновременно снижается выход годного металла, который составляет 95–97 % при $\xi = 30\text{--}35\%$, а при $\xi = 55\%$ все образцы разрушались в процессе деформации, причем результаты фрактографического анализа показали наличие хрупкого интеркристаллитного разрушения (см. рис. 7, д). На образцах из сплава ВИ5 прокаткой с промежуточными отжигами была достигнута степень деформации $\xi \approx 90\%$, при этом структура имела волокнистый характер с вытянутой формой второй фазы (см. рис. 7, з), что характерно для высоких степеней деформации.

Анализ результатов и выводы

На рисунке 8 представлены данные, показывающие влияние степени деформации на плотность (ρ), электропроводность (δ), микротвердость ($H100$), ширину рентгеновской линии ($B110$) и температуру начала рекристаллизации (T_r) сплавов ВИ5 и ВИ15.

Приведенные данные показывают, что по мере возрастания степени деформации наблюдается увеличение характеристики плотности и микротвердости. Как свидетельствуют данные металлографических и рентгеновских исследований, это связано с уменьшением пористости и увеличением степени искаженности кристаллической решетки под действием деформации.

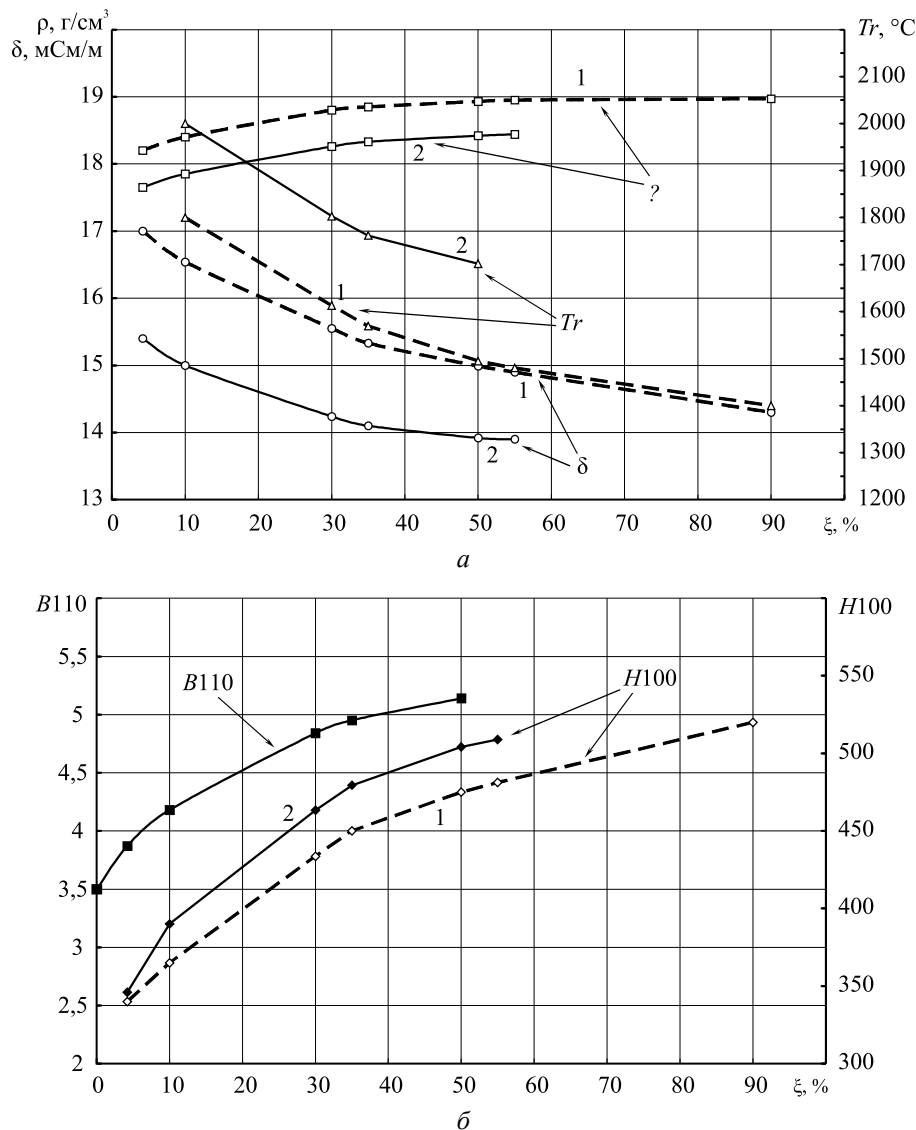


Рис. 8. Зависимость физико-химических свойств сплавов ВИ5 (1) и ВИ15 (2) от степени деформации:
а – плотность, электропроводность и температура начала рекристаллизации;
б – микротвердость и ширина рентгеновской линии

Так, например, результаты измерения ширины рентгеновской линии сплава ВИ15 хорошо согласуются с кривыми твердости и плотности – увеличение областей когерентного рассеяния наблюдалось в том же интервале деформаций.

Увеличение степени деформации приводит к уменьшению температуры начала рекристаллизации сплавов, при этом, если у сплава ВИ15, деформированном со степенью $\xi \approx 10\%$, рекристаллизация начиналась при 2000°C , то в сплаве ВИ5, подвергнутом деформации со степенью $\xi \approx 90\%$, температура начала рекристаллизации снижалась до 1400°C , то есть приближалась к значениям, характерным для нелегированного вольфрама.

Измерения электропроводности образцов показали лучшую воспроизводимость результатов

при нагреве и охлаждении деформированных образцов по сравнению с недеформированными, однако наблюдалось уменьшение абсолютных значений этих характеристик при увеличении степени деформации свыше $\xi \approx 10\text{--}15\%$, несмотря на меньшую пористость. Очевидно, это связано с сильными искажениями кристаллической решетки, созданием сильно развитой сетки границ, что в совокупности оказывает большое воздействие на характеристики электропроводности сплавов по сравнению с уменьшением пористости.

Были проведены стендовые испытания термокатодов из легированного вольфрама (деформированных со степенью $\xi \approx 10\%$) в режиме вторично-кратковременных включений (табл. 3).

В работе [7] отмечалось, что снижение работы выхода электрона приводит к увели-

Таблица 3

Результаты стендовых испытаний вольфрамовых катодов в инертной атмосфере

№ п/п	Сплав	I_{max} , кА	$\tau_{\text{раб.}}$, мин.	T , $^\circ\text{C}$	ϕ , ЭВ	Эрозия, мг/А · ч	Состояние катода после испытаний
1	ВИ5	0,8	42	3290	3,73	0,29	Сильное оплавление рабочего торца. Не пригоден для дальнейшей эксплуатации.
2	ВИ10	0,8	38	—	—	0,14	Небольшой расплав. Пригоден для дальнейшей эксплуатации.
3	ВИ15	0,8	65	3050	2,91	0,05	Оплавления и трещин рабочего торца нет. Пригоден для дальнейшей эксплуатации.
4	ВИ20	0,8	65	3070	2,98	0,06	Оплавления и трещин рабочего торца нет. Пригоден для дальнейшей эксплуатации.
5	ВИ20 (без деф-ции)	0,8	57	3095	3,03	0,07	Небольшой расплав. Пригоден для дальнейшей эксплуатации.
6	ВИ25	0,8	56	—	—	0,07	Трещины. Не пригоден для дальнейшей эксплуатации.
7	ВИ30	0,8	30	3120	3,12	0,07	Трещины. Не пригоден для дальнейшей эксплуатации.
8	ВИ ₆ 15	0,6	6	—	—	—	Сильное оплавление рабочего торца. Для дальнейшей эксплуатации не пригоден.
9	ВЛ15	0,7	22	—	—	0,1	Оплавление рабочего торца. Для дальнейшей эксплуатации не пригоден.

Примечание: I_{max} – сила тока; $\tau_{\text{раб}}$ – время работы; T – температура рабочего торца электродов; ϕ – работа выхода электрона.

чению эрозионной стойкости катодного материала, однако приведенные в таблице 3 данные показывают, что эрозионная стойкость материалов является немонотонной функцией от работы выхода электрона. Кроме того, необходимо отметить тот факт, что в отличие от слаботочных электродов исследуемые катоды работали на токах 0,6–0,8 кА и выходили из строя вследствие расплавления или образования трещин, а не за счет уменьшения размеров путем эрозии. Комплексные исследования макро- и микроструктуры, фазового состава, а также результаты исследований влияния температуры и легирования на физико-механические свойства катодных материалов позволили определить причины выхода катодов из строя.

Так, например, в сплаве вольфрама с содержанием 0,5 % Y_2O_3 количество второй фазы недостаточно для сдерживания роста зерен в процессе нагрева. В свою очередь укрупнение зерен и связанное с этим уменьшение общей протяженности их границ приводит к уменьшению количества атомов иттрия, поступающих к рабочему торцу в основном за счет граничной диффузии. Происходит значительное обеднение поверхности катода активирующими атомами, значения работы выхода электрона повышаются и, следовательно, возрастает рабочая температура на торце катода и происходит его оплавление и выход катода плазмотрона из строя.

В сплаве ВИ30 повышенное содержание Y_2O_3 наряду с благоприятным воздействием (уменьшение работы выхода электрона, снижение температуры рабочего торца) приводит к снижению характеристик теплопроводности, при этом возникающие температурные градиенты вызывают образование трещин в катоде.

Сравнение работоспособности катодов из сплавов ВИ10, ВИ15 и ВИ20 показало преимущество сплава W–1,5% Y_2O_3 , что связано со структурой и благоприятным влиянием второй фазы на свойства вольфрама при оптимальном ее содержании в сплаве.

Заключение

Проведенные исследования влияния степени деформации на свойства дисперсно-упрочненных сплавов вольфрама показали, что при деформации катодов (на $\xi \approx 10\text{--}15\%$) увеличивается длительность их использования при различных режимах (ток, температура) на 5–20 % (в зависимости от сплава и режима) до начала

момента оплавления, в отличие от недеформированных. Это является существенным улучшением качества изготавливаемых изделий без усложнения их состава. При этом проводить деформацию со степенями выше $\xi \approx 10\text{--}15\%$ нецелесообразно, так как это приведет к снижению термической стабильности структуры и ухудшению теплофизических свойств сплавов в рабочем диапазоне температур.

Также было установлено, что наиболее часто используемый в настоящее время для катодов плазмотронов сплав ВИ20 (без деформации) показал меньшую работоспособность в отличие от деформированных ВИ15 и ВИ20. При этом, с учетом деформации сплавов, самым стойким как в отношении температур, так и длительности работы при различных токах оказался сплав ВИ15.

В этой связи представляет интерес корректировка технологических режимов изготовления сплавов на основе вольфрама для получения более качественных катодов плавильных плазмотронов и дальнейшего использования для работы в среде аргона сплава вольфрама, легированного 1,5% Y_2O_3 .

Список литературы

1. Справочник по конструкционным материалам / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.: под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.
2. Тугоплавкие металлы – применение и свойства тугоплавких металлов: Учебник / В.С. Челноков, И.В. Блинков, В.Н. Аникин, А.О. Волхонский. М.: Изд-во Дом МИСиС, 2011. – 114 с.
3. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсноупрочненные материалы. М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
4. Стрельников И.В., Коновалов А.В. Определение оптимальной геометрии вольфрамового электрода при точечной сварке сжатой дугой // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. № 6. С. 53–57.
5. Агте К., Вацек И. Вольфрам и молибден. М.: Энергия, 1964. – 229 с.
6. Фоменко В.С., Подчерняева И.А. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов: Справочник / под общ. ред. Г.В. Самсонова. М.: Атомиздат, 1975. – 320 с.
7. Амосов В.М., Карелин Б.А., Кубышкин В.В. Электродные материалы на основе туго-

- плавких металлов. М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
8. Арзамасов В.Б., Смирнова Э.Е. Принцип жаропрочного легирования и термоэмиссионные свойства сплавов // Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: сб. науч. тр. под ред. Б.Н. Арзамасова М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. С. 226–231.
 9. Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М.: Атомиздат, 1974. – 288 с.
 10. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / С.К. Жданов, В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков: под ред. В.А. Курнаева. М.: МИФИ, 2007. – 368 с.
 11. Низкотемпературная плазма. Том 10. Теория и расчет приэлектродных процессов / И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк, И.П. Назаренко, А.М. Зимин, В.Н. Аникеев, А.С. Коротеев. Отв. ред. И.Г. Паневин, В.И. Хвесюк. Новосибирск: Наука, Сиб. издат. Фирма, 1992. – 197 с.
 12. Бокиштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСиС, 2005. – 362 с.
 13. Гаврюшенко Б.С., Пустогаров А.В. Исследование электродов плазмотронов // Приэлектродные процессы и эрозия электродов: Сб. статей. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1977. С. 85–122.
 14. Пустогаров А.В. Экспериментальные исследования тугоплавких катодов плазмотронов // Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука. 1977. С. 315–340.
 15. Физическое материаловедение. Том 3. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов / Н.В. Волков, В.И. Скрытый, В.П. Филиппов, В.Н. Яльцев: под ред. Б.А. Калина. М.: МИФИ, 2008. – 808 с.
 16. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.
 17. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник / У.Д. Верятин, В.П. Маширев, Н.Г. Рябцев и др.: под общ. ред. А.П. Зефинова. М.: Атомиздат, 1965. – 233 с.
 18. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: Изд-во Металлургия, 2-е изд., 1970. – 366 с.
 19. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: справочное пособие: в 3 т. Физические методы исследования металлов. Т. 1 / Б.С. Бокиштейн и др. М.: Машиностроение, 1971. – 552 с.

Материал поступил в редакцию 21.02.2017

СТРОЕВ Александр Александрович E-mail: aastroev@mail.ru Тел.: (999) 735-15-15, (48439) 9-86-10	Научный сотрудник лаборатории сварки и пайки отделения инновационных реакторных материалов и технологий АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». Сфера научных интересов: физика твердого тела, тугоплавкие материалы, термоэмиссия, термическая обработка, защитные покрытия. Автор 12 статей.
АРЗАМАСОВ Владимир Борисович 07.12.1945 – 05.01.2017	Академик АЭН РАН, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение» Московского политехнического университета. Сфера научных интересов: физика твердого тела, кинетика фазовых и структурных превращений, тугоплавкие материалы, конструкционные материалы, термоэмиссия, термическая обработка, теплопроводность. Автор более 20 монографий, более 70 научных статей, 1 научного открытия.
АНТИПЕНКО Виталий Сафронович E-mail: antipenkovs7@mail.ru Тел.: (915) 227-62-13	Кандидат технических наук, доцент кафедры физики Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ)). Сфера научных интересов: физика твердого тела, томография, стохастические процессы и оптимизация, логистика, физика накопителей энергии. Автор двух монографий, около 250 научных статей.