

# Комплексный и системный подходы к проблеме получения материалов и изделий из вольфрамосодержащего минерального сырья в регионах его добычи

А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронов, Н. П. Романовский

---

Предложены концепция и методология получения материалов и изделий из вольфрамосодержащего минерального сырья на основе “дробного, малого производства с использованием передовых технологий” с соблюдением критериев устойчивого развития. Это направление соответствует основным принципам минералогической материалогики. На основе предложенной концепции получен ряд электродных, сварочных материалов, позволяющих повысить уровень физико-химических и эксплуатационных свойств легируемых, наплавленных и сварочных швов. Показано, что использование шеелитового концентрата в шлаке при электрошлаковом переплаве позволяет получать в соответствии с принципами устойчивого развития легирующие и быстрорежущие стали на малых предприятиях в условиях Дальневосточного региона (ДВР).

**Ключевые слова:** вольфрамосодержащее минеральное сырье, шеелитовый концентрат.

---

The paper presents the concept and methodology of production of material and goods from tungsten-bearing minerals at “separate small-size hightech manufacturing facilities” in compliance with sustainable development criteria. This trend is consistent with the main principles of mineralogical material science. Several electrode and welding materials, which improve physical, chemical and performance characteristics of alloyed, pad and weld seams, were produced based on the presented concept. It is shown that scheelite concentrate can be used for electroslag remelting in production of alloyed and quick-cutting steel at small facilities in the Far East compliant with the principles of sustainable development.

**Keywords:** tungsten-bearing minerals, scheelite concentrate.

---

## Введение

Появление в начале XX века сплавов и керамики с использованием вольфрама (быстрорежущие стали, твердые сплавы) произвело революцию в области обработки материалов и создания износостойких, жаростойких, эрозионностойких сплавов таких, как броневые стали. Прогресс в инструментальной технике и машиностроении сопровождался существенным ростом потребления вольфрама при том, что его содержание в земной коре невелико ( $1 \cdot 10^{-4}\%$ ). Последнее снижало перспективы развития вольфрамодобывающей промышленности на базе известных месторождений, расположенных в основном в восточных регионах страны, при наличии металлургических предприятий главным образом в

отдельных, ранее сложившихся районах на западе России и в зарубежье.

В связи с этим назрела необходимость создания новых перспективных объектов, использующих высокие технологии, при условии приближения промышленных предприятий к местам добычи вольфрамовых руд. Одно из первых мест при решении этой проблемы занимали вопросы экономики, особенно для восточных районов страны с целью устойчивого их развития. Крайне важным также оказался выбор оптимальных экологически щадящих способов разработки месторождений и переработки минерального сырья на малых предприятиях с использованием современных технологий горного дела и металлургической промышленности. Все это позволяло не только удешевить затраты, но и снизить

остроту возможных негативных последствий для природных экосистем.

Цель работы — разработка методики решения указанных задач и анализ попытки их практической реализации, тем более, что в современной литературе такие вопросы не получили должного освещения.

Обычно предлагается создание банка данных по разведанным и прогнозируемым месторождениям в районах, перспективных на запасы промышленных руд вольфрама. Далее требуется последовательное системное и обязательно комплексное использование ряда научно-исследовательских работ геологов, горняков, материаловедов, металлургов, экологов и экономистов по схеме:

[Геология → горное дело → материаловедение → технология (химическая, металлургическая и др.) → материал, изделие] × экология, экономика.

Представляется, что сейчас наиболее перспективным научным направлением является разработка теории и практики получения материалов и изделий непосредственно в районах добычи вольфрама, что существенно сократит затраты на перевозку минерального сырья в западные районы страны. При этом следует предусматривать максимально возможное освобождение от строительства крупных дорого-

стоящих, энергоемких, экологически опасных металлургических и химических комбинатов. Несомненно целесообразен переход на создание минипредприятий (минизаводов) по получению вольфрамовой продукции. Необходимы разработка и применение новейших технологий, как это показано в работах [5, 8]. В этом случае схема производства может быть представлена следующим образом:

[геология → горное дело → минералогическое материаловедение → материал, изделие] × экология, экономика.

Современные достижения минералогического материаловедения показаны в работах [2, 5].

Впервые предпринята попытка комплексного и системного рассмотрения вопросов получения материалов и изделий из вольфрамосодержащего сырья (включая “отходы” его переработки на разных уровнях) непосредственно в регионах его добычи.

### Методология выполнения исследований

В данной работе использован методологический принцип В.И. Вернадского — исследовать явления и процессы “не по наукам, а по проблемам”; в данном случае по проблеме получения вольфрамосодер-

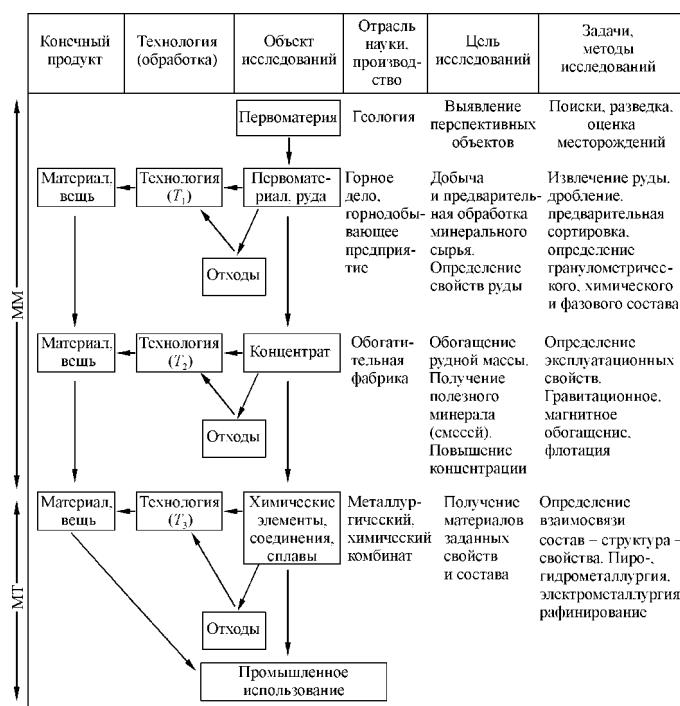


Рис. 1. Методологическая схема последовательных этапов получения материала из минерального сырья. ММ — минералогическое материаловедение; МТ — материаловедение (технология материалов); T<sub>1</sub> – T<sub>3</sub> — различные виды технологии обработки руды, концентратов, химических соединений и их отходов; T<sub>1</sub> – T<sub>2</sub> — технология обработки минерального сырья на минипредприятиях в регионе его добычи. Первоматерия — вещество земной коры; первоматериал — руда; материал — вещество или совокупность связанных между собой веществ, используемых для практической деятельности (идущих на изготовление чего-либо); вещь — изделие, отдельный предмет, имеющий функциональное назначение (пригодный для конкретного использования).

жащих материалов в регионе добычи сырья. На рис. 1 представлена общая методологическая схема выполнения работы, началом которой являются геологические исследования: выявление перспективных объектов, разведка и оценка месторождений. На втором этапе осуществляется добыча и предварительная обработка минерального сырья, исследование гранулометрического, химического, фазового состава руд. В этом случае руда уже может стать сырьем для получения материалов на предприятиях (в том числе на минипредприятиях) с использованием технологии  $T_1$ . На третьем этапе (обогащительная фабрика) происходит обогащение рудной массы, определение состава и свойств концентрата. В этом случае также возможно использование концентрата для получения материалов и изделий с применением технологии  $T_2$  [4].

Следует отметить, что три названные этапа являются начальными в общем кругообороте вещества и материалов во “второй природе” (рис. 2) и предусматривают добычу сырья и получение его

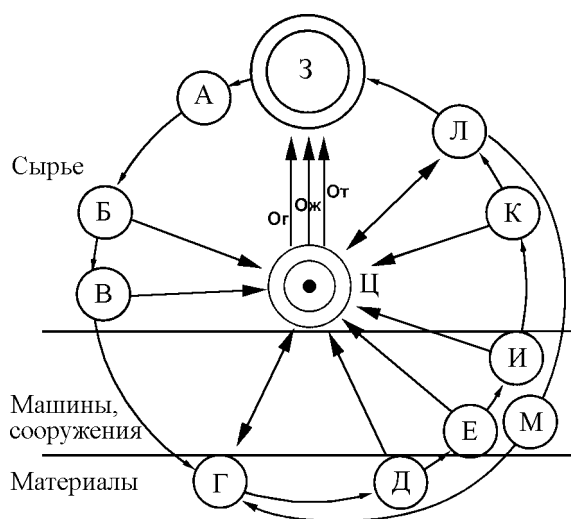


Рис. 2. Циклический кругооборот вещества, материалов и изделий: “вещество–материал–изделие–вещество” в процессе создания “второй природы”. З – земля; А – данные геологических изысканий, банк данных по минеральному сырью; Б – добыча сырья; В – подготовка сырья; Г – получение материалов (металлургическая и химическая обработка с получением элементов и соединений); Д – получение изделий, конструкций, сооружений; Е – использование изделий, конструкций, сооружений; И – поломка, выход из строя изделий, конструкций, сооружений; К – демонтаж, разборка изделий, сооружений, конструкций; Л – переработка отходов (предварительная); М – повторное использование материалов; Ц – центр вторичной добычи сырья, получение материалов; Ог, Ож, От – отходы в газовой, жидкой и твердой фазах соответственно.

из отходов (Ц). Исследование кругооборота вещества и материалов давно уже стало одним из основных разделов материаловедения в ряде стран, например в Германии [9,10].

Четвертый этап (Г на рис.2) — получение химических элементов, сплавов осуществляется на химических и металлургических предприятиях, что является прерогативой материаловедения (МТ), технологии переработки материалов (область МТ рис.1).

Концептуальной основой материаловедения (МТ) является изучение взаимосвязи [7]: “состав – структура – свойства” материалов, в то время как для минералогического материаловедения (ММ): минеральное сырье (состав, структура, свойства) – технология – материал (состав, структура, свойства) – вещь. Этапы получения материалов А, Б, В (рис.2) — являются предметом исследования минералогического материаловедения (рис. 1, этапы I – III).

В соответствии с методологической схемой вначале определяли выборку перспективных месторождений вольфрама в ДВР. Далее проводили определение горного предприятия, осуществляющего добычу и переработку вольфрамсодержащего минерального сырья. Получение материалов и изделий осуществляли с использованием концентратов (по третьему этапу с технологией  $T_2$  (рис. 1).

### Минерально-сырьевая база вольфрама ДВР

ДВР располагает достаточно значимой минерально-сырьевой базой для расширения и усиления вольфрамодобывающей промышленности [4]. По состоянию на 2006 г. ресурсная база вольфрама в ДВР оценивалась в 35 – 37% от общероссийских разведанных запасов и более 60% от общероссийских ресурсов при добыче  $WO_3$  2,8 – 3,6 тыс. т в год. На юге Дальнего Востока, кроме уже используемых собственно вольфраморудных месторождений “Восток-2” и “Лермонтовское”, известен целый ряд вольфрамсодержащих месторождений комплексных Sn – W – Mo руд, из которых вольфрам может извлекаться в качестве сопутствующего компонента.

Месторождения “Восток-2” и “Лермонтовское” относятся к разряду крупных вольфраморудных объектов скарного типа с шеелитовой минерализацией. Среднее содержание  $WO_3$  в отдельных рудных телах этих месторождений при их оценке составляло 0,7 – 2,7%. Отоработка указанных объектов (“Восток-2” с 1977 г., “Лермонтовское” с 1987 г.) в ряде случаев велось хищническим способом, когда изымались главным образом богатые руды, а в госбалансе оставались блоки с нерентабельным

содержанием  $WO_3$ ; Лермонтовский горно-обогатительный комбинат (ГОК) вообще прекратил поставку концентратов.

Вторая группа — вольфрамсодержащие месторождения грейзенового и гидротермального типов с оловянно-вольфрам-молибденовой минерализацией — может быть охарактеризована на примере крупного оловянно-вольфрамового месторождения «Тигриное» в Приморье [4]. Здесь при низких средних содержаниях  $WO_3$  (0,04%) наличие участков более богатых руд (более 1%) и в целом крупнообъемный штокерный тип оруденения позволяют считать, что подобные объекты будут представлять значительный интерес при их обработке.

Технология обогащения вольфрамовых руд, определяемая минеральным составом как собственно рудных тел, так и околорудно измененных вмещающих пород, пока отработана только для шеелитовых руд. К сожалению, вольфрамитовые руды такими исследованиями не охвачены, хотя они отличаются высоким содержанием  $WO_3$ , повышенными количествами полезных компонентов (FeO, MnO) и практически полным отсутствием вредных составляющих. Это оставляет не до конца решенным вопрос о более широких возможностях промышленного освоения запасов  $WO_3$  многих, несомненно перспективных вольфрамсодержащих месторождений ДВР.

#### Получение вольфрамсодержащих материалов непосредственно из минерального сырья

Существующая технология получения вольфрама из вольфрамсодержащего сырья, как правило, включает энергоемкие, многостадийные процессы, экологически небезопасные (сплавление с содой, сульфатом натрия, хлорирование, электролиз расплавленных сред и т.д.). Предлагаемые нами подходы — это прямое использование концентратов для получения материалов на основе критериев устойчивого развития районов добычи, что особенно эффективно с использованием минипредприятий и обеспечивает комплексное использование сырья, экологическую безопасность работ. При этом важно исследование взаимосвязи «сырье — технология — материал (свойства, состав)».

В качестве «сырья» мы использовали шеелитовые концентраты Лермонтовского ГОКа и ГОКа «Восток-2». Ниже приведен фазовый состав концентрата из технологической пробы Лермонтовского ГОКа, наиболее часто используемого в данной работе (вес. %):  $WO_3$  — 59,5;  $SiO_2$  — 2,9;  $CaO$  — 26,8;  $MgO$  — 1,6;  $TiO_2$  — 0,2;  $FeO$  — 0,6;  $Fe_2O_3$  — 3,8;  $Fe_3O_4$  — 1,7;  $Na_2O$  — 0,3;  $K_2O$  — 0,1).

Основополагающим для дальнейших исследований являлся выбор технологий, исключающих использование различных химикатов и, прежде всего, кислот и щелочей, их замена перспективными технологиями концентрированных потоков энергии (дугового, искрового разрядов, плазмы, экстремальных методов порошковой металлургии).

#### Получение электродных материалов из шеелитового концентрата методом металлотермии

Было установлено, что получение композиционных материалов из вольфрамсодержащего минерального сырья наиболее эффективно при использовании метода металлотермии для создания электродных материалов при электроискровом легировании (ЭИЛ) металлических поверхностей (табл. 1, 2).

Термические методы привлекают своей универсальностью, простотой, возможностью получать тугоплавкие соединения непосредственно из минерального сырья за счет высокой (до 3000 К) температуры.

Для синтеза нового класса электродных материалов из шеелитового концентрата использовали метод алюминотермии. При этом было необходимо получение электродных композиционных материалов состава W-металл (Me), где Me — Fe, Ni, Co, Mo, Ti, Zr. Выбор металла связи определялся необходимостью неограниченного его растворения в упрочняемом материале (Fe) и устойчивостью к окислению (Fe, Ni, Co, Cr, Mo). Для сопоставления результатов исследований были также использованы Ti, Zr, обладающие высоким сродством к углероду с образованием наиболее тугоплавких карбидов.

Составлялась специальная шихта, состоящая из шеелитов и оксидов указанных металлов, а также алюминия. Оптимальный подбор состава реакционной шихты обеспечивал температурный режим, необходимый для полного восстановления присутствующих в ней оксидов и устойчивое распределение продуктов реакции на металлическую и шлаковую составляющие [3]. Элементный состав приведен в табл.1, а в табл.2 — физико-механические характеристики покрытий, получаемых методом ЭИЛ, которые имеют повышенные значения свойств по сравнению с используемыми на практике материалами (BK8, W) [3, 6]. Критерием выбора материала легирующего электрода служил средний коэффициент переноса материала,  $K$ :

$$K = \frac{H_m H_{II}}{H_{m(очн)}} \cdot K_{II} K_S,$$

Таблица 1

Элементный состав электродных материалов из шеелитового концентрата

Металлический состав	Среднее содержание элемента, масс %									
	W	Fe	Ni	Co	Mo	Zr	Cr	Al	Si	Оксиды
W – Fe	75,0	21,0	0,3	0,4	0,2	—	—	1,1	1,0	1,0
W – Ni	65,0	1,6	28,0	0,3	0,4	—	—	1,6	1,5	1,6
W – Co	62,0	2,0	0,2	32,0	0,2	—	—	1,2	1,0	1,4
W – Zr	77,5	3,2	6,0	0,3	0,4	5,3	—	2,8	1,6	2,9
W – Cr	77,0	1,6	0,4	0,3	0,3	—	5,3	1,5	1,5	1,4
W – Mo – Co	62,0	2,6	0,2	10,0	20,0	—	—	1,8	1,2	2,1
W – Ni – Mo	61,5	2,4	24,0	0,3	6,5	—	—	2,0	1,3	2,0
W – Ni – Zr	61,5	2,3	25,0	0,3	0,2	6,0	6,0	2,0	1,1	1,5
W – Cr – Mo	62,9	1,5	0,3	0,4	12,0	—	—	1,7	1,4	1,8
W – Cr – Co	52,1	0,9	0,2	19,1	0,3	—	—	1,2	1,1	0,9
W – Ni – Cr	50,3	1,2	26,9	0,3	0,1	—	—	1,1	1,1	0,9
W – Ni – Co	50,2	1,4	26,3	18,3	0,2	—	—	1,1	1,0	1,3
W – Fe – Ti	49,0	29,5	0,3	0,2	0,2	—	—	1,2	1,0	1,1

Таблица 2

Характеристики образуемых покрытий на подложках из стали 45

Материал электродов	Толщина покрытия, мкм	Микротвердость покрытия $H_{\mu}^{50}$ , ГПа	Толщина переходной зоны, мкм	Шероховатость $R_a$ , мкм	Средний коэффициент переноса материала, К	Средняя сплошность покрытия, $K_s$ , %
W – Fe	20 – 100	7,1 – 8,6	15 – 28	3,9 – 7,6	0,75	87
W – Ni	25 – 140	6,9 – 8,3	15 – 35	3,8 – 7,2	0,81	94
W – Co	20 – 80	7,7 – 9,2	12 – 27	3,6 – 7,1	0,80	89
W – Zr	20 – 60	9,7 – 11,8	12 – 27	3,2 – 7,0	0,68	81
W – Cr	15 – 110	9,6 – 10,1	14 – 34	2,8 – 6,9	0,76	93
W – Mo – Co	18 – 86	7,4 – 9,0	16 – 30	3,7 – 7,2	0,74	86
W – Ni – Mo	20 – 90	6,8 – 8,5	14 – 36	3,9 – 7,3	0,77	90
W – Ni – Zr	20 – 70	7,6 – 9,8	13 – 25	3,5 – 7,1	0,75	85
W – Cr – Mo	19 – 90	9,5 – 10,0	12 – 28	2,8 – 7,0	0,73	92
W – Cr – Co	15 – 56	7,8 – 9,2	10 – 33	4,5 – 8,8	0,59	94
W – Ni – Cr	16 – 62	7,6 – 8,8	10 – 34	4,1 – 8,1	0,69	94
W – Ni – Co	20 – 104	7,2 – 8,3	12 – 36	3,9 – 8,4	0,77	96
W – Fe – Ti	20 – 60	7,9 – 9,4	12 – 26	3,4 – 7,4	0,68	88
BK8	15 – 50	9,8 – 10,5	13 – 26	2,8 – 6,6	0,56	86
W	10 – 46	7,4 – 8,9	6 – 21	2,8 – 8,1	0,38	82

где  $H_m, H_{\Pi}$  — микротвердости материала и покрытия, соответственно,  $R_a$  — шероховатость,  $H_{m(осн)}$  — микротвердость материала основы,  $K_s = K_{сп} / K_{ск}$ ,  $K_{сп}$  — площадь покрытия,  $K_{ск}$  — площадь упрочняемой поверхности. Наибольшую эффективность процесса электроискрового легирования наблюдали при использовании металлических связей: Ni – Mo, Ni – Co, Cr – Mo.

### Использование шеелита при получении сварочных электродов

В настоящее время для получения легирующих сварочно-наплавочных материалов, как правило, используются дорогостоящие и дефицитные чистые химические элементы или их соединения, которые вводят в состав сварочных проволок, флюсов, элект-

родных обмазок или присадочных ферросплавов. Это существенно ограничивает экономически выгодные масштабы применения легированных сплавов и покрытий, значительно усложняет технологические процессы сварки, наплавки и переплава металлов.

Анализ технологических процессов сварки показал, что при всех способах (кроме способа в среде защитных газов) электродный материал от начала его плавления до кристаллизации постоянно находится в контакте с жидким шлаком, образующимся при плавлении флюсов или электродных обмазок. Высокий градиент температур и большое количество тепла в ограниченном объеме позволяют легировать его элементами, находящимися в шлаке, и использовать для этого не чистые металлы, а минеральное сырье [1].

В этой связи мы использовали шеелит в обмазках для сварочных электродов, в составе шихты для

автоматической дуговой наплавки и электрошлаковым переплаве.

**Керамические легирующие флюсы на основе шеелитового концентрата для автоматической дуговой наплавки**

По результатам экспериментальных исследований серии флюсов с различными восстановителями установлено, что наиболее рациональным является ферросилиций в количестве 10 масс.%. Для повышения технологических свойств и более качественной металлургической обработки жидкого сплава в состав шихты введены гранит и флюоритовый концентрат (табл. 3, флюс ОФ4). При таком составе флюса наблюдается наибольший переход вольфрама (8,9 масс.%) в переплавляемую низкоуглеродистую электродную сталь (табл. 4).

Исследованы механические свойства (табл. 5) и микроструктура покрытия, сформированного с применением созданного флюса, которая состоит из равноосных кристаллов ферритно-перлитной смеси с  $H_{\mu} = 3,07 - 3,39$  ГПа и включениями карбидов с размерами 150 – 450 мкм в поперечнике и микротвердостью 107 – 12,3 ГПа. Рентгенофазовыми исследованиями установлено, что вольфрам находится в составе карбидных фаз, эвтектоидном цементите и интерметаллидах  $Fe_3W_2$ . Коэффициент

износостойкости относительно закаленной в масле стали 40ХН составляет 1,46.

При формировании флюса на основе шеелитового концентрата в качестве раскислителей вводили графит и флюорит, для которых экспериментально установлены пороговые значения масс.%.: 20 – 22 и 15 – 17, соответственно.

В результате исследований определен наиболее рациональный химический состав флюса, масс.%.: 12 графит; 43,40  $WO_3$ ; 2,12  $SiO_2$ ; 19,56  $CaO$ ; 1,26  $MgO$ ; 15,00  $CaF_2$ ; 0,44  $FeO$ ; 2,76  $Fe_2O_3$ ; 1,31  $Fe_3O_4$ ; 0,17  $Na_2O$ ; 0,11  $K_2O$ ; 0,17  $S$ ; 0,23  $P$ ; прочие 1,47. Серией опытных переплавов проволоки Св-08ГА под флюсом отмеченного состава достигнут полный переход вольфрама из оксидов шлаковой ванны в полученный сплав, где его количество составило 7 – 8 масс.%. Микроструктура состоит из смеси феррита с  $H_{\mu} = 2,28 - 2,77$  ГПа, на фоне которого присутствуют включения карбидов  $Fe_3W_3C$  с размерами частиц 0,5 – 0,45 мкм, перлита (грубопластинчатого с  $H_{\mu} = 3,41 - 4,89$  ГПа) и сложных карбидов  $Fe_3W_3C$  и интерметаллидов  $Fe_3W_2$ . Исследование элементного состава сканированием в отраженных электронах показало фазовую неоднородность сплава. В сравнительно гомогенной матрице наблюдаются микровключения, расположенные по границам зерен в виде отдельных конгломератов с размерами до 40 мкм в поперечнике. Сканированием в рентгеновских лучах установлено значительное обогащение микровключений вольфрамом, превышающим его количество в матрице. Менее насыщенная вольфрамом матрица, с равномерным его распределением, состоит из легированных феррита и перлита, что подтверждается изменением содержания вольфрама в матрице по границам зерен. После закалки и низкого отпуска структура преобразовалась в низкоуглеродный мартенсит и троостомартенсит с микротвердостью 12,33 ГПа. Износостойкость полученного сплава соответствует закаленной стали 40ХН. После переплава с добавлением углерода и молибдена он может быть преобразован в быстрорежущую сталь типа Р6М5.

Показана возможность использования шеелитового концентрата не в качестве базовой составляющей флюсов, а в качестве легирующей добавки. В этом случае за основу предложено использовать

Таблица 3

Структурные составляющие опытных флюсов

Флюс	Состав, масс. %					
	Шеелит	Флюорит	Гранит	Графит	Al	FeSi
ОФ1	70	20	—	10	—	—
ОФ2	70	20	10	—	—	—
ОФ3	60	15	10	—	15	—
ОФ4	75	10	5	—	—	10

Таблица 4

Химический состав покрытий, наплавленных под опытными флюсами

Флюс	Состав покрытий, масс. %					
	C	W	Mn	Si	S	P
ОФ2	0,060	1,83	0,87	0,34	0,035	0,028
ОФ3	0,055	5,22	1,70	0,83	0,038	0,023
ОФ4	0,056	8,90	1,75	0,51	0,036	0,024

Таблица 5

Механические свойства покрытий, наплавленных под опытными флюсами

Флюс	Свойства покрытий					
	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\alpha_H$ , (кгс·м)/см <sup>2</sup>	НВ	Коэффициент формы шва	Угол загиба, град.
ОФ2	58 – 63	42 – 47	5,1 – 5,3	179 – 192	1,47 – 1,52	111 – 114
ОФ3	74 – 89	54 – 62	2,6 – 3,5	228 – 255	1,58 – 1,61	109 – 110
ОФ4	77 – 92	46 – 65	4,5 – 4,7	246 – 262	1,71 – 1,73	113 – 115

Таблица 6

Химический состав шихты обмазок опытного электрода, масс.%

SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	WO <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	C	Прочие
9,16	35,09	3,26	11,9	20	1,81	0,39	0,91	15	2,48

Таблица 7

Химический состав и механические свойства наплавленного металла

Основные элементы, масс.%						Механические свойства			
C	Si	Mn	W	S	P	σ <sub>в</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	α <sub>ц</sub> , (кгс·м)/см <sup>2</sup>	НВ	Угол загиба, град.
0,63	0,32	0,29	0,9	0,04	0,03	67,0	3,5	275	85

породообразующий минерал доломит. Экспериментально установлено, что он является хорошим шлако- и газообразующим материалом, значительно повышает десульфурующую способность шлака, проводит электрический ток в жидком состоянии, увеличивает общую активность сварочной ванны.

Анализом моделей и экспериментальными исследованиями подтверждено, что подбором составов флюсов возможно получение большой группы вольфрамсодержащих машиностроительных сталей с широким диапазоном эксплуатационных свойств, предназначенных для изготовления режущего, измерительного, штампового и ударного инструментов. Так, при использовании флюса с содержанием доломита 50% получен сплав следующего химического состава, масс. %: 0,76 C; 2,8 W; 2,04 Mn; 0,07 Si; 0,08 Ti; 0,023 S; 0,028 P.

**Электроды с обмазками с шеелитовым концентратом в качестве легирующего компонента**

На основании принципов выбора сырья, информации банка данных, результатов анализа параметров системы “технология – сырье” за основу шихты обмазок принята шихта электродов общего назначения, в которых ферросплавы заменены шеелитовым концентратом.

Установлены составы обмазок, масс. %: 29,0–37,0 известняка; 8,0 гранит; 20,0 флюорит; 15,0–18,0 графит; 20,0–37,0 шеелитовый концентрат, при которых наплаваемый металл легируется вольфрамом до 0,9 – 1,1 масс.%. Получены и исследованы функциональные зависимости системы “состав шихты – свойства покрытий”. Экспериментальную проверку проводили на опытных электродах, химический состав шихты которых приведен в табл. 6. В табл. 7 показаны состав и механические свойства легированного вольфрамом покрытия, сформированного опытным электродом, которые соответствуют свойст-

вам низколегированных, высокой прочности сталей типа 15ГСХМ, 15Г2С, 17Г1С и др. При этом их износостойкость выше стали 40ХН на 12%. Микроструктура наплавленного металла состоит из зернистого перлита, сетки легированного вольфрамом цемента и сложных карбидов Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C.

По результатам экспериментальных исследований разработана модель системы “состав – свойства”, после оптимизации которой получены контурные кривые для поверхности откликов и сварочных швов с заданными свойствами.

После трехчасового отжига при 960°С, последующей закалки в масле с температурой 870°С и низким отпуском при 150°С в течение 2 ч сформировалась микроструктура, представляющая смесь легированных мартенсита и троостита. Твердость сплава составляет HRC 58 – 61, ударная вязкость 4,7 кгс/см<sup>3</sup> и износостойкость относительно стали 40ХН-1,08. Такие свойства соответствуют свойствам низколегированных инструментальных сталей для изготовления протяжек, метчиков, плашек, калибров, деревообрабатывающего инструмента.

**Наплавочные электроды с обмазками на основе многокомпонентных минеральных ассоциаций, содержащих оксиды легирующих элементов**

В качестве основы шихты обмазок принят шеелитовый концентрат, а раскислителя и восстановителя — флюорит и углерод в количестве 20 и 10 масс.%, соответственно. По разработанному алгоритму впервые созданы электроды с обмазками (химический состав которых приведен в табл. 8), позволяющими формировать наплавленные покрытия с содержанием вольфрама 6 – 9 масс. %.

Установлено, что на переход вольфрама и углерода в низкоуглеродистую электродную сталь существенное влияние оказывает толщина обмазки.

Максимальное их количество в наплавленном покрытии (9,1 и 0,35 масс. % вольфрама и углерода,

Химический состав шихты обмазок опытных электродов, масс.%

SiO <sub>2</sub>	WO <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaF <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	Прочие
2,03	41,65	18,76	1,15	20	0,14	0,43	10	5,84

соответственно) наблюдается при использовании электродов с особо толстой обмазкой:

$$D/d = 1,85 - 1,92,$$

где  $D$  — диаметр углерода с обмазкой, мм;  $d$  — диаметр сердечника, мм. Технологические показатели созданных электродов соответствуют стандартным.

### Заключение

Предпринята попытка использования комплексного и системного подходов для решения проблемы получения материалов и изделий из вольфрамсодержащего минерального сырья в районах его добычи с целью определения возможности их устойчивого развития. Комплексность решения проблемы состояла в объединении усилий и исследований геологов, горняков, материаловедов, механиков, экологов, экономистов, а системность — в разработанной методологии на основе выводов и концепций минералогической материологии. При этом определены перспективные технологические процессы с использованием концентрированных потоков энергии, изучены физико-химические процессы при воздействии дуговых, искровых разрядов на минеральное сырье, приводящее к изменению его химического, фазового составов. Получены электродные, а также сварочно-наплавочные материалы и легированные вольфрамом стали. При этом вольфрамсодержащее минеральное сырье использовалось комплексно без предварительной химической переработки, что создает благоприятные предпосылки приближения производства материалов и изделий к местам его добычи на малых предприятиях с использованием высоких технологий. Можно полагать, что подобные подходы будут приемлемы и

для переработки не только вольфрамового, но и другого минерального сырья.

### Литература

1. Бабенко Э.Г., Верхотуров А.Д., Григоренко В.Г. Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения. Владивосток: Дальнаука, 2004, 224 с.
2. Верхотуров А.Д. Минералогическое материаловедение как раздел науки о материалах. Химическая технология, 2002, № 7, с. 2 – 8.
3. Верхотуров А.Д., Мулин Ю.И., Гостищев В.В. Получение электродов из шеелитового концентрата при применении метода металлотермии. Электронная обработка металлов, 1994, № 5, с. 70 – 73.
4. Верхотуров А.Д., Романовский Н.П., Шнайдер А.А. К вопросу о промышленном получении материалов из вольфрамсодержащего сырья в Дальневосточном регионе. Вестник ДВО РАН, 2010, № 1, с. 75 – 80.
5. Верхотуров А.Д., Фадеев В.С. Некоторые вопросы современного состояния и перспективы развития материаловедения. Владивосток: Дальнаука, 2004, 320 с.
6. Верхотуров А.Д., Мулин Ю.И., Гостищев В.В. Способ получения композиционного материала из вольфрамсодержащего минерального сырья. Патент 2098232 Российской Федерации. В22. F3/23 C22C1/05. №95118518/02, заявл. 25.10.95, опубл. 10.12.97. Бюлл. №24, 5 с.
7. Плутенко А.Д., Верхотуров А.Д., Лебухова Н.В. Информационные технологии в решении задач материаловедения. Владивосток: Дальнаука, 2001, 142 с.
8. Резниченко В.А., Липихина М.С., Морозов А.А. и др. Комплексное использование руд и концентратов. М.: Наука. 1989, 172 с.
9. Hornbogen E. Werkstoffe. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2006, 558 с.
10. Hornbogen E., Eggler G., Werner W. Werkstoffe. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2008, 594 с.

**Верхотуров Анатолий Демьянович** — Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (г. Хабаровск), доктор технических наук, главный научный сотрудник. Специалист в области материаловедения. E-mail: iver@iver.as.khb.ru.

**Воронов Борис Александрович** — Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (г. Хабаровск), доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор института. Специалист в области антропогенной динамики экосистем. E-mail: iver@iver.as.khb.ru.

**Романовский Николай Петрович** — Институт тектоники и геофизики ДВО РАН (г. Хабаровск), доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник. Специалист в области поисков и оценки месторождений минерального сырья. itig@itig.as.khb.ru.