

ЙОДИДНЫЙ ГАФНИЙ. ПОЛУЧЕНИЕ, СОСТАВ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ В МАТЕРИАЛАХ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, А.О. Ланидус, М.Г. Штуца, А.В. Александров*, С.Г. Ахтонов*, В.В. Антипов*, Р.Ф. Бекмансуров*, С.Ю. Кулешов*, Д.А. Негодин**
*ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии»,
 Москва, Россия*

E-mail: kotsar@vniit.ru;

**ОАО «Чепецкий механический завод», Глазов, Россия*

E-mail: post@chmz.net

Показана роль чистоты гафния при получении пластин для кассет автоматического регулирования и компенсации в ВВЭР-440. Использование высокочистого (йодидного) гафния в составе шихты для выплавки слитков методом вакуумно-дугового переплава позволяет повысить выход годного материала на последующих деформационных стадиях и получить необходимые свойства пластин.

Металлический гафний используют в ядерной энергетике благодаря уникальным поглощающим ядерно-физическим характеристикам, высокой прочности и пластичности, технологичности, коррозионной и радиационной стойкости [1-3]. Его применяют главным образом в виде пластин в кассетах автоматического регулирования и компенсации в ВВЭР-440 [4] для гашения локальных всплесков нейтронных потоков, а также в исследовательских реакторах РФ и КНР.

На территории СНГ металлический гафний для ядерной энергетике получают методами кальцие-термического (Украина, г. Днепродзержинск, ГНПП «Цирконий») и электролитического восстановления (РФ, г. Глазов, ОАО ЧМЗ) тетрафторида [5-7] и гексафторцирконата калия [8] соответственно. Наиболее чистый гафний получают методом йодидного рафинирования [9, 10]. В промышленных условиях йодидный гафний получают из оборотов плавильного и деформационного переделов и некондиционного электролитического порошка [11].

Процесс йодидного рафинирования обеспечивает глубокую очистку гафния от примесей и позволяет получать металл в компактном виде, снижая его активность к воздействию внешних факторов. Преимущество процесса йодидного рафинирования заключается в том, что он позволяет перерабатывать различные отходы металлов, образующиеся при изготовлении изделий, и при этом получать металлы высокой степени чистоты в форме компактных прутков, удобной для последующей переработки [11]. В промышленных условиях процесс йодидного рафинирования гафния осуществляют в металлических аппаратах полочного типа, изготовленных из хромоникелевых сплавов, в частности, из сплава марки ХН78Т [12]. Осаждение металла проводят на четыре гафниевые нити в форме шпилек круглого или прямоугольного сечений площадью примерно 12,5 мм², общей длиной 6,0...6,4 м, последовательно соединённые между собой. Внешний вид прутков йодидного гафния приведен на рис. 1.

Химический состав йодидного гафния (ИГ) соответствует марке ГФИ-1 по ГОСТ 22517-77. Сумма

16 определяемых примесей в нём не превышает 0,05%, в том числе азота < 0,002; водорода < 0,0008; кислорода < 0,007; углерода < 0,006%. Микротвёрдость прутков йодидного гафния находится в интервале 1760...1930 МПа (179...197 кгс/мм²) [11, 13].



Рис. 1. Прутки йодидного гафния, полученного в аппарате Г-20 из оборотов плавильного и деформационного переделов

Процесс и аппаратура йодидной очистки отходов и оборотов металлического гафния внедрены в производство ОАО ЧМЗ. Освоен промышленный выпуск йодидного гафния, который может быть увеличен при росте потребности и наличии необходимого количества сырья. Разработано программное обеспечение (ПО) для автоматизированного ведения процесса йодидного рафинирования гафния в аппаратах Г-20 в печах СКБ-5027. Программное обеспечение протестировано в лабораторных условиях на макете стенда в ОАО ВНИИХТ, состоящего из компьютера, контроллера реального времени с модулями ввода-вывода, используемого ранее для отработки ПО для автоматизации процесса йодидного рафинирования циркония [14].

Способ получения пластин кассет АРК ВВЭР-440 разработан ОАО ВНИИИМ им. А.А. Бочвара [4]. В качестве исходного материала

ла на первом этапе в 2005 г. использовали слитки кальциетермического гафния (КТГ), выпускаемого ГНПП «Цирконий» (рис. 2). Из-за неравномерности химического состава и высокой твёрдости исходного металла выход годного материала от слитка в пластины не превышал 20...30%. Для устранения этого недостатка, по аналогии с технологией циркония, было рекомендовано вводить в состав шихты вакуумно-дугового переплава (ВДП) ИГ. Фотография прутков ИГ, полученных в аппарате Г-3 осаж-

дением на молибденовую нить, приведена на рис. 3. Электрод для выплавки опытного слитка гафния на основе двойной шихты (КТГ + ИГ) показан на рис. 4. Химический состав компонентов электрода и слитков электронно-лучевого переплава (ЭЛП) и ВДП приведен в табл. 1. В ней также показаны средние результаты измерения твёрдости образцов по Бринеллю (НВ). Твёрдость слитка после второго ВДП составила примерно половину от суммы НВ КТГ и ИГ.

Таблица 1

Химический состав и твёрдость исходных йодидного и кальциетермического гафния и слитков ЭЛП и ВДП

Элемент	Массовая доля, %						
	Прутки ИГ (№8) ГФИ-2	Слиток ЭЛП (№74)	Слиток КТГ 2 ЭЛП (№78)	Прутки ИГ (№13, 16) ГФИ-1	Слиток 2 ВДП (КТГ + ИГ)		
					верх	низ	бок
1. Цирконий + гафний	99,76	99,77	>99,88	–	99,86	99,84	99,88
2. Цирконий	0,56	0,54	0,3	0,84; 0,58	0,64	0,49	0,62
3. Азот	<0,003	0,003	0,0049	<0,003	0,0054	0,0047	0,0051
4. Алюминий	<0,003	0,003	0,003	<0,003; 0,0042	0,0024	0,0028	0,0025
5. Водород	–	–	–	–	0,00009	<0,00007	–
6. Вольфрам	–	–	–	–	<0,003	<0,003	<0,003
7. Железо	0,0052	0,003	0,0083	0,0073; 0,03	0,012	0,015	0,011
8. Кальций	<0,01	<0,001	<0,01	<0,01	<0,003	<0,003	<0,003
9. Кислород	0,02	0,03	0,039	0,02; 0,04	0,026	0,017	–
10. Кремний	<0,003	0,004	0,011	0,004; <0,003	0,0091	0,012	0,0098
11. Магний	<0,001	<0,003	<0,003	<0,003; <0,001	<0,001	<0,001	<0,001
12. Марганец	<0,0003	<0,0003	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
13. Медь	–	–	0,001	–	<0,001	<0,001	<0,001
14. Молибден	0,155	0,16	0,0038	0,066; 0,073	0,042	0,053	0,052
15. Никель	0,022	0,001	<0,003	0,01; 0,038	0,0070	0,015	0,0076
16. Ниобий	–	–	–	–	<0,01	<0,01	<0,01
17. Титан	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
18. Углерод	0,005	0,005	0,022	0,005	0,012	0,013	0,012
19. Фтор	–	<0,003	<0,003	–	–	–	–
20. Хром	<0,003	<0,001	<0,003	0,003	0,0020	0,0017	0,0017
21. Твёрдость, НВ _{ср}	–	–	240	135	183	197	185



Рис. 2. Слиток кальциетермического гафния, выплавленный в печи ЕМО-250



Рис. 3. Прутки йодидного гафния марки ГФИ-1, полученные в аппарате Г-3



Рис. 4. Электрод для ВДП двойной шихты (КТГ + ИГ)

В результате проведения научно-исследовательских работ на первом этапе в 2005 г. после двух ВДП двойной шихты (56,8% КТГ + 43,2% ИГ) в печи VAR L-200 (рис. 5) из слитка диаметром 158 мм (рис. 6) после разрезания его

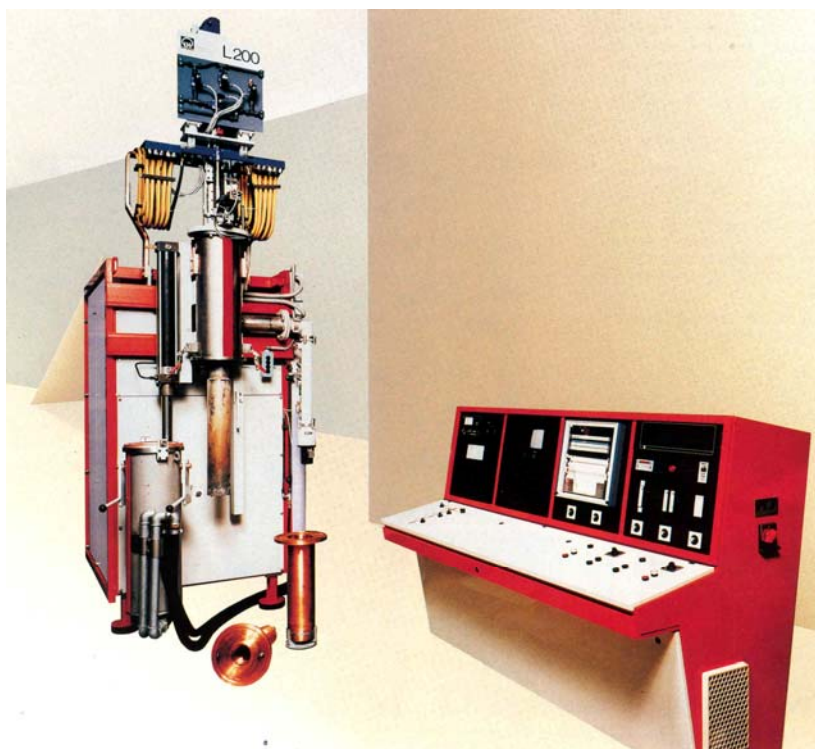


Рис. 5. Вакуумно-дуговая печь VAR L-200

В настоящее время ОАО ЧМЗ освоено промышленный выпуск электролитического порошка гафния. Электролитический порошок гафния имеет в 2...3 раза большее содержание примесей по сравнению с йодидным металлом. Уменьшение содержания примесей в электролитическом и оборотном гафнии достигается путём использования на первой стадии рафинирующего ЭЛП. В соответствии с данными работы [15] в процессе ЭЛП происходит очистка гафния от алюминия, бора, железа, кислорода, кремния, титана, хрома и циркония. При этом твёрдость слитков снижается примерно на 40 единиц НВ. ВДП двух- и трехкомпонентной шихты приводит к повышению чистоты слитков за счёт разбавления основы более чистым (йодидным) металлом.

Гафний в виде йодидных прутков, электролитического порошка и производственных оборотов в

на прямоугольные темплеты толщиной 12 мм, многократной горячей и холодной деформацией с промежуточными травлениями и отжигами были изготовлены опытные пластины с размерами 150 x 76 x 0,6 мм для кассет АРК ВВЭР-440 по ТУ 001.369-98 (рис. 7) и 350 x 69 x 2 мм для опытных ПЭЛ реактора СМ ГНЦ РФ НИИАР. Пластины размерами 150 x 76 x 0,6 мм были изготовлены также из слитка гафния, выплавленного электронно-лучевым способом из йодидного гафния марки ГФИ-2 (см. табл. 1). Прямой выход гафния от литой заготовки до готовой пластины АРК ВВЭР-440 составил в среднем 40,4%. 41,4% гафния перешло в обороты; 15,1% – в травильные растворы. Микро-твёрдость литого и деформированного гафния в исходном и отожженном состояниях приведена в табл. 2. Физико-механические свойства при растяжении пластин толщиной 2 и 0,6 мм – в табл. 3.

различном соотношении в составе шихты использовали для выплавки слитков марки ГФЭ-1 по ТУ 001.402-2008 и последующего изготовления пластин размером 150×76,2×0,6 мм (чертёж 445.01.016) по техническим условиям ТУ 001.403-2008 [16, 17]. Всего было получено 7 слитков диаметром 160 мм и массой 80...100 кг, выплавленных из шихты различного состава:

- два слитка из 100% оборотов (обрезь при вырубке пластин на готовом размере);
- два слитка из 100% йодидных прутков;
- один слиток из 10% электролитического порошка гафния;
- два слитка из тройной шихты (70% порошка; 20% йодидных прутков; 10% оборотов).



Рис. 6. Опытный слиток массой 22 кг и диаметром 158 мм, выплавленный из двойной шихты (КТГ + ИГ)



Рис. 7. Пластины, изготовленные из слитка гафния, выплавленного из двойной шихты

Таблица 2

Микротвёрдость литого (2 ВДП) и деформированного гафния в исходном и отожжённом состояниях

Номер образца	Состояние	Микротвёрдость Н ₀	
		МПа	кгс/мм ²
4	Литое исходное	1880...1930/ср. 1900	192...197/ср. 194
7	Литое исходное	2040...2100/ср. 2080	208...214/ср. 212
0	Деформированное исходное	2550...2630/ср. 2600	260...268/ср. 265
1	Деформированное исходное	2460...2550/ср. 2520	251...260/ср. 257
3	Деформированное отожжённое	1880...1930/ср. 1910	192...197/ср. 195
4	Деформированное отожжённое	1820...1930/ср. 1880	186...197/ср. 192

Таблица 3

Физико-механические свойства при растяжении пластин толщиной 2 и 0,6 мм

Номер образца	Размер пластины, мм	Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	σ_b , МПа (кгс/мм ²)	δ , %
0	350x69x2	Деформированное исходное	687 (70,0)	775 (79,0)	4,8
1	350x69x2	Деформированное исходное	716 (73,0)	775 (79,0)	5,8
3	350x69x2	Деформированное отожжённое	353 (36,0)	530 (54,0)	18,0
4	350x69x2	Деформированное отожжённое	368 (37,5)	520 (53,0)	14,0
–	150x76x0,6	Деформированное отожжённое	177 (18,0)	530 (54,0)	37,0
ТУ	001.369-98	Деформированное отожжённое	≥150 (15)	≥400 (40)	≥12

Слитки из 100% йодидных прутков изготавливали по схеме двойного вакуумно-дугового переплава (ВДП–ВДП), остальные – по схеме рафинирующий электронно-лучевой переплав–вакуумно-дуговой переплав (ЭЛП–ВДП). В табл. 4 приведены интервалы содержания примесных элементов в слитках из шихты различного состава. Наименьшая сумма примесей (без учета сопутствующего элемента Zr) у слитков, выплавленных на йодидной основе, затем у слитков из тройной шихты и электролитического порошка, а наибольшая – у оборотного металла.

Пластины из всех слитков получены по одинаковой схеме. Изготовление пластин включает: горячую ковку слитков, механическую обработку поковок, последующую горячую и холодные прокатки с промежуточными и финишным отжигами листов, вырубку пластин в размер и механическую обработку. Внешний вид пластины приведен на рис. 8.

Изготовленные пластины проходят контроль на соответствие требованиям ТУ 001.403-2008 (внешний вид и механические свойства). Результаты механических испытаний на растяжение, включая КТГ + ИГ, показаны в табл. 5 и на рис. 9. Установлено, что свойства пластин из всех видов шихт соответствуют требованиям ТУ 001.403-2008. Пластины, изготовленные из слитков ИГ, характеризуются пониженным уровнем прочностных свойств и высокой пластичностью ($\sigma_b = 366,6...385,0$ МПа; $\sigma_{0,2} = 180,7...188,8$ МПа; $\delta = 42,0...42,7\%$). Пластины из слитков на основе электролитического порошка имеют высокие прочностные характеристики ($\sigma_b = 507,7$ МПа; $\sigma_{0,2} = 304,1$ МПа; $\delta = 31,0\%$). Пластины из тройной шихты имеют высокий уровень прочностных характеристик при более высоком значении относительного удлинения по сравнению с шихтой из 100% электролитического

порошка ($\sigma_b = 500,3 \dots 510,1$ МПа; $\sigma_{0,2} = 295,1 \dots 306,6$ МПа; $\delta = 32,0 \dots 33,7\%$), причём в этом случае важную роль играет вид материала, из которого получены обороты [17].



Рис. 8. Внешний вид пластины 150×76,2×0,6 мм

Из анализа данных табл. 5 и рис. 9 можно сделать следующие выводы.

1. Основное влияние на качественные характеристики пластин оказывает различие в содержании кислорода, азота и углерода (см. табл. 4). При изготовлении пластин из оборотного металла отсутствует стабильность по характеристикам механических свойств.

2. Пластины, изготовленные из слитков йодидно-гафния, как наиболее чистого металла, характе-

ризуются пониженным уровнем прочностных свойств и высокой пластичностью, что обусловлено низким содержанием вышеперечисленных примесей.

3. Слиток, выплавленный на основе электролитического порошка, позволил получить пластины с высокими прочностными характеристиками, но с пониженной пластичностью.

4. Ранее полученные данные по свойствам пластин из слитка двойной шихты (57% КТГ + 43% ИГ) в полной мере соответствуют установленным закономерностям.

Повышение технико-экономических показателей производства требует обязательного вовлечения в процесс оборотного металла при выпуске изделий. В этом случае поддержание характеристик продукции на оптимальном уровне и их стабилизация возможны при добавлении в состав шихты при выплавке слитков йодидного металла. Это реализовано в схеме получения слитков на основе трехкомпонентной шихты: оборотов, электролитического порошка и йодидного металла. Ограниченное содержание оборотного металла не приводит к нестабильности свойств, а использование порошка обеспечивает высокий уровень механических свойств.

Таблица 4

Интервалы массовых долей примесных элементов в слитках из шихты различного состава, %

Элемент	Состав шихты слитков											
	100% оборотов (2 слитка)			100% йодидных прутков (2 слитка)			100% порошка (1 слиток)			Тройная шихта: 70% порошка, 20% йодидных прутков, 105% оборотов (2 слитка)		
	Min	Max	Среднее	Min	Max	Среднее	Min	Max	Среднее	Min	Max	Среднее
Zr	0,24	0,31	0,28	0,43	0,52	0,46	0,67	0,68	0,68	0,63	0,67	0,65
N	<0,003	0,0073	0,0042	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
C	0,005	0,0082	0,0069	<0,003	0,0023	0,0021	0,0062	0,0072	0,0067	0,0057	0,0067	0,0061
O	0,018	0,023	0,021	0,01	0,011	0,01	0,015	0,018	0,017	0,017	0,023	0,02
Fe	<0,003	0,0037	0,0033	<0,003	0,005	0,0044	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Si	0,0037	0,0048	0,0044	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Ni	<0,003	0,0073	0,0042	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Ti	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Al	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Ca	<0,003	0,0042	0,0033	<0,003	0,003	0,003	0,0057	0,006	0,0059	<0,003	<0,003	<0,003
Mg	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Mn	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Cr	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Cu	<0,001	0,0012	0,0011	<0,001	0,0013	0,0011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Nb	0,0063	0,011	0,0087	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Mo	0,0087	0,091	0,0391	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,018	0,0105	0,0031	0,013	0,0096
W	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Zr+Hf	99,9	99,8	99,88	99,9	99,9	99,94	99,9	99,9	99,92	99,9	99,9	99,92
Сумма примесей без Zr+Hf	–	–	0,1115	–	–	0,0566	–	–	0,0744	–	–	0,073

Механические свойства пластин, изготовленных из слитков различного шихтового состава

Шихтовой состав	Слиток	Механические свойства		
		Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
100% оборотов	№1	342,1	179,0	42,0
	№2	490,5	206,0	38,4
	среднее	416,3	192,5	40,2
100% йодидных прутков	№1	385,0	180,7	42,7
	№2	366,6	188,8	42,0
	среднее	375,8	184,8	42,4
100% порошка	№1	507,7	304,1	31,0
Тройная шихта: – 70% порошок; – 20% йодидные прутки; – 10% обороты	№1	510,1	306,6	32,0
	№2	500,3	295,1	33,7
	среднее	505,2	300,8	32,8
Двойная шихта: – 57% КТГ; – 43% йодидные прутки	№1	530	177	37
Требования ТУ 001.403-2008,		≥ 300	≥ 150	≥ 12

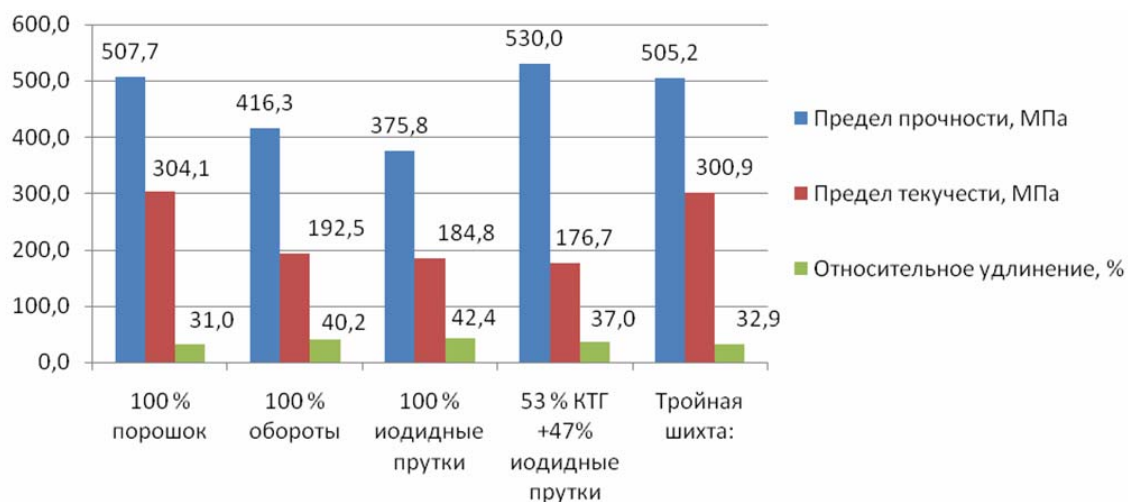


Рис. 9. Механические свойства пластин (средние данные)

С целью снижения себестоимости продукции и повышения выхода готовой продукции в настоящее время в ОАО ЧМЗ осваивается схема получения пластин из укрупненных слитков гафния диаметром 320 мм и массой 700...1000 кг [16].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Д. Рисованый, Е.П. Клочков, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград: НИИАР, 1993, 143 с.
2. В.Д. Рисованый, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, В.Б. Пономаренко, Е.М. Муралёва, Т.М. Гусева. *Поглощающие материалы стержней управления и защиты ядерных реакторов*. Ульяновск, 2012, 442 с.
3. В.Д. Рисованый, А.А. Васильев, Б.А. Шилиев, Р.В. Ажажа, К.В. Ковтун. Гафний – материал для

компенсации избыточной реактивности в ядерных энергетических реакторах // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2013, №2(84), с. 118-122.

4. А.К. Шиков, О.В. Бочаров, В.М. Аржакова, В.Н. Безумов, Ю.А. Перлович, М.Г. Исаенкова. Применение гафния для органов регулирования ядерных реакторов и энергетических установок // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003, №8, с. 20-23.

5. М.Л. Коцарь, В.М. Ажажа, М.И. Борисов, П.Н. Вьюгов, А.Н. Иванов, Ю.Ф. Коровин, К.А. Линдт, А.П. Мухачев, В.Д. Федоров, В.Г. Чупринко. Получение чистых циркония и гафния // *Высокочистые вещества*. 1992, №4, с. 85-92.

6. Ю.Ф. Коровин, В.Г. Чупринко, К.А. Линдт, А.П. Мухачёв, В.Д. Фёдоров, М.Л. Коцарь. Производство циркония и гафния в ПО "ПХЗ" для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1994, в. 2(62), 3(63), с. 114-124.

7. В.В. Шаталов, В.Д. Фёдоров, М.Л. Коцарь, В.Г. Чупринко, К.А. Линдт, А.М. Лахов, А.П. Мухачёв, В.М. Ажажа, В.К. Коронцевич, О. В. Бочаров, В.Б. Пономаренко, Е.П. Клочков, В.Д. Рисованый. Экстракционно-кальциетермическая технология получения гафния // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, №2(77), с. 9-13.

8. М.Г. Штуца, А.Г. Зиганшин, А.В. Александров, Р.Ф. Бекмансуров. Использование йодидного металла для выплавки промышленных слитков циркония и гафния // *Тез. докл. Международной конференции «Высокочистые металлы: получение, применения, свойства»*, 15–18 ноября 2011 г., Харьков, 2011, с. 24.

9. А.В. Елютин, Н.Д. Денисова, А.П. Баскова, О.П. Быстрова. Поведение примесей в процессе йодидного рафинирования циркония и гафния // *Научные труды ГИРЕДМЕТА*. М.: ГИРЕДМЕТ, 1980, т. 96, с. 63-69.

10. А.И. Евстюхин, Г.А. Леонтьев, М.Л. Коцарь, В.Б. Батеев, Ю.И. Зарембо, И.Ф. Хвостова. Очистка от примесей в процессе йодидного рафинирования гафния и его сплавов с никелем // *Конструкционные материалы в атомной технике: Сб. научных трудов / МИФИ*. М.: «Энергоатомиздат», 1987, с. 15-24.

11. М.Л. Коцарь, О.Г. Моренко, М.Г. Штуца, С.Г. Ахтонов, А.В. Александров, А.Г. Зиганшин, С.И. Индык, Е.Н. Кучерявенко, В.В. Лазаренко, А.О. Лapidус, В.А. Погадаев, А.М. Попов. Получение высокочистых титана, циркония и гафния мето-

дом йодидного рафинирования в промышленных условиях // *Неорганические материалы*. 2010, т. 46, №3, с. 332-340.

12. Пат. 2353687 РФ, МПК C22B34/14, C22B9/00 / А.В. Александров, В.В. Антипов, А.Г. Зиганшин, В.Г. Моисеев, О.Г. Моренко, В.А. Погадаев, М.Г. Штуца, М.Л. Коцарь. Аппарат для йодидного рафинирования гафния // *Изобретения. Полезные модели*. 2009, №12, с. 866.

13. М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, В.И. Никонов, Ал.Вл. Александров, С.Г. Ахтонов, Ан.Вал. Александров. Высокочистые титан, цирконий и гафний в ядерной энергетике // *Атомная энергия*. 2011, т. 111, в. 2, с. 72-77.

14. С.А. Лавриков, М.Л. Коцарь, С.Г. Ахтонов, А.А. Чернышев, Н.В. Копысов. Разработка опытного стенда для автоматизации процесса йодидного рафинирования циркония на базе промышленной печи СКБ-5025 // *Цветные металлы*. 2013, №2, с. 82-87.

15. Н.К. Филатова, А.К. Шиков, О.В. Бочаров, В.М. Аржакова, А.А. Дубиков, С.Ю. Осипов. Рафинирование гафния электронно-лучевым переплавом // *ВАНТ. Серия «Материаловедение и новые материалы»*. 2012, в. 1(62), с. 210-218.

16. Д.А. Негодин, М.Г. Штуца, С.Г. Ахтонов, Е.В. Ильенко, А.М. Кобызев. Промышленное производство металлического гафния и изделий на его основе // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2012, №2(78), с. 97-101.

17. М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, А.О. Лapidус, С.Г. Ахтонов, В.В. Антипов, А.В. Александров. Высокочистый гафний. Получение и применение в материалах органов регулирования ядерных реакторов // *Тез. докл. X Российской конференции по реакторному материаловедению*, 27–31 мая 2013 г., Димитровград, 2013, с. 152-154.

Статья поступила в редакцию 30.08.2013 г.

ЙОДИДНИЙ ГАФНІЙ. ОТРИМАННЯ, СКЛАД, ВЛАСТИВОСТІ І ЗАСТОСУВАННЯ В МАТЕРІАЛАХ ОРГАНІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, А.О. Лapidус, М.Г. Штуца, А.В. Александров, С.Г. Ахтонов, В.В. Антипов, Р.Ф. Бекмансуров, С.Ю. Кулешов, Д.А. Негодин

Показано роль чистоти гафнію при отриманні пластин для касет автоматичного регулювання та компенсації ВВЕР-440. Використання високочистого (йодидного) гафнію в складі шихти для виплавки злитків методом вакуумно-дугового переплаву дозволяє підвищити вихід придатного матеріалу на наступних деформаційних стадіях і отримати необхідні властивості пластин.

IODIDE HAFNIUM. PREPARATION, COMPOSITION, PROPERTIES AND APPLICATION IN MATERIALS OF REGULATING UNITS OF NUCLEAR REACTORS

M.L. Kotsar, S.A. Lavrikov, A.O. Lapidus, M.G. Shtutsa, A.V. Aleksandrov, S.G. Akhtonov, V.V. Antipov, R.F. Bekmansurov, S.Yu. Kuleshov, D.A. Negodin

The article shows the role of hafnium purity in the preparation of plates for automatic adjustment and compensation assemblies of VVER-440. The use of high-purity (iodide) hafnium in the charging material for ingot melting by vacuum-arc refining makes it possible to increase the yield of hafnium usable for the subsequent stages of deformation and to obtain the required properties of the plates.