

Наука та інновації. 2009. Т. 5. № 2. С. 23–31.

**И.М. Неклюдов¹, В.М. Ажажа¹, К.В. Ковтун¹, А.А. Васильев¹,
Р.В. Ажажа¹, М.П. Старолат¹, С.П. Стеценко¹, К.А. Линдт²,
А.Ф. Болков², В.И. Попов², Ю.В. Мочалов²**

¹ Национальный научный центр "ХФТИ" НАН Украины, Харьков

² Государственное научно-производственное предприятие "Цирконий", Днепропетровск

ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ГАФНИЯ



Описан процесс производства пластин из металлического гафния, которые должны отвечать требованиям, определяющим возможность их использования для изготовления регулирующих элементов ядерных реакторов. При подготовке производства пластин для получения исходных слитков применяли метод электронно-лучевой плавки. Для измельчения литой структуры слитки подвергали ковке, а кованные заготовки прокатывали в полосы. Полосы шлифовали, обрезали в размер и подвергали термообработке. На всех этапах изготовления полуфабрикатов проводили контроль свойств материала и полученных изделий. Свойства полученных пластин из гафния удовлетворяют производственным требованиям.

Ключевые слова: гафний, плавка, слиток, ковка, прокатка, лист, отжиг, свойства.

ВВЕДЕНИЕ

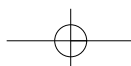
Гафний обладает комплексом механических, химических и ядерно-физических свойств, которые позволяют использовать его в ядерной технике, в основном для изготовления регулирующих элементов ядерных реакторов, экранов защиты от нейтронного излучения, камер и боксов для хранения и проведения работ с радиоактивными материалами. Обладая высоким сечением поглощения тепловых нейтронов и хорошей коррозионной стойкостью, гафний используется в конструкциях органов регулирования ядерных реакторов с конца 1950-х годов. В американских коммерческих ядерных реакторах типа PWR гафний начали использовать с начала 1960-х годов

(Shippingport-1, Indian Point Unit-1, Yankee Rowe) [1].

Изучение регулирующих стержней из гафния, установленных на реакторе Advanced Neutron Source (США), показало, что выгорание ¹⁷⁷Hf после 2-х лет работы в части, подверженной воздействию наибольшего потока нейтронов, составило 34 %. Но такое выгорание компенсируется образованием цепочки поглощающих изотопов ¹⁷⁸Hf, ¹⁷⁹Hf, ¹⁸⁰Hf. В других частях регулирующих стержней выгорание было гораздо меньше [2]. После 15 лет эксплуатации в реакторе Shippingport-1 и достижения флюенса нейтронов $3 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) физическая эффективность регулирующих стержней снизилась только на 6–7 %. [3].

С 1993 г. в исследовательском реакторе РБТ-6 (ГНЦ РФ НИИАР) успешно эксплуатируются пластинчатые органы регулирования из гафния. В 1989 г. в реакторах BWR

© И.М. НЕКЛЮДОВ, В.М. АЖАЖА, К.В. КОВТУН,
А.А. ВАСИЛЬЕВ, Р.В. АЖАЖА, М.П. СТАРОЛАТ,
С.П. СТЕЦЕНКО, К.А. ЛИНДТ, А.Ф. БОЛКОВ,
В.И. ПОПОВ, Ю.В. МОЧАЛОВ, 2009



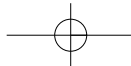


Рис. 1. Укрупненная схема производства пластин из гафния

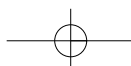
(Япония) были введены в эксплуатацию регулирующие стержни из гафния пластинчатого и стержневого типов с высоким сроком службы [4]. Пластинчатые органы регулирования представляют собой несколько пар тонких гафниевых пластин, прикрепленных к лопастям регулирующего стержня ядерного реактора с помощью штифтов из нержавеющей стали.

В отечественной практике прутки гафния марки ГФЭ-1 в защитной оболочке из нержавеющей стали впервые были поставлены на опытную эксплуатацию в поглощающие стержни системы управления защитой водородного энергетического реактора (ПС СУЗ ВВЭР-1000) Ровенской АЭС в 1997 году [5]. С учетом потенциально высоких эксплуатационных характеристик металлического гафния его применение представляется наиболее целесообразным без защитных оболочек в контакте с водой-теплоносителем [6]. В настоящее время в Украине отсутствует технология производства регулирующих элементов для реакторов на основе металлического гафния.

В энергетической стратегии Украины атомной энергетике отводится ведущее место. В перспективе до 2030 г. планируемая доля АЭС в выработке электроэнергии составит не менее 50 % [7]. Однако дальнейшее развитие атомной энергетике в Украине зависит от степени безопасности и эффективности работы ныне действующих АЭС. Используя гафний в качестве конструкционного материала для атомной энергетике, можно решить ряд проблем существующих АЭС:

- ✦ повышение безопасности и эксплуатационной надежности систем управления реакторов при использовании поглощающих элементов (ПЭЛ) из гафния на действующих атомных реакторах;
- ✦ научно-техническое обоснование возможности продления срока эксплуатации атомных блоков, проектный ресурс которых завершается в следующем десятилетии;
- ✦ хранение отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов.

Применение гафния в конструкциях регулирующих элементов атомных реакторов может продлить срок использования ПЭЛов до 30 лет (срок пригодности используемых в настоящее время ПЭЛов на основе карбида бора — 2–4 года). Это может дать значительную экономию средств и позволит снизить количество радиоактивных отходов при эксплуатации реакторов. В настоящее время при производстве продукции из циркония, используемого для изготовления тепловыделяющих элементов в атомных реакторах, гафний является сопутствующим продуктом, который обязательно нужно отделять от циркония. Полученный гафний в виде слитков, как правило, закладывается в Государственный или Отраслевой резерв, из которого он потом поставляется как исходное сырье для дальнейшей переработки или продажи. Поэтому разработка технологии изготовления изделий из гафния, во-первых, позволит выйти на рынок с новой наукоемкой продукцией, а во-вторых, позволит снизить себестоимость изделий из циркония и его сплавов.



На территории Украины имеются весьма значительные ресурсы гафния, которые могут быть освоены на существующих предприятиях (напр., ГНПП "Цирконий", который специализируется на производстве сплавов циркония, а также металлического гафния и редкоземельных элементов). На предприятии могут изготавливаться слитки гафния, однако технология их дальнейшей переработки в изделия отсутствует.

Одной из целей проводимой нами работы являлась разработка технологии производства пластин из металлического гафния, которые будут отвечать требованиям, определяющим возможность их использования в реакторах типа ВВЭР в конструкциях органов регулирования.

Полученные пластины из гафния должны иметь такие свойства:

- + предел прочности — 420 МПа;
- + предел текучести — 210 МПа;
- + удлинение при растяжении — не менее 15 %;
- + отсутствие дефектов с размерами больше 200 мкм;
- + шероховатость поверхности — $R_a \leq 2,5$ мкм.

СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА ПЛАСТИН ИЗ ГАФНИЯ

При разработке процесса изготовления пластин использовалось оборудование ННЦ ХФТИ и ГНПП "Цирконий". Укрупненную схему производства пластин из гафния можно условно разделить на шесть основных этапов, которые приведены на схеме рис. 1.

Плавка слитков из гафния

Исходным материалом для изготовления слитков являлись первичные слитки гафния ГФЭ-1 и до 50 % оборотных отходов в виде стружки и обрезков, образующихся в процессе производства. По химическому составу слитки гафния ГФЭ-1 должны соответствовать требованиям ТУ У 14312708.183-95. Оборотные отходы, поступающие на плавку, проходят предварительную подготовку. Стружку перемешивали, отмагничивали и промывали

Таблица 1

Предельное содержание примесей в оборотных отходах

Элемент	Массовая доля, %	Элемент	Массовая доля, %
Цирконий	1,0	Кальций	0,01
Азот	0,005	Магний	0,004
Углерод	0,01	Марганец	0,0005
Кислород	0,05	Хром	0,003
Железо	0,04	Медь	0,005
Кремний	0,005	Ниобий	0,01
Никель	0,02	Молибден	0,01
Титан	0,005	Вольфрам	0,01
Алюминий	0,005		

этиловым спиртом, дистиллированной водой и сушили. После чего производили отбор проб для определения содержания примесей. Массовая доля примесей в стружке гафния не должна превышать значений, приведенных в табл. 1. Затем весь гафний в виде слитков и оборотных отходов поступал на электронно-лучевую плавку. На рис. 2 приведена структурная схема операций и движения материала при производстве слитков гафния, пригодных для дальнейшейковки.

Для первичной плавки, при производстве которой производится сплавление и перемешивание оборотных отходов с первичным слитком, использовали промышленную установку ЭМО-250. В результате плавки на этой установке получали слитки гафния диаметром до 240 мм.

Исследования структуры слитков после первичной электронно-лучевой плавки показали, что они имеют крупнокристаллическую структуру; размер зерен по сечению и высоте слитка существенно отличается. Такая разница в размерах зерен и их ориентации в слитках для металлов с ППУ-решеткой (в том числе и для гафния) может приводить после деформации к анизотропии структуры и свойств изделий, которые будут получены из этих слитков. С целью уменьшения разнотерности слитков и дополнительного рафинирования от кис-

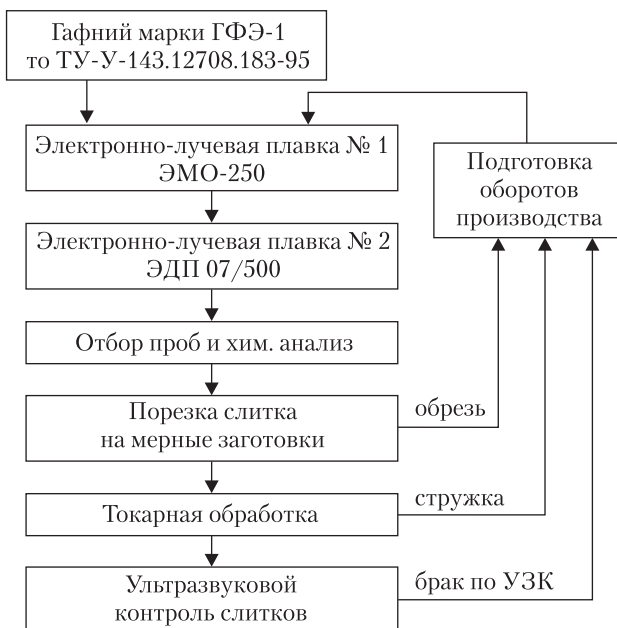


Рис. 2. Структурная схема операций и движения материала при производстве заготовок для горячейковки гафния

лорода слитки подвергали вторичному электронно-лучевому переплаву на установке ЭДП 07/500 в кристаллизатор Ø 90 мм. Особенностью данной электронно-лучевой печи является промежуточная емкость, в которой можно поддерживать заданный перегрев жидкого металла для обеспечения его рафинирования.

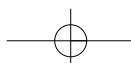
В результате вторичной электронно-лучевой плавки получали слитки Ø 85–90 мм, длиной до 1 200 мм. Вес полученного слитка составлял около ста килограмм. Такие слитки имеют зерна от 5 до 10 мм. Содержание кислорода не превышает 0,04 %. Полученные слитки резали механической пилой на мерные цилиндрические заготовки длиной 150–155 мм, поверхность которых обрабатывается на токарном станке. Обрезки отправляли на первичную электронно-лучевую плавку, как показано на рис. 2. Станок, используемый для токарной обработки, предварительно подготавливали: очищали от стружки других плавков и металлов, а также, оснащали экранами для сбора стружки гафния. Обработка велась при

обязательном охлаждении реза. Стружку, собранную после токарной обработки после подготовки и анализа, отправляли на первичную переплавку (см. рис. 2). В результате токарной обработки получали заготовки под ковку в виде цилиндров диаметром 80–82 мм и высотой 135–145 мм. Эти заготовки проходили ультразвуковой контроль на наличие дефектов (трещин, раковин, расслоений) с применением дефектоскопа USN-52. Измерения проводили согласно ОСТ 5.9675-88 и ГОСТ 24507-80. Если величина дефектов в слитке превышала допустимые размеры, то он выбраковывался и направлялся на повторную переплавку.

Горячая ковка слитков

Ковка слитков проводилась в несколько этапов на пневматических молотах с весом падающих частей 400 и 1 000 кг. Заготовки для ковки нагревались в газовой печи до температуры 1 100 °С, температуру контролировали с помощью пирометра и термопары. Неравномерность нагрева по длине печи и от стенки печи до центра достигала 50 °С.

Ковку слитков начинали с малых обжатий, чтобы измельчить грубую литую структуру. Поэтому на *первом этапе* проводилось осаживание деформацией не больше 10 % ударами молота по торцевым частям цилиндрической заготовки. В результате такой деформации заготовка приобретала бочкообразную форму, а зерна, особенно вытянутые вдоль оси заготовки, подвергались предварительному измельчению. Следует отметить важность проведения операций ковки на первом этапе с небольшими степенями деформации. При превышении степени деформации в поковках образуются трещины, что приводит к невозможности использования таких заготовок для производства конечной продукции. На *втором этапе* ковки проводили "квадратирование", когда цилиндрический профиль заготовки под ударами молота по боковой поверхности заготовки постепенно превращается в квадратный. Сечение его постепенно уменьшается, длина заготовки



увеличивается, структура слитка измельчается по мере накопления степени пластической деформации. На *третьем этапе* деформирования квадратный профиль изменяли на прямоугольный, т.е. заготовка не поворачивалась на 90° при ковке, а ковалась в одной плоскости по длине для получения формы сляба, пригодного для последующей прокатки.

На первых трех этапах ковка проводилась на кузнечном пневматическом молоте (МА4136) с весом падающих частей 400 кг. На конечном этапе полученный сляб выравнивался ковкой на молоте с весом падающей части 1 000 кг. Кованые заготовки имели размеры 300 × 76 × 26 мм. Каждой этап ковки был разбит на несколько циклов. Циклы непосредственной ковки занимали около 2-х мин, между которыми осуществляли промежуточный подогрев заготовок (10 мин).

Благодаря малой длительности процесса ковки величину деформации между циклами можно увеличить, а поглощение кислорода и азота уменьшить.

Удаление поверхностных дефектов слитка после ковки — важная стадия технологического процесса, поскольку в поверхностных слоях при температуре ковки образуются нитриды и окислы гафния, охрупчивающие материал. Для удаления дефектного слоя, обогащенного хрупкими нитридами и окислами, и подготовки кованого сляба к прокатке использовали пескоструйную обработку.

Структура заготовок сразу после ковки характеризуется измельчением начальной литой структуры, однако зерна в материале не рекристаллизованы. Это связано с быстрым охлаждением слитка в процессе ковки до температур, когда процессы рекристаллизации в гафнии прекращаются. Для снятия внутренних напряжений и формирования в материале стабильной зерновой структуры необходим рекристаллизационный отжиг кованых заготовок. На рис. 3 приведена структура кованого слитка гафния после отжига при температуре 800 °С в течение 30 мин. Как видно из рис. 3, ве-

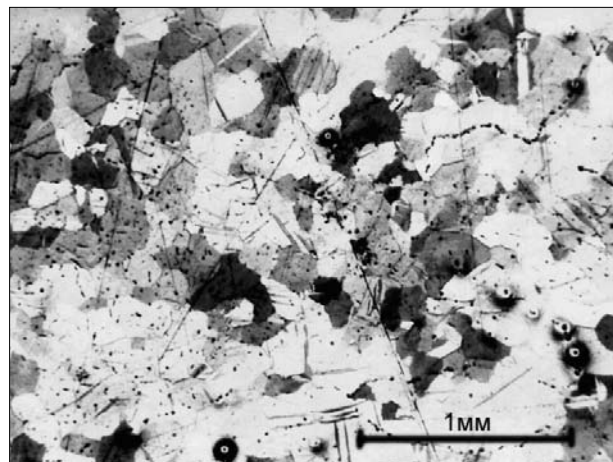


Рис. 3. Структура заготовок после ковки и рекристаллизационного отжига при 800 °С в течение 30 мин

личина зерна в слитке после ковки снижается до нескольких сотен микрон. При этом структура становится однородной; зерна, вытянутые в одном направлении, отсутствуют.

Для удаления дефектов (краевых трещин, расслоений и т.п.), образующихся при ковке и формировании прямоугольного сляба, боковые и торцевые поверхности кованых заготовок необходимо обрезать, используя фрезерный, строгальный или электроискровой станок. В результате получатся готовые прямоугольные слябы размерами ~290 × 75 × 22 мм. После такой обработки заготовки из кованых слитков станут пригодными для последующего изготовления из них изделий путем прокатки.

Прокатка листов и рихтовка

Для прокатки кованных гафниевых слябов использовали прокатный стан ДУО-200×280 производства СКМЗ г. Краматорск с усилием прокатки 1,18 МН (120 т.с.) и возможностью регулирования скорости прокатки от 1 до 20 м/мин. Стан укомплектован двумя регулируемым по высоте столами, предназначенными для подачи заготовки в валки и приема ее из них после прокатки. На переднем столе, предназначенном для подачи заготовки в валки, устанавливается регулируемое по ширине приспособление для проводки катаемого сляба,



Рис. 4. Заготовки пластин гафния послековки, после механической обработки поверхности; прокатанная полоса, а также шлифованные и обрезанные пластины

обеспечивающее перпендикулярность подачи заготовки в валки.

Для нагревания заготовки использовали электропечь СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 мощностью 8 кВт. Степень деформации заготовок за проход при прокатке гафниевых листов составляла 12–18 %. Скорость, использованная при прокатке, составляла 5–11 м/мин. Необходимая суммарная степень деформации для прокатки листа заданной толщины получали путем многопроходной обработки. Выдержка заготовки в печи между проходами составляла 15–17 мин. После четвертого прохода, когда катаемая заготовка удлинялась более чем на 450 мм, ее нагрев переносился в другую печь. Такая электропечь, состоящая из трех печей типа СНОЛ 1,6.2,1.1/11-И2, собранных в одном корпусе, мощностью 9 кВт, позволяла нагревать заготовки длиной до 900 мм. Она была специально изготовлена для выполнения данной работы.

В случае если в ходе прокатки возникал изгиб заготовки вдоль плоскости прокатки и его величина превышала 20 мм, для ее выравнивания применяли рихтовку на прессе. Для рихтовки заготовок использовали гидравлический пресс (ПД-476) с усилием 1,57 МН (160 т.с.), со скоростью рабочего хода 0,24 м/мин. Рихтовка выполнялась между двумя массивными стальными пластинами толщиной 60 мм, после нагрева заготовки в электропечи до температуры 900 °С. Необходимость в рихтовке обычно возникала после первых 3–4 проходов при прокатке. Полосы после проката имели тол-

щину 6,4–6,7 мм, ширину 82–83 мм, и длину 985–1005 мм с учетом закругленных торцов, образовавшихся при прокатке.

Шлифовка пластин

Для шлифовки прокатанных полос использовали плоскошлифовальный станок марки ЗЛ725ВФ10 с магнитным столом 2000 × 630 мм и горизонтальным шпинделем.

Шлифовка проводилась по следующей схеме:

1 этап – снятие окисного слоя: подача не более 100 мкм, переворот пластины на другую сторону, обработка противоположной плоскости пластины;

2 этап – удаление неровностей и дефектов: подача не более 200 мкм, переворот пластины на другую сторону после полного исчезновения дефектов;

3 этап – чистовая обработка: подача не более 5 мкм, переворот пластины на другую сторону.

После шлифовки пластин их боковые и торцевые края обрезали до заданных размеров с использованием электроискрового или фрезерного станка.

На рис. 4 для иллюстрации этапов проделанной работы приведена фотография слябов гафния послековки, заготовок после механической обработки поверхности, полос после прокатки, а также шлифованных и обрезанных пластин гафния.

Вакуумный отжиг

С целью получения заданной структуры механических свойств и снятия внутренних напряжений в гафниевых полосах проводили заключительную термообработку. Для определения режимов отжига прокатанных и шлифованных листов гафния была проведена работа по изучению влияния отжига на структуру и свойства горячекатаного гафния. Из образцов-свидетелей, отрезанных от полученных пластин, вырезали образцы для механических испытаний на растяжение. Испытания на растяжение проводили при комнатной тем-

пературе со скоростью деформации 10^{-3} сек $^{-1}$. Отжиги образцов проводили при температурах 800, 900 и 1 000 °С в течение 2-х часов в вакуумной печи сопротивления при давлении 0,0133 Па. После отжига для удаления возникающей окисной пленки образцы снова подвергали химической полировке. На подготовленных по такой технологии образцах исследовали изменение структуры поверхности методом оптической микроскопии, а также изучали зависимости пределов прочности, пропорциональности, относительного удлинения и микротвердости от температуры отжига горячекатаного гафния. На рис. 5 представлены температурные зависимости механических свойств горячекатаного гафния.

Из представленных зависимостей видно, что отжиг в течение 2-х часов при температуре 800 °С, близкой к температуре прокатки, приводит к резкому снижению твердости, пределов прочности, пропорциональности и существенному повышению пластичности по сравнению с теми же характеристиками материала без отжига. Отжиг при 1 000 °С приводит к некоторому снижению пластичности и повышению твердости при снижении прочностных характеристик. Испытания на растяжение образцов, вырезанных перпендикулярно направлению прокатки, показали, что характеристики прочности после прокатки близки к тем, которые наблюдаются в образцах, вырезанных вдоль направления прокатки. Отжиг прокатанных образцов приводит к тому, что характеристики прочности и пластичности мало зависят от направления деформации растяжением по отношению к направлению прокатки.

Учитывая результаты изучения влияния режимов отжига на свойства горячекатаного гафния, мы выбрали такой режим термообработки для прокатанных и шлифованных листов:

- + температура — 900 °С;
- + время — 2 часа;
- + давление в вакуумной печи — 0,0133 Па.

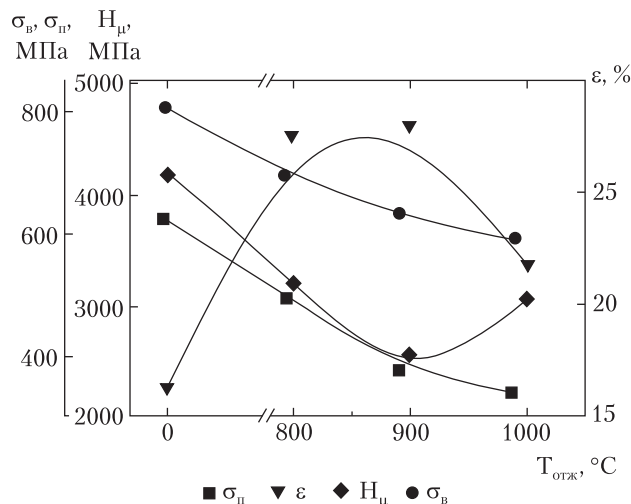


Рис. 5. Зависимость пределов прочности, пропорциональности, относительного удлинения и микротвердости от температуры отжига горячекатаного гафния

Для исключения формоизменения шлифованные пластины при отжиге помещали в специальную оправку, состоящую из двух шлифованных пластин толщиной 10 мм, соединенных болтами. Для отжига листов была изготовлена специальная печь сопротивления, помещаемая в вакуумную камеру. В этой же печи отжигали и образцы-свидетели, отрезаемые от шлифованных листов для контроля их характеристик.

После отжига пластины извлекали из сборки и каждую пластину проверяли на соответствие заданным характеристикам.

Контроль качества и свойств изделий

Для отработки методов контроля параметров получаемых заготовок и изделий была изготовлена опытная партия пластин с размерами 60 × 905 × 5,1 мм. Эти пластины были изготовлены из слитков металла, полученных в результате двух плавов. Вместе с каждой партией пластин из металла той же плавки и по той же технологии изготавливали образцы-свидетели размером 60 × 50 × 5,1 мм. Из них были вырезаны образцы для проведения статических испытаний на растяжение по ГОСТ 10006-80 на установке 1246Р-2/2300 производства НИКИМТ. Обобщенные механические

Таблиця 2
Механические свойства материала пластин

№	Параметры	Техни- ческие требования	Обобщенные механические свойства пластин	
			без термо- обработки	после тер- мообра- ботки
1	Предел прочнос- ти σ_B , МПа	420,0	700,0	584,6
2	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	210,0	520,2	372,8
3	Относительное удлинение δ , %	17,5	17,3	27,8

свойства пластин по результатам испытаний вырезанных образцов приведены в табл. 2.

Все готовые пластины успешно прошли контроль на отсутствие поверхностных и сквозных дефектов капиллярным методом (по ГОСТ 18442-80, класс чувствительности контроля – III) и УЗК внутренних дефектов (по ГОСТ 23829-79).

При измерении параметров шероховатости шлифованной поверхности пластин использовали переносной профилометр-профилограф TR 200 производства компании Time Group Inc. С помощью этого прибора определяли величину R_a – среднее арифметическое отклонение профиля на различных участках поверхности пластин.

Измерения шероховатости производили в средней части и на концах полученных пластин с обеих сторон каждой пластины. Значения величины R_a изменялось от 0,15 до 0,18 мкм. Тем самым изготовленные пластины существенно превосходили первоначальные технические требования по параметру шероховатости R_a .

ВЫВОДЫ

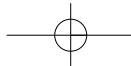
- + Проведен анализ мировых тенденций по использованию гафния для изготовления конструкций, поглощающих нейтроны в атомных реакторах. Показана перспективность разработки технологии производства

изделий из гафния для удовлетворения требований атомной энергетики в Украине.

- + Проведена подготовка производства шлифованных пластин из гафния.
- + Отработаны операции выплавки иковки исходных слитков, разработаны способы прокатки и шлифовки листов гафния, и последующего вакуумного отжига пластин.
- + Проведен подбор необходимого оборудования, оптимизированы температурно-временные режимы проведения отдельных операций.
- + Изготовлена опытная партия пластин гафния размерами $64 \times 905 \times 5,1$ мм.
- + Определены методики и оборудование, необходимые для контроля качества заготовок и требуемых свойств выпускаемых изделий.
- + Показано, что свойства полученных шлифованных пластин из гафния удовлетворяют поставленным техническим требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Herbert, Keller W.* Development of hafnium and comparison with other pressurized water reactor control rod materials // Nuclear Technology. – Vol. 59, 1982. – P. 476–482.
2. *Gallmeier F.X., Bucholz J.A., Engle W.W. Jr., Williams L.R.* Analysis of the in-vessel control rod guide tube and subpile room shielding design for the advanced neutron source reactor // Report of Oak Ridge National Lab., TN (United States), FUNDING ORGANIZATION: USDOE, Washington, DC (United States), Aug 1995. – 140 p.
3. *Keller C.* Hafnium ein neuer Werkstoff in der Kerntechnik // GIT, 1987. – Bd. 31, № 2. – P. 95–99.
4. *Shirayanagi H., Fukumoto T., Shiga S.* Advanced control rods for Japanese BWR plants // Proceedings of a Technical Committee meeting "Advanced in control assembly materials for water reactors", 29 November – 2 December 1993, IAEA, 1995. – P. 135–164.
5. *Afanasyev A.* Experience of CR and RCCA operation in Ukrainian WWER 1000: aspects of reliability, safety and economic efficiency // Proceedings of a Technical Committee meeting "Control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives", 12–15 October 1998, IAEA, Vienna, 2000. – P. 77–89.
6. *Клочков Е.П., Рисованый В.Д.* Гафний в атомной технике // Ядерная техника за рубежом. – 1987. – № 10. – С. 12.



7. Неклюдов И.М. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // Вопросы атомной науки и техники. 2007. № 2, сер. "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение" (90). — С. 3—9.

*І.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, К.В. Ковтун,
А.А. Васильєв, Р.В. Ажажа, М.П. Старолат,
С.П. Стеценко, К.А. Ліндт, А.Ф. Болков,
В.И. Попов, Ю.В. Мочалов*

**ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
З ГАФНІЮ**

Описується процес виробництва пластин з металічного гафнію, які повинні відповідати вимогам, що визначають можливість їх використання для виготовлення регулюючих елементів ядерних реакторів. В процесі підготовки виробництва пластин для виготовлення вихідних зливок застосовували метод електронно-променевої плавки. Для подрібнення литої структури злитки піддавали куванню, а ковані заготовки прокатували в смуги. Смуги шліфували, обрізали до розміру і піддавали термообробці. На всіх етапах виготовлення напівфабрикатів проводили контроль властивостей матеріалу і одержаних виробів. Властивості одержаних пластин з гафнію задовольняють поставлені виробничі вимоги.

Ключові слова: гафній, плавка, злиток, кування, прокатка, лист, відпал, властивості.

*I.M. Neklyudov, V.M. Azhazha, K.V. Kovtun,
A.A. Vasilyev, R.V. Azhazha, M.P. Starolat,
S.P. Stetsenko, K.A. Lindt, A.F. Bolkov, V.I. Popov,
Yu.V. Mochalov*

**THE PREPARATION FOR THE PRODUCTION
OF CONSTRUCTIONAL MATERIALS
FROM HAFNIUM**

The process of production of plates on the basis of metallic hafnium, which must respond to the requests of the possibility of their use in the construction of nuclear reactors' control rods, is described. For the production of initial ingots the electron-beam melting method was applied. For crushing of cast structure the ingots were subjected to forging, and the forged samples were rolled into the bars. They were polished, cut to a size and subjected to the heat treatment. Inspection of the properties of material and obtained products was carried out during all stages of semimanufactured material production. The properties of the plates obtained from hafnium satisfy the stated production requirements

Key words: hafnium, melting, ingot, forging, rolling, plate, annealing, properties.

Надійшла до редакції 11.06.08.

