

**И.М. Неклюдов¹, В.М. Ажажа¹, К.В. Ковтун¹, А.А. Васильев¹,
Р.В. Ажажа¹, А.Д. Солопихин¹, М.П. Старолат¹, С.П. Стеценко¹, К.А. Линдт²,
В.М. Болков², В.И. Попов², Ю.В. Мочалов²**

¹ Национальный научный центр «ХФТИ» НАН Украины, Харьков

² Государственное научно-производственное предприятие «Цирконий», Днепродзержинск

ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ПРУТКОВ ИЗ ГАФНИЯ



Определены условия, позволяющие при различных переделах сохранять в металле низкое содержание примесей. Сделан анализ процессов формирования структуры в металле в зависимости от режимов деформационно-термической обработки полуфабрикатов и их влияния на свойства готовой продукции. Для получения исходных слитков использовали электронно-лучевую плавку. Деформационную обработку слитков проводили с использованием ковки и прокатки в профильных валках. Конечную термообработку совмещали с выравниванием прутков. Поверхность готовых прутков подвергали шлифовке, после чего проводили контроль свойств и качества изделий.

Ключові слова: гафний, слиток, ковка, пруток, прокатка, отжиг, свойства.

Благодаря высокому сечению поглощения тепловых нейтронов, хорошим механическим свойствам и коррозионной стойкости гафний является одним из наиболее перспективных материалов для использования в конструкциях устройств регулирования ядерных реакторов [1]. В настоящее время в большинстве конструкций поглощающих элементов (ПЭЛ) системы управления защитой атомных реакторов применяются трубки из сплава циркония, заполненные виброуплотненным порошком карбида бора (B_4C), титаната диспрозия ($Dy_2O_3 \cdot TiO_2$) или тройного сплава на основе серебра ($Ag - 80\%$, $In - 15\%$, $Cd - 5\%$) [1–3]. По своим эксплуатационным характеристикам в ПЭЛх гафний превосходит карбид бора и тройной сплав на основе серебра. В последнее время при разработке конструкций ПЭЛов преобладает тенденция создания комбиниро-

ванных устройств. При этом часть поглощающего элемента, наиболее сильно подверженная облучению нейтронами, может изготавливаться из гафния, а в остальной части ПЭЛа в качестве поглощающего материала используется карбид бора. В работе [4] отмечается, что использование в реакторах типа ВВЭР-1000 комбинированных поглощающих элементов, нижняя часть которых содержит металлический гафний, срок их службы возрастает с трех до десяти лет, а себестоимость, отнесенная к сроку службы, составляет 51–57 % по отношению к поглощающим элементам, содержащим только карбид бора. Изготовление комбинированных ПЭЛов с использованием гафния может продлить срок их эксплуатации в атомных реакторах от 3–5 до 30 лет, что позволит снизить количество радиоактивных отходов при эксплуатации реакторов и дать значительную экономию средств [3, 5].

Несмотря на высокие ядерно-физические характеристики гафний до недавнего времени не находил существенного применения из-за

© И.М. НЕКЛЮДОВ, В.М. АЖАЖА, К.В. КОВТУН, А.А. ВАСИЛЬЕВ, Р.В. АЖАЖА, А.Д. СОЛОПИХИН, М.П. СТАРОЛАТ, С.П. СТЕЦЕНКО, К.А. ЛИНДТ, В.М. БОЛКОВ, В.И. ПОПОВ, Ю.В. МОЧАЛОВ, 2010

малых объемов производства и высокой стоимости. В Украине металлический гафний в виде слитков марки ГФЭ-1 выпускается на предприятии ГНПП «Цирконий». Производство прутков гафния, которое может способствовать расширению рынков сбыта и его удешевлению, в Украине в настоящее время отсутствует.

Технологические приемы, используемые на отдельных операциях при получении прутков из гафния, достаточно хорошо известны и описаны в литературе [6–10]. Они, как правило, включают процессы обработки давлением исходных слитков из металлического гафния: ковку, выдавливание, прокатку, волочение. Эти разработки в отечественной практике (напр., в работах [7, 11]) применялись, в основном, для получения в лабораторных условиях опытных стержней небольшой длины, тогда как для использования в комбинированных ПЭЛх для реакторов типа ВВЭР-1000 необходимы прутки длиной до метра и диаметром около 8 мм [1]. Поэтому авторы данной работы особое внимание уделяли приемам, позволяющим получать длинномерные прутки. При помещении таких стержней в тонкостенные оболочки или каналы реактора существенными становятся требования к правильности формы, отсутствию дефектов, качеству поверхности прутков, допускам на отклонения в размерах. Известно, что механические свойства (особенно способность гафния обрабатываться давлением) в значительной степени определяются содержанием примесей [1]. Наиболее сильно на пластичность прутков влияют примеси кислорода, азота и меди, которые могут загрязнять металл во время плавки и последующей деформационной обработки. Поэтому в разрабатываемом способе получения прутков необходимо предусмотреть операции по удалению поверхностного окисленного слоя металла, а также финишный отжиг в вакууме для снятия напряжений и стабилизации структуры материала прутков.

Целью нашей работы являлась отработка приемов изготовления прутков из гафния для

использования в конструкциях элементов, поглощающих нейтроны в атомных реакторах.

СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА ПРУТКОВ ИЗ ГАФНИЯ

На рис. 1 приведена укрупненная схема производства прутков из гафния, элементы которой отрабатывались в процессе работы. Её можно условно разделить на несколько основных этапов. Первые два этапа, включающие работу по плавке слитков и ковке заготовок производились на оборудовании ГНПП «Цирконий» с участием специалистов этого предприятия при научном сопровождении сотрудников ННЦ ХФТИ. На последнем этапе, связанном с контролем качества получаемой продукции методом ультразвукового контроля, привлекались специалисты государственного предприятия «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я.Е. Осады». Остальные этапы, включающие разработку деформационных и термических режимов прокатки в профильных валках, шлифовку, исследование структуры и механических свойств после различных термических обработок и контроль качества изделий, проводились на оборудовании ННЦ ХФТИ сотрудниками института.

ОТБОР СЛИТКОВ ГАФНИЯ

Для проведения работы было отобрано три исходных слитка гафния марки ГФЭ-1, полученные в результате сплавления и перемешивания оборотных отходов с первичным слитком на установке электронно-лучевой плавки ЭМО-250. По химическому составу слитки удовлетворяли требованиям ТУ У, однако они имели неоднородную структуру и литейные дефекты. Поэтому слитки были направлены на повторный электронно-лучевой переплав.

Повторный электронно-лучевой переплав проводили на установке ЭДП 07/500 с вытягиванием слитков в кристаллизатор диаметром 90 мм. Особенностью данной электронно-лучевой печи является промежуточная емкость, в которой можно поддерживать за-

данный перегрев жидкого металла для обеспечения его рафинирования.

В результате повторной электронно-лучевой плавки получали слитки диаметром 86 мм, длиной около 1 м. Вес каждого из полученных слитков составлял порядка 70 кг.

Из этих слитков токарной обработкой получали цилиндрические заготовки диаметром около 80 мм и высотой ~100 мм. Начальный и конечный участки слитка обрезали и отправляли на переплавку, поскольку они имели неоднородную структуру, определяемую условиями кристаллизации, отличающимися от основной массы слитка. Внешний вид получаемых слитков и заготовок для последующейковки, приведен на рис. 2. Для изучения структуры слитков от них отрезались темплеты, поверхность которых шлифовалась и травилась для выявления зерен. На темплетях, отрезанных от слитков после повторной электронно-лучевой плавки, наблюдается существенное измельчение структуры по сравнению с исходными слитками. Структура становится более однородной, а величина зерна в слитках после второго электронно-лучевого переплава меняется от 3 до 8 мм.

КОВКА СЛИТКОВ

Свободную ковку слитков проводили в три этапа с использованием пневматического молота МА4136. Заготовки дляковки нагревали в газовой печи до температуры 1373 К [6]. Ковку слитков начинали с малых обжатий, чтобы измельчить литую структуру гафния и не допустить возникновения трещин в слитке. Для этого на первом этапе проводили осадку и оттяжку торцевых частей цилиндрической заготовки с деформацией не больше 10 %. Следует отметить важность проведения на первом этапековки с небольшими степенями деформации. При превышении степени деформации в поковке могут образовываться трещины, что делает невозможным использование заготовок для дальнейших операций по изготовлению прутков.

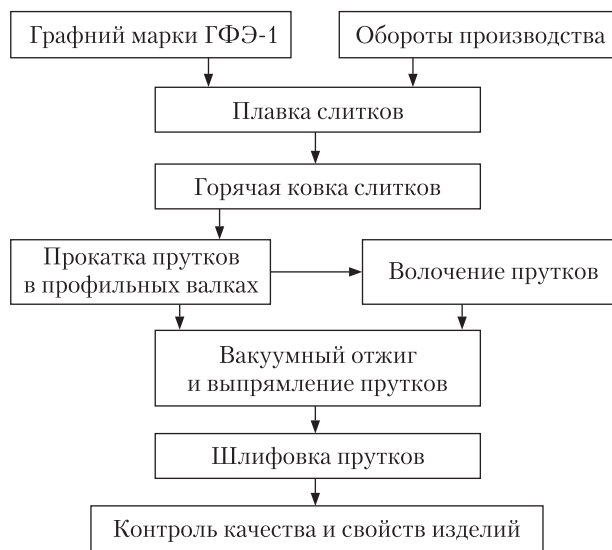


Рис. 1. Укрупненная схема производства прутков из гафния



Рис. 2. Внешний вид слитков и заготовок для последующейковки

На втором этапе проводилась ковка с деформированием половины заготовки ударами молота по боковой поверхности с постоянным вращением цилиндрической заготовки. При этом сечение заготовки постепенно уменьшается, а длина заготовки увеличивается. На третьем этапе таким же образом, как на втором этапе, ковалась вторая сторона слитка, а затем производилась рихтовка и окончательное выравнивание сечения по всей длине заготовки. Температурно-временные характеристики процессаковки подбирали таким образом, чтобы слиток находился как можно меньше при высокой температуре, когда начинается активное поглощение газовых примесей гафнием. Это позволяет ограничить возможность поглощения кислорода и азота из атмосферы

Охлаждение заготовок проводили с использованием массивных стальных пластин, на ко-



Рис. 3. Кованые заготовки из гафния на разных этапах передела

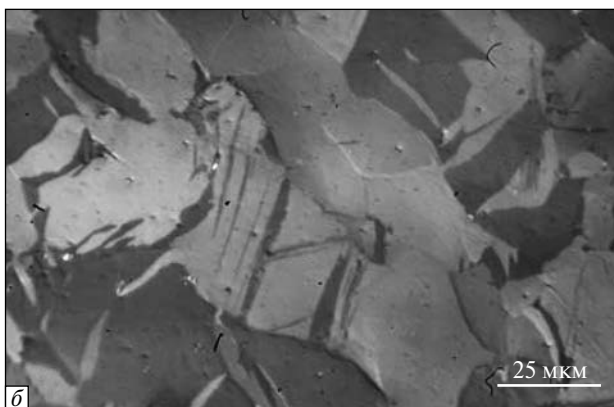
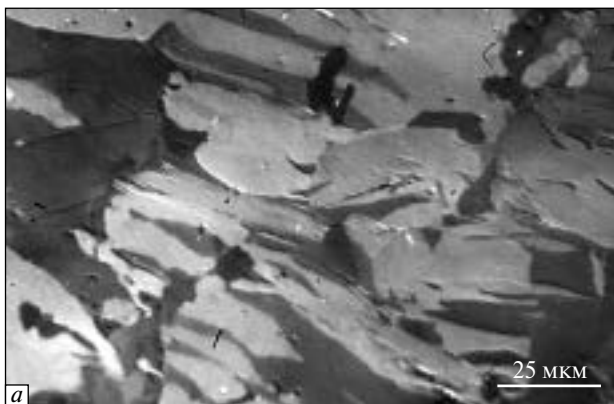


Рис. 4. Микроструктура поковки: а – разрез вдоль оси прутка; б – разрез поперек оси прутка

которые помещали кованые заготовки, благодаря чему снижалось время их остывания. В результатековки получали цилиндрические заготовки диаметром от 32 до 36 мм. На рис. 3 приведена фотография 3-х кованых заготовок.

С целью анализа структуры, которая образуется в материале после процессовковки, кованые заготовки разрезали и готовили шлифы поперечных и продольных сечений. На рис. 4

приведена микроструктура материала поковок. Как видно из рисунка, на шлифах наблюдается частично рекристаллизованная структура, состоящая из отдельных зерен. Это говорит о том, что из-за высокой температуры обработки материала, используемой при ковке, процессы динамической рекристаллизации после деформацииковки успевают в значительной степени завершиться еще до остывания заготовок. При этом в поперечном сечении поковок наблюдаются, в основном, достаточно равноосные зерна, а в продольном сечении – зерна, вытянутые вдоль оси поковки.

ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА ПРУТКОВ ИЗ ГАФНИЯ В ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛКАХ

Для прокатки кованых заготовок из гафния использовали прокатный стан «ДУО-280×260» (производства СКМЗ, г. Краматорск) с усилием прокатки 5 МН и возможностью регулирования скорости прокатки от 0,5 до 20 м/мин. Деформацию прокаткой осуществляли с применением специально изготовленных для этой цели профильных ручьевых валков, помещенных в клеть прокатного стана. Геометрические размеры и разрезы открытых калибров используемых профильных валков приведены в таблице.

Для нагрева заготовок перед прокаткой использовали муфельную электропечь СНОЛ-2,5.4.1,4/11-И1 мощностью 8 кВт без применения защитной атмосферы. Контроль температуры выполнялся термопарой типа *хромель–алюмель* с помощью универсального вольтметра В7-50. Для удаления возможных скрытых поверхностных дефектов поковки перед ручьевой прокаткой обрабатывали на токарном станке для получения цилиндрических заготовок диаметром 30 мм с заходным конусом с углом в 30°.

Основная схема процесса прокатки с деформационными параметрами на отдельных проходах выглядит так: температура заготовки при ручьевой прокатке такая же, как и при прокатке полос [8], время нагрева заготовки перед прокаткой на первом и последующих проходах минимальное.

Прокатка в профільних ручьевих валках дозволяє достатньо швидко знизити діаметр прокатуваних прутків і збільшити їх довжину без втрати матеріалу, однак при цьому прутки можуть втрачати правильну циліндричну форму, а на їх поверхні можуть формуватися закати, заусениці і інші дефекти. Во избежание этого при прокатке используют жесткие проводки, которые препятствуют проворачиванию заготовки вокруг своей оси в процессе деформации. В процессе прокатки, при смене калибра, прокатуваемые образцы кантуют на 90°.

Если возникает необходимость калибровки прутков в поперечном сечении, на последнем этапе деформационной обработки применяют горячее волочение.

ВАКУУМНЫЙ ОТЖИГ И ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПРУТКОВ

После деформации прокаткой прутки гафния необходимо отжигать для получения равновесной структуры и повышения пластичности материала. Из литературы [7] известно, что возврат микротвердости и рост зерна в деформированном гафнии наблюдается после нагревания при температурах выше 973 К. Поэтому с целью оптимизации режимов термообработки для получения оптимальных механических характеристик мы проводили отжиги образцов, вырезанных из прутков гафния, при температурах 973–1273 К. Механические испытания на растяжение проводили на вакуумной разрывной машине со скоростью деформации $1 \times 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М. Образцы вырезали из прутков на электроэрозионном станке, шлифовали наждачной бумагой и химически полировали в водном растворе, содержащем 45 % азотной и 10 % плавиковой кислоты. Термообработку образцов проводили в вакуумной печи СНВЭ-016 при температурах 973–1273 К в течение 2 ч. На рис. 5 приведены изменения механических характеристик материала прутка гафния в зависимости от температуры отжига.

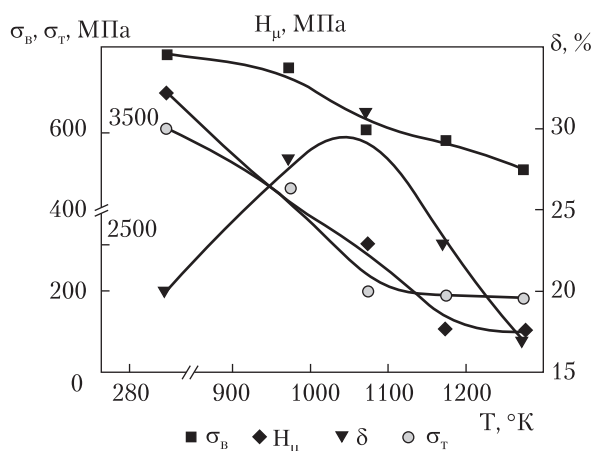


Рис. 5. Зависимость механических характеристик гафния от температуры отжига (время отжига – 2 ч)

Из приведенных графиков следует, что непосредственно после деформационной обработки прочность гафния составляла 780 МПа, условный предел текучести – 600 МПа, от-

Параметры профилей прокатных валков, используемых при ручьевой прокатке

Номер калибра и его форма	Вид профилей калибров и их размеры, мм
1 трапециевидный	
2 квадратный	
3 трапециевидный	
4 квадратный	
5 круглый	

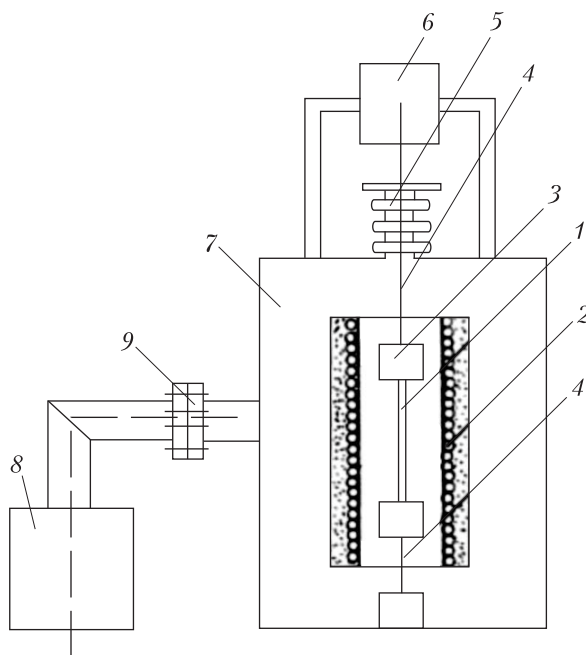


Рис. 6. Схема установки для термообработки и выравнивания прутков из гафния: 1 – пруткок из гафния, 2 – печь сопротивления, 3 – концевые захваты, 4 – тяги, 5 – сильфон, 6 – устройство для создания нагрузки, 7 – вакуумная камера, 8 – откатное устройство, 9 – клапан

носительное удлинение – 20 %, микротвердость – 3600 МПа.

Из анализа зависимости механических свойств от температуры видно, что наибольшее разупрочнение при отжиге происходит в интервале 950–1100 К, а оптимальной температурой для отжига, позволяющей сохранить высокие прочностные характеристики и повысить пластичность, является температура около 1050 К.

После отжига при температуре 1073 К структура полностью рекристаллизуется. Размер зерен составляет 10–15 мкм. С повышением температуры отжига размер зерен увеличивается.

Одним из требований, предъявляемых к пруткам из гафния для регулирующих стержней ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР, является прямолинейность формы изделий. Прямолинейность прутков также необходима, чтобы можно было шлифовать поверх-

ность изделий, сохраняя их правильную цилиндрическую форму. Мы осуществляли выпрямление прутков одновременно с отжигом. Для этого применили правку исходных заготовок под нагрузкой при температуре отжига. Такой подход позволяет за одну операцию получить заготовки прямолинейной формы, снять имеющиеся остаточные напряжения в материале прутков и получить необходимые механические свойства материала.

С учетом результатов проведенных нами исследований по влиянию температуры отжига на изменение механических свойств прутков из гафния, а также данных по зависимости прочностных свойств гафния в зависимости от температуры испытаний [8] были выбраны температурные режимы и величина нагрузки для проведения процесса.

Для реализации выбранного нами подхода была создана вакуумная установка, которая позволила проводить термообработку прутков с одновременным их выпрямлением.

На рис. 6 приведена схема установки для термообработки и выравнивания прутков из гафния. Пруткок для отжига и выпрямления помещали в вакуумную печь и соединяли концевыми захватами с системой нагружения, как показано на рисунке. При достижении рабочего вакуума в камере включался нагрев печи сопротивления. После нагревания прутка до заданной температуры приводился в действие механизм нагружения, который создавал растягивающее усилие на прутке.

ШЛИФОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПРУТКОВ

На конечных этапах получения прутков необходимо предусмотреть операции по удалению поверхностных слоев, обогащенных примесями. Кроме того, для повышения коррозионной стойкости прутков в конструкциях ПЭЛов поверхность должна быть минимально шероховатой. Если учесть, что к этим изделиям предъявляются довольно высокие требования по допускам на размеры, то на конечных этапах необходимо проводить опе-

рации по шлифовке и полировке поверхности прутков. Для снятия ограничений по длине прутков, связанных с расстоянием между центрами при круглой шлифовке, мы использовали технологию безцентровой шлифовки, когда обрабатываемое изделие помещается на опору между шлифовальным и ведущим кругом. Вместо шлифовального круга могут использоваться станки со шлифовальной лентой.

Нами использовались два типа безцентровых шлифовальных устройств. Для зачистки поверхности и первичной обработки прутков использовали бесцентровый станок для круглого шлифования немецкой фирмы «Fine», состоящий из трех модулей: базового ленточно-шлифовальный станка GRIT GX 75 2H, модуля для круглого шлифования GRIT GXC и модуля подачи охлаждающей жидкости GRIT GXW. Скорость подачи обрабатываемой заготовки задается углом поворота ведущего вала, ее можно в каждом случае задавать бесступенчато в диапазоне до max 2 м/мин.

Скорость съема металла и качество поверхности определяется типом применяемых шлифовальных лент, скоростью движения ленты, заданной скоростью подачи прутка и может составлять от нескольких мкм до десятых долей мм за проход.

Для окончательной обработки поверхности прутков из гафния использовали безцентрошлифовальный станок типа ЗШ184И. При шлифовке применяли круги на вулканитовой основе Н16СТ1 размерами 500 × 150 × 305; набор из 4 шт длиной 600 мм (тип С). Для полировки поверхности применяли круги на графитовой основе типа М28МЗ размерами 500 × 75 × 305; набор из 8 шт длиной 600 мм.

После шлифовки прутков (перед операцией полировки поверхности) их торцевые края обрезают до заданных размеров с помощью электроискрового станка. На рис. 7 приведена фотография отрезка прутка гафния после шлифовки и полировки поверхности на станке ЗШ184И.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРУТКОВ

При использовании прутков гафния в конструкциях ПЭЛов ядерного реактора важно знать механические свойства прутков при температуре рабочей среды. Для реакторов типа ВВЭР температура рабочей среды (водного теплоносителя) составляет около 600 К [12]. Поэтому мы исследовали свойства полученных прутков гафния в этом интервале температур. Испытания проводили в вакууме со скоростью деформации $1 \times 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$. На рис. 8 показаны изменения прочности, условного предела текучести и относительного удлинения от температуры испытаний. Из графиков, приведенных на рисунке, видно, что повышение температуры испытаний до 473 К приводит к существенному снижению предела прочности и повышению пластичности, хотя ус-

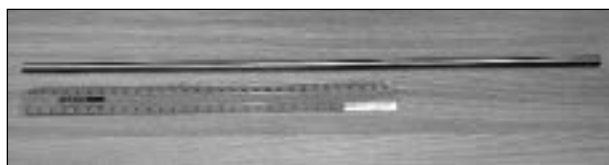


Рис. 7. Пруток гафния после полировки поверхности

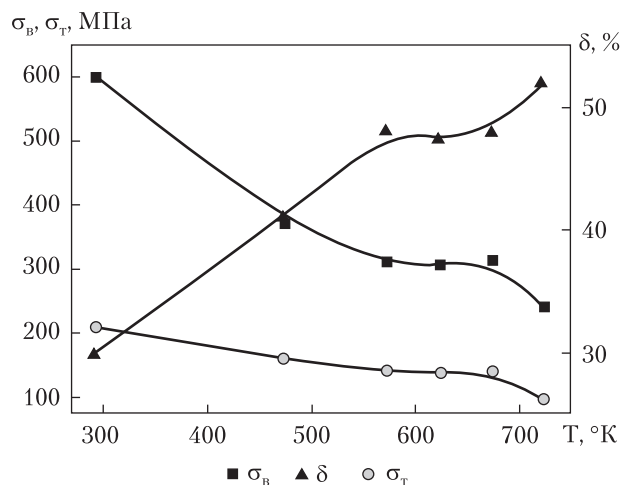


Рис. 8. Температурная зависимость характеристик прочности и пластичности прутков гафния, предварительно отожженных при 1073 К (время отжига — 2 ч)

ловный предел текучести уменьшается при этой температуре незначительно.

Повышение температуры испытаний до 573 К сопровождается дальнейшим снижением прочности и ростом пластичности (относительного удлинения). В интервале температур испытаний 573–673 К исследуемые характеристики остаются практически независимыми от температуры. При этом условный предел текучести имеет значения около 140 МПа, предел прочности около 310 МПа, а относительное удлинение — 48 %. Дальнейшее повышение температуры испытаний приводит к снижению прочностных характеристик и повышению пластичности.

МЕТОДИКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ПРУТКОВ ИЗ ГАФНИЯ

Одним из требований, которые предъявляются к пруткам из гафния при использовании в конструкциях ПЭЛов, является отсутствие дефектов в виде трещин, закатов и др. Для поиска дефектов в теле прутка и на его поверхности применяли ультразвуковой контроль, для чего была разработана методика и создана установка, в которой для создания акустического контакта *пруток–датчик* использовали иммерсионный метод. В качестве иммерсионной жидкости применялась дегазированная вода. Контроль проводился эхо-импульсным методом при совместной схеме включения пьезоэлектрических преобразователей. Для контроля качества прутков использовались как сдвиговые волны, так и волны растяжения–сжатия. Для градуировки ультразвукового дефектоскопа (в работе использовался дефектоскоп УД2-70) при поиске дефектов необходимы стандартные образцы с точно измеренными размерами дефектов, по которым выставляется амплитуда сигнала. При этом стандартные дефекты должны быть как на поверхности, так и в теле прутка и располагаться как вдоль, так и поперек оси прутка. Для изготовления образца прутка гафния со стандартными дефектами один из полученных прутков был пере-

дан на ГП «НИТИ» им. Я.Ю. Осады, которое имеет аттестат на право изготовления соответствующих образцов. Это предприятие изготовило стандартный образец № СО 240 прутка из гафния со стандартными дефектами, который использовали при настройке дефектоскопов и определении параметров дефектов при оценке качества изготовленных прутков.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы перспективы применения гафния в конструкциях ПЭЛов для использования в атомной энергетике Украины.
2. Проведена подготовка производства для получения прутков из гафния, которые могут быть использованы при изготовлении ПЭЛов.
3. Отработаны операции выплавки исходных слитков, ихковки, а также прокатки прутков гафния в профильных ручьевых валках.
4. Оптимизированы режимы термообработки прутков для получения заданных механических характеристик изделий.
5. Создана установка для вакуумного отжига и выпрямления получаемых прутков.
6. Отработаны операции по бесцентровой шлифовке и полировке прутков из гафния.
7. Изучены свойства полученных изделий и разработана методика проверки их качества.
8. Получена опытная партия прутков.

Выполнение работы стало возможным благодаря финансированию в рамках проекта № 47/1 Национальной академии наук Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рисованый В.Д., Ключков Е.П., Пономаренко В.Б.* Гафний в ядерной технике. — Димитровград: НИИ Атомных реакторов, 1993. — 143 с.
2. *Поглощающие материалы для регулирования ядерных реакторов / Сокр. перевод с англ. / Под ред. Б.Г. Арабея, В.В. Чекунова.* — М: Атомиздат, 1965. — 450 с.
3. *Афанасьев А.А., Конотоп Ю.Ф., Одейчук Н.П.* Гафний — перспективный поглотитель для ПЭЛов СУЗ реакторов ВВЭР-1000 АЭС Украины // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, (78). 2000. — № 4. — С. 80–85.

4. Красноруцкий В.С., Белаиш Н.Н., Абдуллаев А.М. и др. Разработка и некоторые характеристики работоспособности ПЭЛов с поглотителем V_4C-Hf // Вопросы атомной науки и техники, 2007. — № 2. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (90). — С. 88–96.
5. Бочаров О.В., Ватулин А.В., Никулин А.Д. и др. О целесообразности применения гафния в органах управления атомных реакторов различного назначения // Сб-к докладов V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. — Т.1. Ч. 2. — Димитровград, 1998. — С.194–198.
6. *Металлургия гафния* / Под ред. Д.Е. Томаса, Е.Т. Хейса. Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1967. — 307 с.
7. Ажажа В.М., Ковтун К.В., Вьюгов П.Н. и др. Структура и свойства выдавленного гафния // ВАНТ, Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1998 — Вып 3(69), 4 (70). — С. 82–83.
8. Неклюдов И.М., Ажажа В.М., Ковтун К.В. и др. Подготовка производства конструкционных материалов из гафния // Наука та інновації. — 2009. — Т. 5, № 2. — С. 23–31.
9. Неклюдов И.М., Ажажа В.М., Вьюгов П.Н. и др. Новая технология производства гафния ядерной чистоты. Белгород: Белгородский Государственный Университет, Научные ведомости, 2001. — Серия «Физика», № 1, (14). — С. 127–132.
10. Ковтун К.В., Вьюгов П.Н., Мухачев А.П., Афанасьев А.А. Изучение свойств кальциетермического гафния // Труды конференции «Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике», 14–19 июня 1999 г., Алушта, Крым. — С. 115–117
11. Волокита Г.И., Красноруцкий В.С., Резниченко Э.А. и др. Разработка опытной технологии изготовления прутков из гафния для ПЭЛов // ВАНТ, Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники», 2000. — №5 (11). — С. 62–69.
12. Федоров В.Г., Бирюков Г.И., Рогов М.Ф., Еришов В.Г. Реакторная установка ВВЭР для АЭС нового поколения средней мощности // ВАНТ, Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», 1994. — Вып. 2(62), 4 (70). — С. 38–41.

І.М. Неклюдов, В.М. Ажажа,
 К.В. Ковтун, А.О. Васильєв, Р.В. Ажажа, А.Д. Солоніхін,
 М.П. Старолат, С.П. Стеценко, К.А. Ліндт,
 В.М. Болков, В.І. Попов, Ю.В. Мочалов

ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА ПРУТКІВ З ГАФНІЮ

Знайдені умови, за яких при різних переділах можна зберігати у металі низький вміст домішок. Проведено аналіз формування структури в металі в залежності від режимів деформаційно-термічної обробки напівфабрикатів і їх впливу на властивості готової продукції. Для отримання вихідних злитків використовували електронно-променеву плавку. Деформаційну обробку злитків проводили з використанням кування та прокачування у профільних валках. Кінцеву термообробку сумішали з вирівнюванням прутків. Поверхню готових прутків шліфували, після чого проводили контроль властивостей і якості виробів.

Ключові слова: гафній, злиток, кування, прутки, прокатка, відпал, властивості.

І.М. Neklyudov, V.M. Azhazha, K.V. Kovtun,
 A.A. Vasilyev, R.V. Azhazha, A.D. Solopikhin M.P. Starolat,
 S.P. Stetsenko, K.A. Lindt, V.M. Bolkov,
 V.I. Popov, Yu. V. Mochalov

PREPARATION OF HAFNIUM BARS MANUFACTURE

The conditions to support low impurity levels in metal at different redistributions are determined. The analysis of metal structure formation processes depending on modes of deformation heat treatment of semi-manufactures and their influence on final product is made. Electron-beam melting was used to receive base ingots. Deformation treatment of bar was conducted using forging and rolling in profile rolls. Final heat treatment was combined with bar alignment. The surface of the prepared bars was exposed to grinding and then the control of product properties and quality was conducted.

Keywords: hafnium, ingot, forging, bar, rolling, annealing, properties.

Надійшла до редакції 07.06.10