

РАЗРАБОТКА ОПЫТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ГАФНИЯ ДЛЯ ПЭЛОВ

*Г.И.Волокита, В.С.Красноруцкий, Э.А.Резниченко,
Б.П.Черный*, М.П.Зейдлиц*, В.С.Вахрушева***

*НТК «ЯТЦ» ННЦ ХФТИ, г.Харьков; * ГП «Рубин», г.Харьков; **ГТИ, г.Днепропетровск*

Разработаны и опробованы различные схемыковки и прессования гафниевых прутков. Полученные прутки отличаются структурой, механическими свойствами и текстурой. Исходя из полученных результатов, для дальнейшей разработки были выбраны две альтернативные технологические схемы изготовления прутков из гафния марки ГФЭ-1. По выбранным схемам после их доработки были получены опытные партии прутков, удовлетворяющие предъявляемым к ним техническим требованиям. Определены направления дальнейших исследований и разработок.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что гафний является одним из наиболее перспективных материалов в атомном реакторостроении [1-4]. Результаты экспериментальных исследований и опыт эксплуатации регулирующих стержней из гафния в ядерных реакторах (ЯР) свидетельствуют о том, что он является наиболее подходящим поглотителем для органов регулирования ЯР типа ВВЭР. Наряду с замечательной поглощающей способностью он обладает высокими механическими свойствами, радиационной и коррозионной стойкостью в воде при высоких давлениях и температуре. Кроме этого утяжеленные ПС СУЗ с гафнием позволяют существенно уменьшить время срабатывания защиты ЯР.

В настоящее время в качестве первого шага приступили к реализации проекта так называемой «малой модернизации» ПС СУЗ, связанной с заменой в нижней части ПЭЛОВ карбида бора на металлический гафний на 3-ем блоке РАЭС, на очереди ЮУ АЭС. По оценкам такая замена без внесения существенных изменений в конструкцию штатных ПЭЛОВ позволит увеличить массу ПС СУЗ с целью безусловного срабатывания в режиме АЗ за время менее 4 секунд. Вместе с тем, на сегодня отработанная технология изготовления прутков из гафния отсутствует. Учитывая современные тенденции в реакторостроении, направленные на увеличение срока службы и надежности систем ЯР, а также ориентацию на организацию производства комплектующих к ним в Украине, возникла потребность в разработке технологии изготовления прутков для ПС СУЗ из гафния марки ГФЭ-1, имеющегося в Украине в достаточном количестве. Цель настоящей работы: опробовать различные технологические схемы получения прутков из гафния с физико-механическими параметрами, удовлетворяющими предъявляемым к ним техническим требованиям. Основываясь на полученных результатах, произвести выбор наиболее оптимальной технологической схемы, или схем, для дальнейшей отработки и создания опытно-промышленной технологии получения прутков из гафния.

В работе принимали участие НТК «ЯТЦ» ННЦ "ХФТИ" (г. Харьков) совместно с ГП «Рубин» (г.Харьков) и ГТИ (г.Днепропетровск).

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУТКОВ

На сегодня в ряде промышленно развитых стран накоплен определенный опыт изготовления изделий из гафния и их длительной эксплуатации в качестве органов регулирования в активных зонах ЯР.

Слитки гафния деформируют, как правило, в α -фазе. Основную опасность при нагреве на воздухе представляют окисление металла и его насыщение водородом и азотом, что приводит к значительному снижению его пластичности [1,5-7] и затрудняет процесс дальнейшей деформации. Применяется несколько альтернативных процессов: прессование (экструзия), прокатка, свободная ковка, радиальное обжатие, волочение и их комбинации.

Свободная ковка как на молоте, так и на прессе проводится в диапазоне температур 880...1200°C. Обычно ковку начинают с легкого обжатия с целью разрушить структуру литья. Далее ковку проводят по схеме квадрат \rightarrow шестигранник или восьмигранник \rightarrow пруток круглого сечения или пластина. Благодаря скорости процесса, степень обжатия между подогревами заготовки может быть увеличена. Это ускоряет процесс деформации и позволяет снизить степень насыщения кислородом и азотом.

При осадке на прессе требуемое давление в значительной степени меняется в зависимости от размеров слитка, температуры деформации и способов дальнейшей обработки, но, по утверждению исследователей, не превышает 8 т/см² [6-7]. Разработке методов прессования (экструзии) прутков из гафния уделялось гораздо меньше внимания, так как считается, что при этом образуется значительное количество отходов гафния. Кроме этого для экструзии требуются мощные прессы и жаропрочная износостойкая пресс-оснастка. Рекомендуемое давление прессования - от 10,5 до 14,0 т/см², а температура прессования \leq 1100°C.

Методами радиального обжатия несколько проще получить гафниевый пруток из кованного слитка. Радиальное обжатие можно проводить при более

низких температурах вплоть до комнатных. Этот процесс является высокопроизводительным и позволяет получать прутки гафния с довольно высоким качеством поверхности. В отличие от обычнойковки на молотах и прессах в рассматриваемом процессе деформация происходит не за счет удара или единичного интенсивного обжатия, а в результате приложения большого числа обжатий с относительно малой степенью деформации за одно обжатие двумя, четырьмя и более бойками, расположенными в одной плоскости и сходящимися в радиальном направлении. Заготовка при этом совершает два вида движения: поступательное в направлении подачи и вращательное. Обработка на радиально-обжимных машинах (РОМ) позволяет достигать больших степеней деформации без разрушения, например, инструментальные стали типа У10, Р18 можно деформировать при комнатной температуре со степенями обжатия 30...40%. Точность изготовления поковок определяется качеством наладки РОМ и ее жесткостью. По сравнению с ротационно-ковочными машинами (РКМ) РОМ имеют большую стойкость деталей узла механизма обжатия и, как правило, используются для деформации более крупных заготовок.

В РКМ, в отличие от РОМ, узел, несущий инструмент или приводящий инструмент в действие, вращается вокруг обрабатываемой заготовки. Разработаны различные схемы механизмов ротационнойковки в зависимости от характера движения инструмента (бойков и штампов) и конструктивных особенностей его привода. С точки зрения интенсивности ведения процесса, допускаемой степени обжатия и производительности радиальное обжатие не уступает, а зачастую и превосходит другие методы обработки металлов давлением, в частности, при получении прутков.

Волочение обычно применяют на последних этапах получения прутков из гафния поскольку этот метод при наличии качественного инструмента, правильно подобранных режимах и смазке обеспечивает хорошее качество поверхности прутков и точность изготовления. В то же время, он ограничен тем, что при 20°C возможное обжатие между рекристаллизационными отжигами не превышает 20...30%.

Ручьевую (желобчатую) прокатку проводят при температуре 950...1000°C. Схема деформации построена таким образом, что после каждого прохода, за исключением последнего, прутки выходят овальными.

Прокатка в ручьевых валках, на обжимных станках, а также волочение позволяют получить калиброванные прутки с хорошим качеством поверхности, но при этом образуется неоднородная по сечению прутка структура. То же может происходить и в случае производства прутков на ротационно-ковочных машинах.

Обычно на разных стадиях деформирования прутков используют различные способы деформации. Согласно литературным данным [1,5-7] наибольшее распространение получили следующие схемы: свободнаяковка + прокатка (для получения пла-

стин); свободнаяковка или радиальное обжатие + волочение; свободнаяковка + ротационнаяковка; прессование (экструзия) + волочение.

В настоящей работе опробованы радиальное обжатие на РОМ и РКМ, свободнаяковка, прессование и волочение как в отдельности, так и в различном сочетании.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для получения прутков использовали слитки гафния ГФЭ-1 двойного электронно-лучевого переплава производства ГНПП "Цирконий", г. Днепропетровск. Химический состав слитков соответствовал ТУ У 14312708.183-95. Диаметр деформируемых слитков составлял 80 ± 2 мм, высота 300 ± 10 мм. Размер зерна в слитках неоднороден по высоте и сечению и колеблется от 1 до 15 мм. Механические свойства слитков при комнатной и повышенных температурах представлены в таблице.

СВОБОДНАЯ КОВКА

Свободнуюковку исходного слитка осуществляли на пневматическом кузнечном молоте модели М-415А, типа ПМ-400 с весом падающей части 400 кг, энергией удара 950 кг, числом ударов в минуту - 130, в диапазоне температур 900...1100°C в начальный период, а затем и при более низких температурах, вплоть до 150...200°C. Степень обжатия за переход составляла 10...35%.

ПРЕССОВАНИЕ (ЭКСТРУЗИЯ) ПРУТКОВ

Для определения параметров прессования исходного слитка, обладающего структурой литья, и ковального на прессе по схеме «квадрат - многогранник», с частично разрушенной структурой литья, прессовали заготовки малого диаметра (30...37 мм) в защитных оболочках из малоуглеродистой стали на вертикальном прессе модели Д 2434 А, усилием 260 т.с. Температура прессования составляла 900...1150°C.

Прессование большого слитка осуществляли на опытном заводе ГТИ, г. Днепропетровск, сначала на горизонтальном прессе мощностью 16 МН., а затем на горизонтальном прессе меньшей мощности (5 МН). В качестве защитного покрытия и смазки использовали стеклосмазку, которую впоследствии удаляли в щелочном расплаве.

РАДИАЛЬНОЕ ОБЖАТИЕ

Радиальное обжатие проводили на модернизированной четырехбойковой РОМ типа В004, усилием 10 МН в диапазоне температур 850...1150°C и степеней обжатия 10...40%. Максимальный ход бойка 15 мм.

Число обжатий в минуту - 200...450. Мощность электродвигателя привода бойков - 30 кВт. Мощ-

ность нагревательного устройства 15 кВт. Диаметр заготовки не более 90 мм.

Механические свойства слитков гафния при комнатной и повышенных температурах

Характеристики / $T_{исп}, ^\circ C$	20	950	1130	1150
Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	245 (200-290)	450 (430-470)	290	270
Предел прочности, σ_B , МПа	250 (200-300)	480 (430-530)	370	330
Относительное удлинение, δ , %	1,5 (0,5-2,5)	30 (25-35)	33,5	32

РОТАЦИОННАЯ КОВКА

Ротационную ковку осуществляли на серийных ротационно-обжимных машинах типа В-2122 шпиндельного типа с постоянной степенью обжатия, используя механизм обжатия с цилиндрическими роликами. Количество роликов - 12. Число оборотов шпинделя - 550 об/мин. Скорость подачи заготовки - 2,5 м/мин. Мощность электродвигателя привода - 3 кВт. Машины оборудованы нагревательным устройством, расположенным впереди рабочей головки. Мощность нагревательного устройства - до 5 кВт.

Диаметры исходных заготовок составляли 19,5 и 14 мм. При горячей ковке длина заготовок ограничивалась возможностями нагревательного оборудования.

Деформацию проводили в интервале температур 20...980°C с промежуточными отжигами и подогревами в течение 30...90 мин. Для снижения усилия, расходуемого на преодоление трения пары заготовка-инструмент, на поверхность прутка наносили графитовую смазку.

С целью гарантированного исключения влияния примесей, в первую очередь кислорода и азота, в порядке эксперимента, один прутки диаметром 19,5 мм протачивали до диаметра 14,5 мм, отжигали 800°C x 1,5 ч. в вакууме, химическим травлением удаляли слой глубиной 0,1 мм и подвергали ротационному обжатию при комнатной температуре с промежуточными отжигами после обжатия 30 %.

ВОЛОЧЕНИЕ

Прутки диаметром 8...10 мм подвергали волочению при комнатной температуре с использованием графитовой смазки на лабораторной цепной волочильной машине усилием 1000 кг, укомплектованной генератором ВЧИ-10 для индукционного нагрева и отжига прутков. Потребляемая мощность - 22 кВт.

Перед волочением для снятия наклепа прутки пропускали через индуктор, нагревая их до температуры 350...1200°C.

При волочении степень относительного обжатия за проход не превышала 10%, а суммарное обжатие между отжигами достигало 30%.

При всех видах деформации после каждого перехода деформируемые заготовки очищали от поверхностного загрязнения и окислов, протравливали и проводили визуальный контроль состояния прутков. Треснувшие концы прутков обрубывали, обнаруженные на поверхности трещины зашлифовывали.

НАГРЕВ И ОТЖИГ

Нагрев металла при деформации проводили на воздухе в печах электросопротивления типа СНОЛ и СУОЛ с температурой нагрева до 1300°C, а также в индукторе. Исходные слитки нагревали до 850...1200°C, время нагрева - 40...60 мин. Промежуточные подогревы проводили до установленной температуры деформации в течение 20...30 мин, в зависимости от диаметра прутка. Рекристаллизационные отжиги проводили при 800...950°C в течение 1...3 ч. Температуру контролировали с помощью термопар «хромель-алюмель» и переносного пирометра типа ОПИР-2М. После термообработки поверхность прутков очищали от оксидной пленки механическим путем и травлением.

Отжиг прутков и образцов для механических испытаний проводили в вакууме $(1...3) \cdot 10^{-5}$ торр при температуре 800...950°C в течение 1...3 ч, и 620°C x 0,5 ч.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

В процессе получения прутков заготовки подвергали нескольким видам механической обработки: токарная, фрезерование, электроэрозионная резка, пескоструение, шлифование:

а) токарная обработка. Глубина резания составляла 0,15 мм, а на последних проходах - 0,07...0,08 мм. Скорость подачи равнялась 0,1...0,25 мм/об. На деформированных прутках получали довольно качественную поверхность, в то время как при проточке слитков имели место трещины в отдельных, благоприятно ориентированных зернах, а также двойники. Точением получали заготовки для предварительных исследований, заготовки (слитки) под деформацию и образцы для механических испытаний;

б) резка слитка. Разрезание слитка на цилиндрические заготовки и сегменты осуществляли дисковыми фрезами на фрезерном станке с применением

охлаждающей эмульсии, глубина резания достигала 0,5 мм. Следует отметить довольно быстрый износ дисковых фрез в результате истирания и налипания гафния. От использования прорезиненных абразивных кругов отказались ввиду повышенной пожароопасности;

в) электроэрозионная резка. Во избежание наклепа на большую глубину при приготовлении образцов для металлографических исследований применяли электроэрозионную резку в керосине на электроэрозионном станке модели 4531П. Образцы после резки промывали, шлифовали, а затем подвергали химической полировке;

г) шлифование. На завершающей стадии изготовления перед химико-термической обработкой прутки гафния шлифовали на бесцентрово-шлифовальном станке модели ЗГ182.

РИХТОВАНИЕ ПРУТКОВ

Правку прутков диаметром 32 мм осуществляли на кулачковом прессе.

Рихтование прутков гафния диаметром 8...10 мм и длиной ≥ 320 мм проводили по принципу «гиб с перегибом» на установке рихтовки прутков конструкции ХФТИ, а также на косовальковом стане.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

КОВКА

Исследование влияния режимов деформации на деформируемость слитков гафния как при свободной ковке, так и при радиальном обжатии показало, что деформация на 15...20% при температуре 850°C приводит к образованию радиальных трещин в теле прутков и продольных трещин на концах заготовки. При такой же степени обжатия в случае радиального обжатия при 930°C, а в случае свободнойковки при 1000°C, имело место лишь более слабое растрескивание на концах прутков, которое обнаруживали с помощью цветной или ультразвуковой дефектоскопии, а в некоторых случаях и визуально. От использования чехлов, солевых ванн и стеклосмазки отказались по разным причинам. Применение графитовой смазки в должной мере не обеспечивало защиту от окисления. Поэтому важно было правильно выбрать начальную температуру деформации.

Следует отметить, что при ковке, в отличие от других методов, образование окалины на поверхности прутков при правильно выбранных режимах не очень сильно влияет на качество поверхности. Это связано с тем, что в процессе обжатия по поверхности заготовки с большой частотой наносятся удары бойками, вследствие чего окалина удаляется. Другой особенностью горячего обжатия по сравнению с обработкой на прессах и молотах является то, что температура нагрева относительно короткой (400...600 мм) уже деформированной заготовки может быть снижена, так как весьма большая скорость и частота обжатий позволяют более продолжительное

время сохранить тепло, что особенно важно при обработке концевых участков.

По результатам первых экспериментов были выбраны приведенные ниже условия деформации.

Заготовки диаметром 81,2 мм и длиной 100 мм нагревали в муфельной печи до 950...1030°C, выдерживали при достигнутой температуре 20 мин и подвергали деформации на РОМ с промежуточными подогревами до заданной температуры после каждого прохода. Вначале заготовки деформировали с малыми обжатиями по сечению (до 15%) с целью разрушения структуры литья и во избежание образования и развития глубоких трещин. Во втором переходе степень относительного обжатия увеличивали до 25%, а на третьем переходе обжатие составило 35%. Начиная с четвертого перехода и до получения прутков диаметром 20 мм. степень относительного обжатия за переход поддерживалась на уровне 40%. По достижению диаметров 40 и 20 мм прутки разрезались пополам. Далее деформацию проводили по нескольким технологическим схемам:

- деформация слитка на РОМ и получение прутков $\varnothing 20,0$ и 9,5 мм., $T_{\text{деф.}} = 850-1050^\circ\text{C}$ (рис.1. Вариант 1);

- ковка прутков на РКМ с $\varnothing 20$ мм до 8,5 мм при понижающейся с 950°C до $500 \pm 50^\circ\text{C}$ температуре деформации (рис. 1. Вариант 11);

- ротационная ковка прутков до $\varnothing 8,5$ мм при $T_{\text{комн.}}$ (рис 1. Вариант 111);

- свободная ковка слитков и прутков $\varnothing 20$ мм до 9 мм при понижающейся с 980°C до $150 \pm 50^\circ\text{C}$ температуре деформации (рис. 2);

-двойное прессование слитка в пруток $\varnothing 9$ мм, $T_{\text{деф.}} = 1000-1150^\circ\text{C}$ (рис. 3).

-ковки прутков из гафния марки ГФЭ-1 по отработанному техпроцессу (рис. 4).

В результате ковкой на РОМ получены прутки диаметром 9 и 20 мм, причем последние составляли большинство, так как из-за довольно сильно развитой поверхности они больше подходили в качестве заготовок под дальнейший передел другими методами.

Горячей и теплой деформацией на РКМ, начиная с диаметров 20 и 14,5 мм, получены прутки диаметром 8,5...9,0 мм.

Методом свободнойковки исходного слитка и прутка диаметром 19,5 мм изготовлены прутки диаметром 9...9,5 мм, причем при диаметре менее 20 мм начальная температура деформации составляла $950 \pm 30^\circ\text{C}$, а конечная - 200...500°C. Обжатие за переход составляло 20...35%. Отжиг или подогрев до требуемой температуры проводили через 50...70% суммарной деформации. Продеформированную до половины длины заготовку перехватывали и разворачивали, после чего проковывали ее до такого же диаметра.

Из кованых прутков наиболее удовлетворительным качеством поверхности обладали прутки, полученные на РКМ при пониженных температурах. Несколько грубее поверхность и выше неоднород-

ность по сечению прутков, полученных свободной ковкой. Изготовленные на РОМ при высоких температурах прутки обладали наиболее развитой поверхностью, имели складки и заковы глубиной до 1...1,5 мм, вероятно из-за слишком высокой выбранной степени обжатия за переход. За исключением нескольких трещин на концах отдельных прутков, образовавшихся видимо из-за недостаточно проработанной на первом этапе технологии, изготовленные прутки трещин не имели. Расходный коэффициент металла составил в среднем 1,45 при радиальном обжатии и 1,35 при свободной ковке.

ПРЕССОВАНИЕ (ЭКСТРУЗИЯ) ПРУТКОВ

Вначале с помощью механических испытаний «на растяжение» при повышенных температурах (950...1150°C) был оценен уровень технологической пластичности металла. Из результатов испытаний, приведенных в таблице видно, что при 1100...1150°C этот уровень достаточно высок. Деформацию заводского слитка проводили с учетом результатов прессования заготовок малого диаметра и механических испытаний. Начальную температуру прессования решено было повысить до 1150°C с целью снижения усилия деформации. Основные этапы технологической схемы: подготовка поверхности; нанесение защитных покрытий; поэтапное прессование с контролем температуры; химическая обработка; термическая обработка; контроль качества на переделах и готового прутка. После механической обработки слитков разрезали на две части длиной 150 и 130 мм. На каждом переделе для оценки качества от слитка и прутка отрезали темплеты. Нагретый до выбранной температуры деформации слиток прессовали в прутки диаметром 32 мм. После охлаждения с поверхности прутков удаляли стеклосмазку, прутки правили на кулачковом прессе и проводили их контроль.

Визуальный контроль поверхности выдавленных на Ø32 мм прутков показал, что хотя на поверхности имеются дефекты характерные для данного вида деформации - складки, рябизна, однако их небольшая глубина и характер расположения позволяют проводить дальнейшее прессование без механической обработки прутков. При изучении микроструктуры передельных прутков установлено, что на некоторых участках шлифа встречается непольностью рекристаллизованная структура, тем не менее дальнейшая горячая деформация на Ø9 мм возможна без промежуточного отжига. Поверхность 9 мм прутков вполне удовлетворительная; глубоких дефектов, задиров, трещин не обнаружено. Расходный коэффициент металла, который в дальнейшем может быть снижен, составил 1,93. Для оценки качества и технологичности металла прутков от них отрезали темплеты и проводили исследования по уточнению температуры дальнейшего прессования.

Второе прессование (экструзию) прутков до диаметра 9 мм осуществляли при температуре 1000...1050°C без промежуточной термообработки.

Для этого прутки резали на заготовки длиной 130...150 мм. После прессования и химической обработки прутки диаметром 9 мм подвергали правке на косовальковом стане и контролю. Поверхность прутков удовлетворительная, глубоких дефектов, трещин не обнаружено. Затем прутки механической обработкой довели до требуемого диаметра 8,65 мм и подвергли термообработке в вакууме (620°C x 30 мин).

Разработанная технологическая схема прессования прутков из гафния не является окончательной. В дальнейшем она может быть усовершенствована и дополнена другими видами деформации, такими как холодная прокатка, волочение, косовальковая прокатка и др., с целью улучшения комплекса свойств металла и его эксплуатационных характеристик. Кроме того, представляет интерес дальнейшее изучение влияния режимов термообработки на физико-механические свойства готовой продукции.

Таким образом, разными методами получены прутки диаметром 9±1 мм. Такие размеры обусловлены тем, что дальнейшую деформацию до нужных размеров проводили методом волочения, как обеспечивающим, согласно литературным данным, однородность по диаметру и более высокое качество поверхности.

ВОЛОЧЕНИЕ ПРУТКОВ

После первого цикла протягивания прутков их отжигали в индукторе при 1000°C в течение нескольких минут. Последующая деформация проводилась без отжигов. На всех переходах усилие волочения не было стабильным и составляло от 1000 кГ на первом переходе до менее 600 кГ на последнем переходе. Структура неоднородная по сечению: в приповерхностных слоях размер зерен составляет 10...15 мкм, затем, по мере приближения к центру, он возрастает и в осевой части прутка составляет 40...50 мкм, причем в зернах имеются двойники.

ВЫБОР БАЗОВЫХ СХЕМ

Исходя из полученных результатов для дальнейшей разработки были выбраны две альтернативные технологические схемы изготовления прутков из гафния марки ГФЭ-1. Это радиальное обжатие (РОМ + РКМ) с понижающейся вплоть до комнатной температурой деформации и двойное горячее прессование, по которым после их корректировки были получены прутки из гафния ГФЭ-1 Ø7,1 и 8,5 мм, соответственно, отличающиеся структурой, механическими свойствами и текстурой [8-10]. Для окончательного выбора в пользу той или иной схемы, кроме учета технико-экономических показателей и качества прутков необходимо провести их реакторное испытание, в результате которого можно будет определить какие прутки обладают наиболее благоприятными для эксплуатации в ЯР характери-

стиками и, соответственно, схему, обеспечивающую получение прутков с нужными физико-механическими свойствами.

При дальнейшем совершенствовании технологических процессов предусматривается уточнить назначенные режимы, в том числе скорость подачи и вращения заготовки в процессе обжатия, скорость обратного хода, температуру и степень суммарного обжатия для каждого цикла деформации, частоту подогрева заготовки и температуру отжигов. Основными критериями при этом являются качество поверхности и сплошность прутков, их структура, текстура, механические свойства, радиационная и коррозионная стойкость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных работ:

- определены базовые технологические параметры деформации промышленных слитков гафния;

- разработана и изготовлена оснастка для получения прутков из гафния разными методами (прессование, ковка, волочение);

- разработаны технологические схемы получения прутков из промышленных слитков гафния методами одинарного и двойного прессования (ГТИ, г. Днепропетровск)ковки, радиального обжатия и волочения (НТК "ЯТЦ" ННЦ "ХФТИ", ГП «Рубин», г. Харьков);

- изготовлены экспериментальные образцы прутков из гафния ГФЭ-1;

- на основании результатов предварительных исследований прутков предложены альтернативные схемы изготовления прутков для последующей отработки и освоения;

- показано, что:

а) в случае радиального обжатия образуется меньшее количество отходов, но может иметь место неоднородность структуры по сечению прутка;

б) в случае прессования структура более однородная и мелкозернистая, но при этом возрастают потери металла.

- намечены направления дальнейших исследований, проведение которых позволит определиться в

выборе основной технологической схемы изготовления прутков из гафния ГФЭ-1 для ПС СУЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д. Рисованный, Е.П. Клочков, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Днепропетровск: НИИАР, 1993, с. 143.
2. IAEA Technical Committee Meeting on «Control Assembly Materials for Water Reactors: Experience, Performance and Perspectives». Vienna, Austria, 12th...15th October, 1998.
3. Proceeding of a Technical Committee Meeting held in Vienna, 29 November... 2 December, 1993) IAEA, Vienna, 1995, (IAEA TECDOC-813)
4. Ю.Ф. Коногоп, Н.П. Одейчук, В.С. Красноруцкой. *Современное состояние проблемы поглощающих нейтроны материалов и изделий на их основе для реакторов типа ВВЭР-1000*. Аналитический обзор. – Харьков, ННЦ ХФТИ, 1998, 68 с.
5. В.Е. Рей. *Производство регулирующих стержней для ядерных реакторов*. М.: Атомиздат, 1965, с.278.
6. *Металлургия гафния*. Под ред. Д.Е. Томаса и Е.Т.Хейса. М.: Металлургия, 1967, с.308.
7. О.В. Бочаров. *Электронно-лучевая плавка и обработка давлением гафния*. Обзор. М.: ЦНИИ атоминформ, 1983.
8. В.С. Вахрушева, Н.В. Ярошенко. Влияние технологических параметров производства на структурообразование и свойства прутков из гафния // *ВАНТ*. Тр. конф. Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике. Алушта, Крым, 14-19 июня 1999, с. 64
9. Н.М. Роевко, Г.И. Волокита, Э.А. Резниченко и др. Эволюция текстуры гафниевых прутков в процессе деформации // *ВАНТ*. Тр. конф. Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике. Алушта, Крым, 14-19 июня 1999, с. 62
10. Г.И. Волокита, Э.А. Резниченко, В.П. Чернуха. Свойства гафниевых прутков, полученных методомковки. // *ВАНТ*. Тр. конф. Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике. Алушта, Крым, 14-19 июня 1999, с. 61.