

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПРУТКОВ ИЗ ГАФНИЯ

*В.С. Вахрушева, Г.М. Воробьев, Н.В. Ярошенко*

*Государственный трубный институт (ГТИ), г. Днепропетровск, Украина*

В Государственном трубном институте разработана технология изготовления и выпущена опытная партия прутков диаметром 8,5 мм из гафния марки ГФЭ-1. Представлены результаты исследования структуры и свойств металла на различных стадиях передела и в готовых прутках. Анализируется влияние температурно-деформационных параметров на протекание процессов деформации и рекристаллизации гафния.

Для разработки технологии изготовления и использованию регулирующих стержней из гафния отечественного производства проведен комплекс работ.

Два обстоятельства предопределили начало развития отечественного производства изделий из гафния:

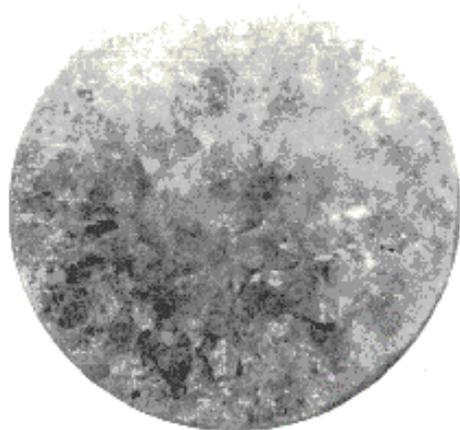
- принятие Комплексной программы создания ядерно-топливного цикла на Украине;
- накопление запасов гафния в результате производства циркония.

В опытно-промышленных условиях по технологической схеме, разработанной в ГТИ, изготовлена первая опытная партия прутков диаметром 8,5 мм. Технологическая схема включает в себя серию операций последовательного горячего прессования на прессах различной мощности без применения промежуточных термических обработок.

В качестве исходной заготовки использовали слиток гафния металлического марки ГФЭ-1 (ТУ У 14312708.183-95).

Исследование макроструктуры заготовки показало, что структура плотная, крупнозернистая. Наблюдается неоднородность макроструктуры: от края темплета к центру зерна в поперечнике увеличиваются от 1 до 5 мм (рис.1).

Результаты испытаний механических свойств образцов от слитка, горячепрессованных прутков при повышенных температурах свидетельствуют о достаточном уровне технологической пластичности металла (табл.1). Наибольшая пластичность металла наблюдается в интервале температур 950...1150°C [1].



*Рис. 1. Макроструктура слитка*

Исследования микроструктуры образцов гафния, испытанных по ГОСТ 9651-84 при  $T_{исп} = 950^\circ\text{C}$  и  $1150^\circ\text{C}$ , показали, что при  $T_{исп} = 950^\circ\text{C}$  в отдельных кристаллитах наблюдаются полосы скольжения и микродвойники ориентированные в двух-трех направлениях (рис.2).

Таблица 1  
Механические свойства прутка гафния на разных стадиях передела

$T_{исп}, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$
СЛИТОК			
950	30	45	48
1150	32	28	35
I ПРЕССОВАНИЕ			
20	23	414	622
950	92,8	46,5	64,5
1000	77,6	37	53
1050	61	33	46
1150	77,6	25,6	36
II ПРЕССОВАНИЕ (готовый пруток)			
20	18,9	425	666,5
Заданные св-ва	н.м. 18	н.м. 350	н.м. 450

С увеличением температуры до  $T_{исп} = 1150^\circ\text{C}$  полосы превращаются в пакки скольжения. В процессе горячей деформации идет интенсивная релаксация напряжений и динамическая полигонизация, при температуре  $T_{исп} = 1150^\circ\text{C}$  возникают в отдельных кристаллитах свободные от дефектов зерна.

Гафний обладает ярко выраженной анизотропией свойств. Чтобы получить некоторые сведения о механических характеристиках слитка в продольном направлении, провели испытание образцов гафния на сжатие по ГОСТ 25.503-80. Из данных табл.2 видно, что при большом запасе пластичности металл имеет малую способность к равномерной деформации.

Первое горячее прессование осуществляли на горизонтальном прессе мощностью 16 МН с нагревом слитка перед прессованием до  $1100^\circ\text{C}$  в индукторе. Поверхность слитка при нагреве была защищена шликерным покрытием, которое затем служило и смазкой при деформации. Степень деформации составила 85%.

После первого прессования наблюдали резкое измельчение зерна до 30...50 мкм. Дислокационная структура деформированного металла оказывает решающее влияние на ход рекристаллизации [2]. При испытании образцов от горячепрессованных прутков в интервале температур 950...1150°C происходит динамическая рекристаллизация, в результате которой формируется зеренная структура размером от 3...5 до 15...20 мкм. Отметим, что при этом в недеформированном металле (образец-свидетель) зерно за время испытаний выросло до 150...200 мкм. При деформации кристаллиты подвергаются такому же формоизменению, как и весь образец в целом. При этом они стремятся принять определенную кристаллографическую ориентировку относительно внешних деформирующих усилий [2].

Однако, при  $T_{исп.} = 950^\circ\text{C}$  наблюдается разнотерность с очень мелким зерном (3...5 мкм), что свидетельствует о замедлении процесса рекристаллизации при этой температуре. Это наблюдение и результаты

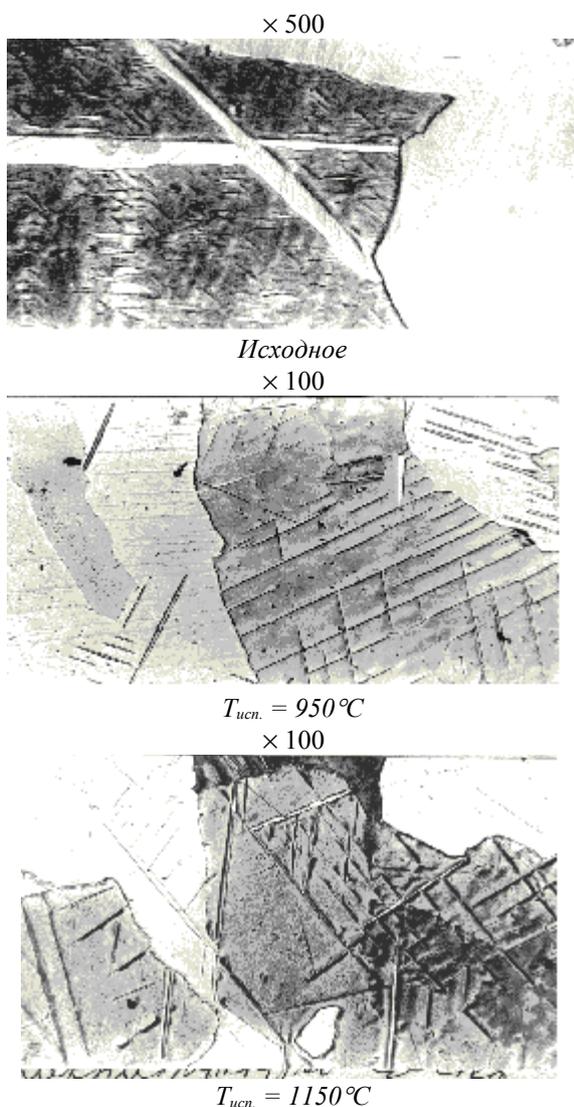


Рис. 2. Микроструктура слитка при различных

#### температурах испытания

механических испытаний при повышенных температурах образцов горячепрессованного гафния (см. табл.1) явились основанием для выбора температуры нагрева под второе прессование.

Второе прессование осуществляли на горизонтальном прессе мощностью 5 МН, при температуре нагрева под прессование - 1150°C, со шликерным покрытием заготовки, степень деформации составила 95%. Такое повышение степени деформации способствовало измельчению зерна. После второго прессования получена рекристаллизованная структура с размером зерна 10...20 мкм (рис.3).

Механические свойства прутков соответствуют заданным требованиям (см. табл.1).

Поскольку текстура является одним из регламентированных требований, предъявляемым к гафниевым пруткам, в данной работе изучали преимущественную ориентировку кристаллитов, формирующуюся при горячем прессовании гафния марки ГФЭ-1.

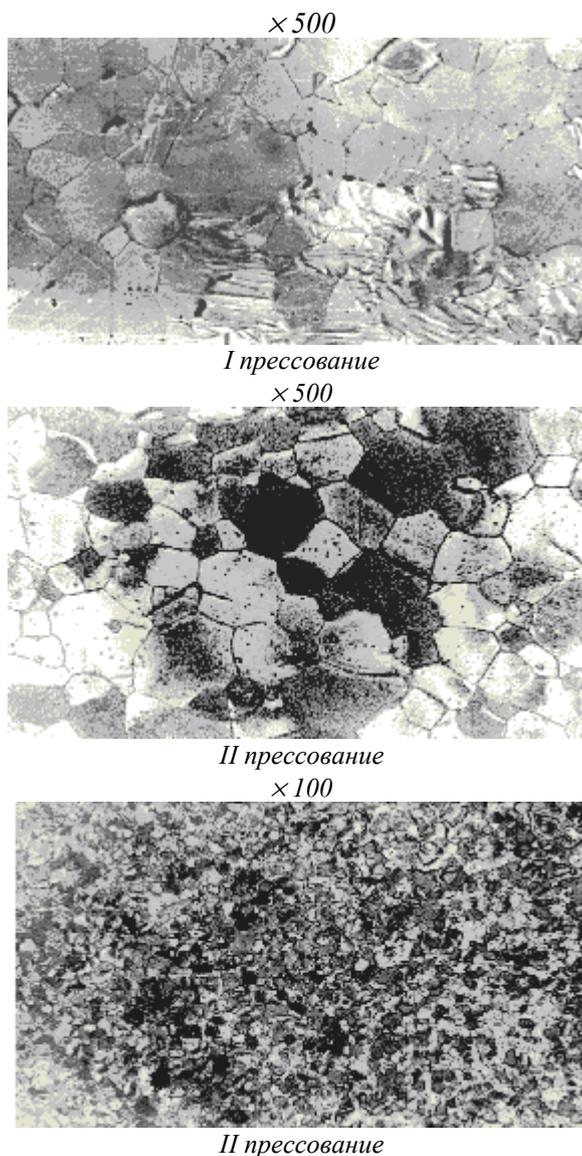


Рис. 3. Микроструктура прутка на разных стадиях передела

Механические свойства слитка при испытании на сжатие,  $T_{исп} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 

$D_0$ , мм.	$h_0$ , мм.	$\sigma_{\tau}^{сж}$ , МПа	$\sigma_{\epsilon}^{сж}$ , МПа	Уширение $\Delta F/F_0$ , %	$\delta$ , %	Примечания
9,47	11,4	54,5	152,0	27,7	28,2	обр. разр.
9,43	11,8	52,7	144,7	21,6	17,8	обр. не разр.

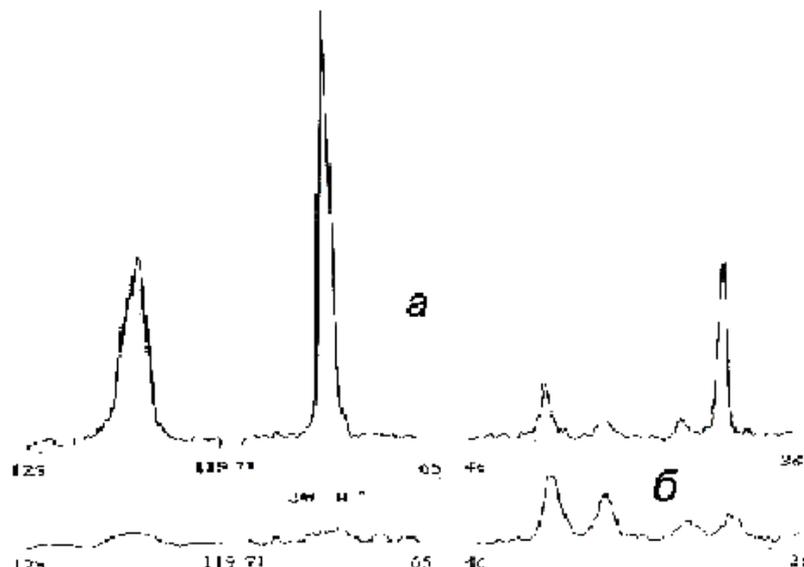


Рис. 4. Дифрактограммы гафния: горячепрессованного (а); напильного напильником (эталон с беспорядочной ориентировкой кристаллитов) (б)

Для исследования текстуры производили съемку дифрактограмм с торцевой плоскости цилиндрического образца прутка гафния на дифрактометре ДРОН-4 с фокусировкой по Бреггу-Брентано. Напряжение на рентгеновской трубке с кобальтовым анодом составляло 30 кВ, сила анодного тока 10 мА.

Скорость движения счетчика составляла один градус в минуту. На рис.4(а,б) приведены дифрактограммы, соответственно, горячепрессованного образца гафния и эталона (напильного напильником порошка гафния). Как видно из дифрактограммы (рис.4а) наибольшую интенсивность имеет дифракционный максимум (110), повышенную интенсивность на этом рисунке имеют также отражения (100) и (211). В долях интенсивности эталона интенсивность дифракционных максимумов (100), (110), (211) горячепрессованного гафния равна, соответственно, 6; 44; 21,25.

Таким образом, из дифрактограмм рис.4 следует, что текстуру горячепрессованного гафния можно трактовать, как аксиальную с тремя осями, которые совпадают с нормальными к плоскостям (100), (110), (211) гексагональной кристаллографической решетки гафния. Для определения индексов направления осей текстуры необходимо представить направление нормалей к плоскостям (100), (110), (211) в виде, принятом для гексагональной кристаллической решетки [3]. В то же время возможен вариант, когда повышенное количество кристаллитов гафния, ориентированных вдоль оси горячепрессованного прутка нормальными к плоскостям  $(10\bar{1}0)$ ,  $(11\bar{2}0)$ ,  $(21\bar{3}1)$  является

результатом рассеяния одной преимущественной ориентировки [4]. Весьма вероятно, что в горячепрессованном гафнии образуется аксиальная текстура с осью  $[11\bar{2}0]$ , параллельной оси прессования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В опытно-промышленных условиях по технологической схеме, разработанной в ГТИ, изготовлена первая опытная партия прутков из гафния. Проанализировано влияние технологических параметров производства на формирование структуры, механических свойств, текстуры. Представляется целесообразным для получения более высоких эксплуатационных свойств изделий использовать прессование в сочетании с холодной прокаткой и термической обработкой, позволяющих более гибко формировать определенные типы текстуры в гафнии.

## ЛИТЕРАТУРА

- В.Д. Рисованный и др. Гафний в ядерной технике. Димитровград, 1993, с. 140.
- С.С. Горелик. Рекристаллизация металлов и сплавов. Москва "Металлургия", 1978, с. 567.
- С.С. Горелик и др. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Приложения. М.: "Металлургия", 1970, с. 170.
- В.М. Ажажа, Д.Г. Малыжин, К.В. Ковтун, П.Н. Вьюгов. Изучение текстур выдавливания и рекристаллизации гафния // ВАНТ. Серия: ФРП и РФ. Вып. 3(69), 4(70), 1998, с. 80-81.