

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕКСТУРЫ ГАФНИЕВЫХ ПРУТКОВ В ПРОЦЕССЕ ДЕФОРМАЦИИ

*Н.М.Роевко, Г.И.Волокита, Э.А.Резниченко, В.П.Чернуха  
НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ, г. Харьков*

Вивчена зміна ступеню текстурованості і параметра анізотропії кованих прутків з гафнію марки ГФЭ-1 в залежності від температури і ступеню деформації. Показано, що із збільшенням ступеню деформації до 98,8 % в прутках посилюється аксиальна текстура (1010), а пониження температури деформації до кімнатної приводить до подальшого зростання текстури. Значення параметра анізотропії F меншає при зниженні температури кування і підвищенні ступеню обтиснення. Відпал у вакуумі 800°C x1,5 години надає до деякого ослаблення текстури і практично не впливає на параметр анізотропії кованих прутків.

Изучено изменение степени текстурованности и параметра анизотропии кованных прутков из гафния марки ГФЭ-1 в зависимости от температуры и степени деформации. Показано, что с увеличением степени деформации до 98,8 % в прутках усиливается аксиальная текстура (1010), а понижение температуры деформации до комнатной приводит к дальнейшему росту текстуры. Значение параметра анизотропии F уменьшается при снижении температурыковки и повышении степени обжатия. Отжиг в вакууме 800°C x1,5 ч приводит к некоторому ослаблению текстуры и практически не влияет на параметр анизотропии кованных прутков.

The change of texture degree and parameter of an anisotropy of forged bars from GFE-1 hafnium in temperature dependence and degrees of deformation is studied. With increase of degree of deformation up to 98,8 % in bars the axial texture (1010) is boosted, and the temperature fall of deformation up to room results in further growth of texture is shown. The option value of an anisotropy F decreases at decrease of temperature are ductile also increase of a degree of squeezing. The annealing in vacuum at 800°C during 1,5 hours results in some decrease of texture and practically does not influence parameter of an anisotropy of forged bars.

### Введение

Механические и эксплуатационные свойства гафниевых прутков, используемых в утяжеленных ПС СУЗ, во многом определяются их текстурой, которая, в свою очередь зависит, от способа, температуры и степени деформации, а также, в меньшей степени, от режимов отжига. Однако данные о текстуре прутков из гафния ограничены. В основном приводятся сведения для прокатанного йодидного гафния типа ГФИ-1 [1]. Показано, что при прокатке с обжатием до 78 % в полосах гафния формируется базисная текстура [0001] повернутая на 15...30° относительно оси сжатия. Текстура прокатки подобна текстуре осадки. Авторы объясняют это двойникованием в плоскостях (1122), (1121) и (1012), в которых гексагональные оси повернуты по отношению к оси сжатия, и скольжением по системам  $\{0001\} <1120>$  и  $\{10\bar{1}1\} <1120>$ . В работе [2] при исследовании текстуры прессованных с обжатием до 86% прутков из кальциетермического гафния авторы определили, что такие стержни обладают аксиальной (1010) текстурой, с усиливающейся с деформацией преимущественной ориентацией базисных плоскостей вдоль оси стержня, а при отжиге происходит переориентация зерен путем их поворота в базисной плоскости. Сведения о текстуре кованных прутков из слитков гафния марки ГФЭ-1 в литературе не обнаружены. Учитывая то, что технология изготовления гафниевых прутков ковкой может стать базовой на Украине, представляет интерес изучить влияние степени и температуры деформации

и отжига в вакууме на их текстуру. Для сравнения определяли текстуру прутков ГФЭ-1, полученных методом двойного прессования в ГТИ г. Днепрпетровск с такой же степенью деформации, но при несколько большей температуре.

### Материал и методика исследований

В качестве исходного материала для изучения текстуры использовали кованные при 950°C прутки диаметром 20 мм из гафния, кальциетермического восстановления двойного электронно-лучевого переплава. Ковку прутков проводили при разных температурах в диапазоне 20...950°C. Суммарная степень деформации достигала 98,8%. Обжатие за переход составляло 10...40% в зависимости от температуры и схемы деформации. Кроме кованных исследовали прессованные при 1000°C прутки, а также проволоочные при комнатной температуре на завершающем этапе деформации с суммарным обжатием до 30%, в деформированном и отожженном состоянии. Отжиг прутков проводили в вакууме  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па при 800°C в течение 1,5 ч.

Текстуру прутков изучали методом обратных полюсных фигур [3,4] на рентгеновской установке УРС-50 ИМ, укомплектованной счетно-регистрирующим устройством, в излучении  $\text{Cu K}_\alpha$  с никелевым фильтром. Съемку проводили на поперечных сечениях прутков (с торца). Образцы вырезали на электроискровом станке, шлифовали, а затем хими-

Для построения обратных полюсных фигур и расчета параметра анизотропии  $F$  использовали разработанную для гафния программу расчета на ПЭВМ [5]. Оценку склонности прутков к радиационному росту проводили исходя из значений параметра анизотропии.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис.1,а представлена обратная полюсная фигура исходного прутка, обладающего сравнительно слабой призматической текстурой. Радиальное обжатие прутка при  $950^{\circ}\text{C}$  с  $\varnothing 20$  мм до  $\varnothing 9$  мм с большой степенью обжатия за переход и проработкой металла по всему сечению прутка, несмотря на высокую температуру, формирует в нем довольно сильную аксиальную текстуру (см. рис.1,б). Плотность полюсов призматических плоскостей возрастает с 2,3 до 5,5 для плоскостей  $(10\bar{1}0)$  и в 1,5-2 раза для  $(11\bar{2}0)$  и  $(21\bar{3}0)$ , при этом плотность базисных полюсов  $(0002)$  снижается с 1,3 до 0,2.

В случае ротационнойковки при температурах  $(500\pm 150)^{\circ}\text{C}$ , как было замечено при металлографических исследованиях [6], деформация происходит большей частью в приповерхностных слоях, поэтому в целом призматическая текстура хоть и усиливается, но в меньшей степени, причем в результате плоскостей призмы I рода  $(10\bar{1}0)$  (см. рис.1,в), в которых плотность полюсов возрастает с 2,3 до 3,6.

Понижение температуры ротационнойковки до комнатной приводит к усилению тройной аксиальной текстуры (см. рис.1,г). Значительно возрастает плотность полюсов плоскостей  $(11\bar{2}0)$  и  $(21\bar{3}0)$ . Плотность полюсов  $(10\bar{1}0)$  также возрастает до 5,1, а базисных снижается больше, чем на порядок.

В результате дополнительной деформации прутков волочением при комнатной температуре (см. рис.2) происходит дальнейшее увеличение плотности полюсов плоскостей  $(10\bar{1}0)$  - до 7,7, в то время как для базисных и остальных призматических плоскостей она снижается (см. рис.2а). При отжиге несколько возрастает плотность полюсов плоскостей  $(21\bar{3}0)$  а в плоскостях  $(10\bar{1}0)$  ослабевает (см. рис.2,б).

Аналогичная картина наблюдается при отжиге кованных при  $500^{\circ}\text{C}$  прутков (см. рис.3). Плотность полюсов призматических плоскостей  $(10\bar{1}0)$  и  $(11\bar{2}0)$  уменьшается, соответственно, с 3,6 и 1,6 (см. рис. 1,в) до 2,9 и 1,4 (см. рис. 3). Плотность базисных полюсов также снижается, тогда как для плоскостей  $(21\bar{3}0)$  она возрастает почти в 3 раза. В целом во всех прутках отжиг приводит к некоторому ослаблению текстуры в плоскостях  $(10\bar{1}0)$  и  $(0002)$  и изменению кристаллографической ориентации  $(10\bar{1}0)$  на  $(11\bar{2}0)$  и  $(21\bar{3}0)$ . Подобная переориентация также наблюдалась в случае снижения температурыковки, тогда как в прессованных прутках

уже изначально формируется такая текстура. Это проиллюстрировано на рис.4, где для сравнения представлены обратные полюсные фигуры ковального (см. рис.4,а), проволоченного послековки (см. рис.4,б) и горячепрессованного (см. рис. 4,в) прутков в неотожженном состоянии. Видно, что в прутках, полученных двойным прессованием при температурах  $1000\text{...}1150^{\circ}\text{C}$  также формируется тройная аксиальная текстура. Однако в этом случае зерна ориентированы таким образом, что уже в деформированном прутке наиболее сильно выражены преимущественные ориентации плоскостей  $(11\bar{2}0)$  с осью  $(110)$  - 12,5 и  $(21\bar{3}0)$  с осью  $(100)$ , плотность полюсов плоскостей  $(10\bar{1}0)$  гораздо ниже и составляет 1,7. Оси всех указанных семейств плоскостей ориентированы вдоль направления прессования.

Вообще по характеру текстуры можно с определенной степенью уверенности судить о том, какая схема деформации прутков применялась на последних этапах. На наш взгляд, приведенные в работе [2] обратные полюсные фигуры не совсем типичные для выдавленных прутков. Это возможно связано с особенностями их получения и методикой исследований.

Считается, что с точки зрения радиационного роста для ПС СУЗ наиболее подходящими являются бестекстурные или слаботекстурированные прутки из гафния. Определение индекса роста для гафниевых прутков нам представляется не совсем корректным, так как в литературе отсутствуют исходные данные о радиационном росте монокристаллов гафния. Более объективную оценку склонности прутков к радиационному росту можно дать, определив параметр анизотропии  $F$ . Для изотропных прутков он принимается равным 0,33. В таблице приведены значения параметра  $F$  для прутков, деформированных по отличающимся схемам с разной степенью деформации и при разных температурах. При увеличении степени обжатия (ковка с  $\varnothing 20$  мм до  $\varnothing 9,5$  мм при  $950^{\circ}\text{C}$ ) значения параметра  $F$  уменьшаются с 0,31 до 0,13...0,14, а при снижении температуры деформации до комнатной, его величина падает до 0,07. Общей тенденцией является усиление анизотропии прутков с увеличением степени обжатия и с понижением температуры. Однако при этом существенное влияние оказывает также технологическая схема деформации. В частности, в прессованных при высокой температуре ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) прутках параметр анизотропии имеет очень низкое значение 0,04, и, наоборот, в прутках кованных по доработанной схеме, почти при комнатной температуре ( $\sim 150^{\circ}\text{C}$ ), значение  $F$  составляет 0,28, что очень близко к изотропному состоянию. Отжиг в вакууме практически не влияет на величину параметров анизотропии. Как видно из приведенных экспериментальных данных, они могут незначительно меняться как в большую, так и в меньшую сторону.

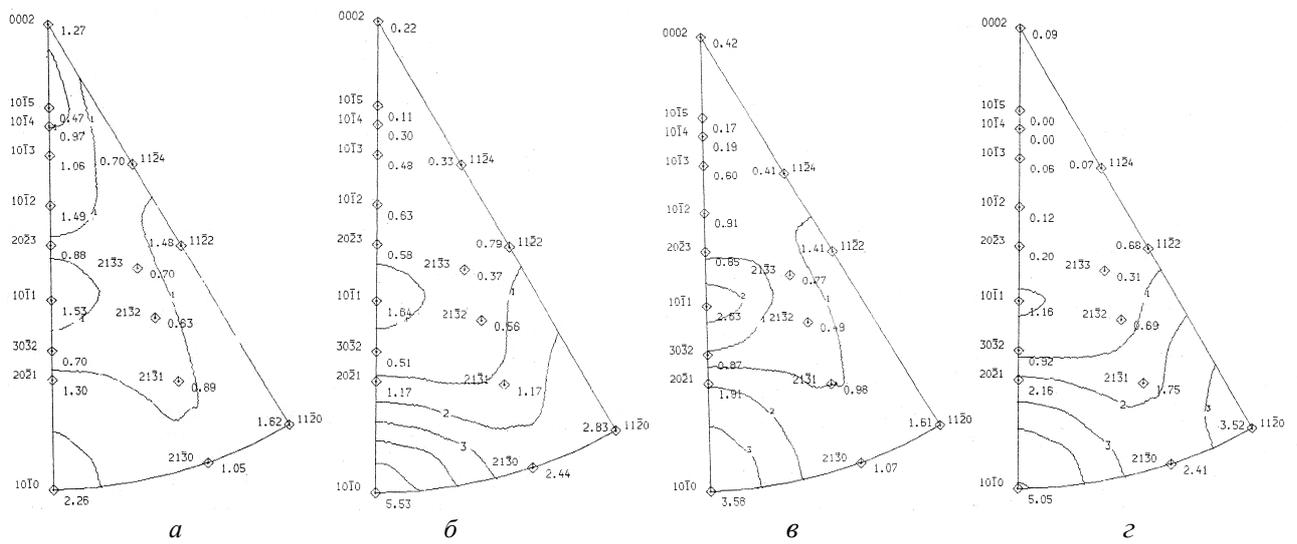


Рис.1. Эволюция текстуры кованных прутков из гафния ГФЭ-1 с деформацией и температурой

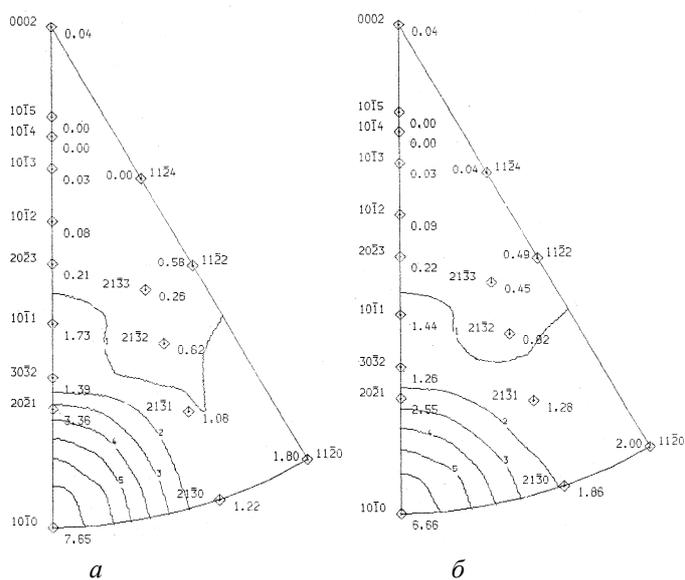


Рис.2. Текстура прутков ГФЭ-1:  
а – ковка + волочение; б – ковка + волочение + отжиг

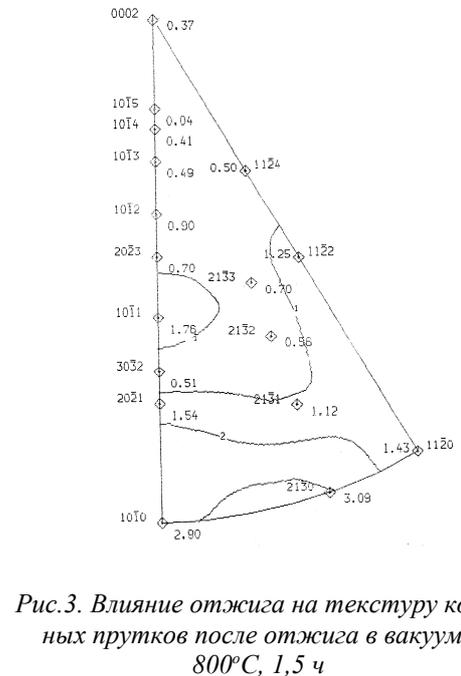


Рис.3. Влияние отжига на текстуру кованных прутков после отжига в вакууме 800°C, 1,5 ч

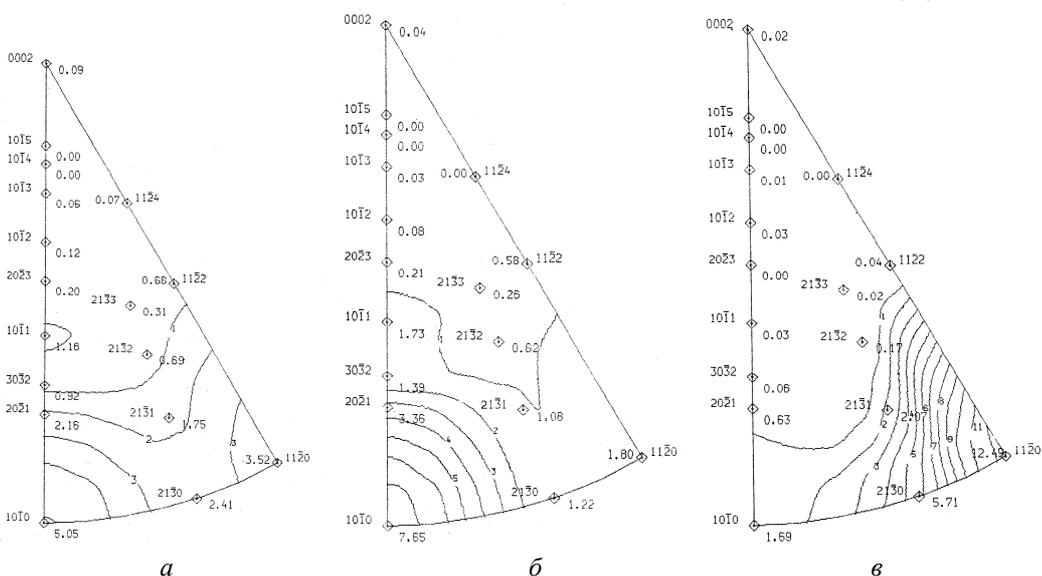


Рис.4. Типичные полюсные фигуры для разных видов деформации:  
а - ковка; б - ковка + волочение; в - горячее прессование

### Изменение параметра анизотропии F прутков ГФЭ-1 с температурой и деформацией

Диаметр прутка, мм	Состояние прутка	Температура деформации, °С			
		950	500	150	20
20	деформир. ковкой	0,31	Фисх.=0,31	Фисх.=0,31	-
14,5	деформир. ковкой	0,14	-	-	Фисх.=0,14
9,5	деформир. ковкой	0,13	0,23	0,15	0,07
	отожжен.	-	0,2/0,43*	0,17	0,08
8,5	деформир. волоч. с Ø 9,5 мм	-	-	-	0,07
	отожжен.	-	-	-	0,08/0,47*
8,5	деформир. ковкой	-	-	0,27(Фисх.=0,31)	-
	отожжен.	-	-	0,28	-
8,5	деформир. прессов. при 1000°С	0,04	-	-	-

Примечание. Звездочками в таблице отмечены значения F, определяемые при съемке в радиальном направлении

#### Заключение

В результате исследований текстуры получены сведения, имеющие важное практическое значение. Показана возможность изменения степени и вида преимущественной ориентации в прутках и параметра анизотропии в достаточно широких пределах. Изменяя температуру и схему деформации, можно добиваться формирования более сильной или более слабой текстурированности прутков, а также кристаллографической переориентации зерен с ориентации  $(10 \bar{1} 0)$  на  $(11 \bar{2} 0)$  и  $(21 \bar{3} 0)$ . Подтверждением этому являются прутки, полученные по откорректированной на основании результатов исследований схеме. Это прутки диаметром 8,5 мм, у которых величина параметра F близка к значению, характерному для изотропного состояния. Исходя из общих соображений и утверждений исследователей йодидного гафния [3], можно предполагать, что из всех полученных в настоящей работе опытных партий прутки со значением параметра анизотропии 0,28 будут менее подвержены радиационному росту по сравнению с прутками, полученными по иным режимам и обладающими другими параметрами Кернса. Однако окончательные выводы можно будет сделать только после проведения испытаний стержней в реакторных условиях.

Общей тенденцией для кованных прутков является формирование в них тройной аксиальной тексту-

ры, при которой плоскости базиса расположены вдоль оси прутков

Отжиг в вакууме 800°С x1,5 ч приводит к некоторой переориентации кристаллитов, ослаблению текстуры  $(10 \bar{1} 0)$  и практически не влияет на параметр анизотропии кованных прутков.

#### Литература

1. В.Д. Рисованный, Е.П.Клочков, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград, НИИАР, 1993, 143 с.
2. В.М. Ажажа, Д.Г. Малыхин, К.В. Ковтун и др. Изучение текстур выдавливания и рекристаллизации гафния // *ВАНТ. Серия ФРИП и РМ*. 1999, вып.3(69), 4(70), с. 80-81.
3. G.V. Harris // *Phylos. Mag.* 1952, vol. 43. p. 113.
4. P.R. Morris I. *Appl Phys.* 1959, vol. 30. p. 595.
5. М.И.Агеев, В.П. Алик, Ю.И. Марков. *Библиотека алгоритмов*. М.: Советское радио, 1976, вып.2. с 516-1006.
6. Г.И. Волокита, Э.А. Резниченко, В.П. Чернуха. Свойства гафниевых прутков, полученных методомковки // *Тр. конф. «Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике»*. Алушта, Крым, 14 июня 1999г., с.61.