

С. А. МИНАЕВА, П. Б. БУДБЕРГ

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ $\text{Hf} - \text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$

(Представлено академиком А. А. Бочваром 4 XI 1975)

За последние годы наметилась четкая тенденция к расширению исследования сплавов с ванадием и гафнием в качестве материалов, обладающих особыми физическими свойствами. В связи с этим установление особенностей взаимодействия указанных металлов с другими элементами в ряде двойных и тройных систем представляет определенный не только научный, но и практический интерес.

В настоящей работе исследовано фазовое состояние части системы ванадий — гафний — хром в области сплавов, богатых гафнием и ограниченной разрезом $\text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$. Подробный анализ имеющихся в литературе сведений по диаграммам состояния систем гафний — ванадий и гафний — хром проведен в работе ⁽¹⁾. Обе системы эвтектического типа, в которых образуются конгруэнтно плавящиеся соединения HfCr_2 и HfV_2 — фазы Лавеса. Температуры плавления последних составляют 1810 и 1550° соответственно.

Строение исследуемой диаграммы состояния тройной системы определяется характером взаимодействия между указанными фазами. Соединение HfV_2 мономорфно, не претерпевает никаких фазовых превращений от температуры плавления до комнатной и обладает структурой типа $\text{MgCu}_2(\lambda_2)$. У соединения HfCr_2 при понижении температуры наблюдаются два полиморфных превращения, связанных со сменой структурных типов в последовательности $\text{MgZn}_2(\lambda_1) \rightarrow \text{MgNi}_2(\lambda_3) \rightarrow \text{MgCu}_2(\lambda_2)$. В предыдущих исследованиях ⁽²⁾ нами были установлены температуры указанных превращений и показано, что разрез $\text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$ является квазибинарным, перитектического типа. В сплавах разреза кристаллизуются две перитектики: фаза λ_3 образуется при 1750° и 22,5 ат. % V; фаза λ_2 — при 1680° и 37,5 ат. % V. Квазибинарность разреза $\text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$ позволила выделить из системы V—Hf—Cr две частные системы: $\text{Hf} - \text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$ и $\text{V} - \text{Cr} - \text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$ и провести их как самостоятельное, так и совместное изучение. Эти данные в виде восьми изотермических разрезов системы ванадий — гафний — хром в интервале 1900—1100° ⁽²⁾ позволили установить схему моно- и невариантных равновесий и представить пространственное изображение системы $\text{Hf} - \text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$, что сделано в настоящей работе, рис. 1.

Ликвидус системы состоит из четырех поверхностей первичной кристаллизации твердых растворов на основе β -гафния (поверхность $Ae_1'P_1'P_2'e_2'A$) и интерметаллических фаз: $\lambda_1(Bn_1'P_1'e_1'B)$, $\lambda_3(n_1'P_1'P_2' \cdot n_2'n_4')$ и $\lambda_2(Cn_2'P_2'e_2'C)$. Перечисленные поверхности в пространстве пересекаются по пяти моновариантным кривым двойного насыщения. Кривые $n_1'P_1'$ и $n_2'P_2'$ — линии двойных перитектических реакций $ж + \lambda_1 \rightleftharpoons \lambda_3$ и $ж + \lambda_3 \rightleftharpoons \lambda_2$, переходящих из системы $\text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$ в тройную; $e_1'P_1'$, $P_1'P_2'$ и $P_2'e_2'$ — кривые кристаллизации двойных эвтектик $\beta_{\text{Hf}} + \lambda_1$, $\beta_{\text{Hf}} + \lambda_3$ и $\beta_{\text{Hf}} + \lambda_2$ в тройной системе. В сплавах системы протекают четыре невариантных превращения II класса (эвтектико-перитектического типа), в двух из которых, при 1505 и 1500° участвует жидкая фаза. К плоскости первого из этих превращений подходят два трехфазных равновесия; перитектическое $ж + \lambda_1 \rightleftharpoons \lambda_3$ со стороны системы $\text{HfCr}_2 - \text{HfV}_2$ и эвтектическое

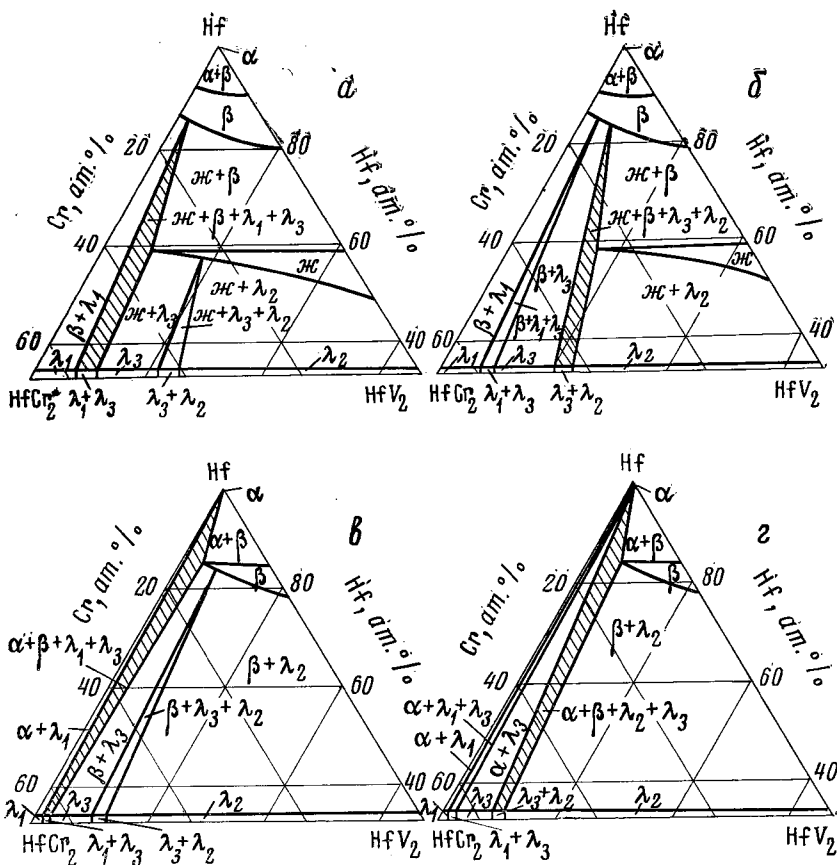


Рис. 2. Нонвариантные равновесия в системе Hf—HfCr₂—HfV₂ при 1505° (а), 1500° (б), 1380° (в) и 1360° (г)

$\text{ж} \rightleftharpoons \beta + \lambda_1$ со стороны системы гафний — хром. При $\sim 1505^\circ \text{C}$ протекает реакция $\text{ж} + \lambda_1 \rightleftharpoons \beta + \lambda_2$ (рис. 2а). Точка P_1' на пространственной диаграмме отвечает температуре равновесия, которое изображается горизонтальным четырехугольником $abP_1'g$ (рис. 1а). При понижении температуры от нонвариантного равновесия отходят два трехфазных: $\lambda_1 + \beta + \lambda_3$ и $\beta + \lambda_3 + \text{ж}$. Последнее с перитектическим равновесием $\text{ж} + \lambda_3 \rightleftharpoons \lambda_2$ в системе HfCr₂—HfV₂ приводит ко второму нонвариантному равновесию $\text{ж} + \lambda_3 \rightleftharpoons \beta + \lambda_2$ при $\sim 1500^\circ$, рис. 2б, (четыреугольник $cdP_2'f$ на рис. 1а). От этого равновесия отходит трехфазная область $\text{ж} + \beta + \lambda_2$, которая переходит в двойную систему Hf—HfV₂. В сплавах этой системы при 1450° протекает реакция $\text{ж} \rightleftharpoons \beta_{\text{Hf}} + \lambda_2$. Таким образом, все моновариантные трехфазные превращения, содержащие жидкую фазу и связанные с указанными нонвариантными, реализуются в интервале температур 1750 — 1450° .

Два других нонвариантных равновесия обусловлены полиморфным $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращением гафния при 1760° и протекают в результате твердофазных взаимодействий. Трехфазное равновесие $\lambda_1 + \beta + \lambda_3$, отходящее от нонвариантного при температуре $< 1505^\circ$, и равновесие $\beta + \alpha + \lambda_1$, образующееся в тройных сплавах в результате эвтектидной реакции $\beta \rightleftharpoons \alpha + \lambda_1$ ниже 1390° , приводят к новой четырехфазной реакции $\beta + \lambda_1 \rightleftharpoons \alpha + \lambda_3$ при $\sim 1380^\circ$, рис. 2в (четыреугольник a_1b_1kh на рис. 1а). Равновесие $\lambda_1 + \alpha + \lambda_3$, отходящее от четырехфазного при понижении температуры, заканчивается в двойной системе гафний — хром на горизонтали 1350° , которая отвечает вырожденной эвтектидной реакции $\lambda_1 \rightleftharpoons \alpha + \lambda_2$. Трехфазные равнове-

Таблица 1

Равновесие	Фаза	Состав, ат.%			Равновесие	Фаза	Состав, ат.%		
		Hf	Cr	V			Hf	Cr	V
$\text{ж} + \lambda_1 \rightleftharpoons \beta + \lambda_3$ ~1505° С	ж	59,0	32,5	8,5	$\beta + \lambda_1 \rightleftharpoons \alpha + \lambda_3$ ~1380° С	α	99,0	0,2	0,8
	β	86,0	12,2	1,8		β	85,0	11,0	4,0
	λ_1	34,0	58,0	8,0		λ_1	34,0	65,0	1,0
	λ_3	34,0	54,4	11,6		λ_3	34,0	63,5	2,5
$\text{ж} + \lambda_3 \rightleftharpoons \beta + \lambda_2$ ~1500° С	ж	58,0	26,0	16,0	$\beta + \lambda_3 \rightleftharpoons \alpha + \lambda_2$ ~1360° С	α	99,0	0,7	0,3
	β	83,5	10,8	5,7		β	84,5	9,8	5,7
	λ_3	33,8	46,2	20,0		λ_3	34,0	57,6	8,4
	λ_2	33,8	43,2	23,0		λ_2	34,0	56,0	10,0

сия $\lambda_3 + \beta + \lambda_2$ и $\alpha + \lambda_3 + \beta$, берущие начало от невариантных превращений при 1500 и 1380° соответственно, приводят к появлению в сплавах системы еще одного невариантного превращения $\beta + \lambda_3 \rightleftharpoons \alpha + \lambda_2$ при ~1360°, рис. 2г (четыреугольник $c_1 d_1 m l$ на рис. 1а). Горизонтальные четырехугольники, которые отвечают невариантным равновесиям $\beta + \lambda_1 + \alpha + \lambda_3$ и $\beta + \lambda_3 + \alpha + \lambda_2$, представляют собой узкие концентрационные области, которые пересекают всю систему от гафния до стороны $\text{HfCr}_2\text{—HfV}_2$. Последнее обстоятельство связано с очень незначительными растворимостями α -гафния и фаз Лавеса друг в друге. Фазы Лавеса вообще характеризуются небольшими областями гомогенности в соответствующих двойных системах и эти области, как правило, не расширяются при добавлении третьего компонента.

Ниже плоскости последнего невариантного превращения в системе существуют два трехфазных равновесия: $\lambda_3 + \alpha + \lambda_2$ и $\alpha + \lambda_2 + \beta$, первое из которых завершается перитектоидным превращением в системе гафний — хром (1200°), второе — эвтектоидным в системе гафний — ванадий (1140°).

От каждого из невариантных равновесий помимо трехфазных областей отходит по одной двухфазной, которая участвует в дальнейших реакциях (рис. 1б). Концентрационные пределы двухфазной области $\alpha + \lambda_2$, отходящей от последнего четырехфазного равновесия, расширяются по мере понижения температуры. Фазовое состояние сплавов системы $\text{Hf—HfCr}_2\text{—HfV}_2$ на изотермическом разрезе при 800° С, лежащем в основании пространственной диаграммы (рис. 1), представлено очень широкой двухфазной областью $\alpha + \lambda_2$ и узкими областями α и λ_2 . На этот же разрез нанесены проекции поверхностей ликвидус.

Составы фаз, участвующих в невариантных превращениях, приведены в табл. 1.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
25 X 1975

ЛИТЕРАТУРА

¹ С. А. Минаева, П. Б. Будберг, Сб.: Структура фаз, фазовые превращения и диаграммы состояния металлических систем, М., «Наука», 1974, стр. 153. ² С. А. Минаева, П. Б. Будберг, Металлы, № 3, 213 (1975).