

УДК 669.297 : 001.53

## ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ДИАГРАММАХ СОСТОЯНИЯ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ГАФНИЯ

© 2013 г. В.В. Бринза, Н.В. Нестерова, О.Н. Перк

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва  
Высокотехнологический научно-исследовательский институт  
неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара (ВНИИНМ), г. Москва

Рассмотрены перспективы применения принципа аналогии при изучении бинарных соединений гафния. С использованием таксонометрического подхода разработана классификация востребованных инновационной практикой бинарных соединений гафния по основным отличительным признакам их диаграмм состояния. Выделены 7 однородных групп рассматриваемых соединений и определены отличительные особенности диаграмм состояния, включенных в каждую из них. Обоснована рациональность двумерной метрики, применение которой обеспечивает получение количественных оценок близости различных диаграмм и выявляет соединения-аналоги. Результаты классификации могут быть востребованы при обосновании составов ряда базовых гафниевых сплавов и лигатур.

**Ключевые слова:** гафний, бинарные соединения, двойные диаграммы состояния, классификация, таксонометрия, аналог, перспективные сплавы.

Prospects of the analogy principle application in investigating hafnium binary compounds have been considered. Using the taxon approach, the classification of promising hafnium binary compounds by the main distinctive features of their phase diagrams has been developed. Seven homogeneous groups of compounds are selected. Distinctive features of phase diagrams included in each of these homogeneous groups are determined. The efficiency of two-dimensional metric, the application of which provides the quantitative evaluation of different diagrams proximity and reveals compound-analogs, is substantiated. The results of the classification can be used in justifying the compositions of a number of basic hafnium alloys and foundry alloys.

**Key words:** hafnium, binary compounds, binary phase diagrams, classification, taxon, analog, promising alloys.

Актуальные потребности технического прогресса стимулируют развитие технологической базы производства инновационных видов продукции, к которым в полной мере могут быть отнесены гафний, а также сплавы на его основе и Hf-содержащие композиции. Данные материалы в последнее время являются предметом все большего внимания разработчиков атомной и аэрокосмической техники, проектировщиков новых изделий микроэлектроники, специалистов в областях турбостроения, нефтяной, химической промышленности, судостроения и ряда других ключевых отраслей промышленности. Это объясняется уникальным комплексом свойств, присущих данному химическому элементу [1]. Оцениваемые в настоящее время мировые запасы гафния (в пересчете на его диоксид) превышают 1 млн т, что дает основание ожидать в ближайшие

годы дальнейшего увеличения его востребованности в перечисленных выше и ряде других областей техники, определяющих стратегические преимущества стран-производителей Hf-содержащей продукции.

Однако исследования и разработки по тематике производства и применения гафния являются достаточно затратными. Основная причина этого — высокая стоимость его получения, как правило, в ходе переработки циркониевых концентратов, содержащих его оксиды как сопутствующие компоненты. Кроме того, особые требования, которые обусловлены свойствами Hf и прежде всего высокой температурой плавления (2231 °С), а также его активным взаимодействием при горячей обработке с атмосферными газами, предъявляются к экспериментальной и опытно-промышленной базе. Не

**Бринза В.В.** – докт. техн. наук, директор НИЦ ТП НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4).  
Тел.: (495) 959-48-12. E-mail: brinzavv@misis.ru.

**Перк О.Н.** – науч. сотр. НИЦ ТП НИТУ «МИСиС». Тел.: (495) 959-47-05. E-mail: ppdu@misis.ru.

**Нестерова Н.В.** – начальник лаборатории отдела разработки технологий циркониевых сплавов, изделий и материалов ТВС тепловых реакторов ВНИИНМ (123098 г. Москва, ул. Погова, 5а). E-mail: working@bochvar.ru.

случайно известные исследования механических и эксплуатационных свойств гафния и его сплавов содержат результаты, характеризующие особенности влияния на них лишь единичных факторов и в пределах относительно узких диапазонов их варьирования. В этой связи востребованными должны быть работы, направленные на снижение затрат при получении новой информации, способствующей как определению новых конкурентоспособных соединений, содержащих гафний, так и расширению сфер применения известных его композиций.

Цель настоящей работы заключается в выявлении перспектив применения принципа аналогии к недостаточно изученным двойным системам, образуемым гафнием с рядом других элементов, за счет обоснования возможности переноса по отношению к ним известной информации о более детально изученных системах. Аргументированное привлечение известных данных к различным стадиям исследований и разработок перспективных материалов может существенно снизить требуемые трудозатраты на их реализацию. Преимущества подобного подхода при определении комплекса свойств новых неорганических соединений продемонстрированы, например, в [2].

В настоящей работе в качестве исходной информационной основы для множественной оценки близости различных двойных систем гафния привлечена совокупность их двойных диаграмм состояния, которые являются общепринятой информационной базой для проектирования рациональных условий выплавки и анализа процессов формирования и трансформации структуры соединений, состоящих из двух компонентов [3]. В свою очередь, формируемые структурные особенности данных соединений в значительной степени ответственны за уровень их механических характеристик при термической обработке, а также за величину комплекса показателей при эксплуатации готовых изделий. Важно, что результаты варьирования состава соединений и температурных условий обработки, вызывающие изменение их состояния, находят адекватное графическое отображение в диаграммах состояния соответствующих двойных систем. Именно поэтому определение аналогов для недостаточно изученных соединений гафния может быть осуществлено путем выделения однородных групп соединений из всей рассматриваемой их совокупности в процессе классификации емкой информации, содержащейся в соответствующих диаграммах состояния.

Классифицирование диаграмм состояния вследствие значительного объема объединяемых ими разноплановых сведений представляется достаточно сложной многофакторной задачей, так как до настоящего времени не предложено какого-либо одного признака, на основе которого можно было бы провести исчерпывающую группировку двойных систем и графическое отображение совокупности их состояний [4]. Поэтому на практике систематизацию двухкомпонентных соединений, в том числе рассматриваемых в настоящей работе, зачастую ограничивают информацией, содержащейся в пределах отдельных (как правило, начальных) участков диаграмм, что позволяет минимизировать число учитываемых признаков диаграмм состояния (например, [5–7]).

В рамках альтернативного, более общего подхода выделяют универсальные признаки диаграмм при всех основных сочетаниях компонентов, сгруппированные в иерархическом порядке. Пример подобной обобщенной классификации представлен в работе [4]. Как в первом, так и во втором подходах информация об отличительных особенностях различных диаграмм интерпретируется в описательном виде. Однако многоплановость, наличие нелинейного характера процессов формирования структуры двухкомпонентных сплавов и лигатур, одним из компонентов которых является гафний, на фоне требования к их однозначному содержательному представлению обуславливают необходимость представления всех основных особенностей диаграмм состояния сопоставляемых двойных систем в количественном виде.

Реализация количественного подхода при классификации диаграмм состояния двойных систем дает возможность использовать процедуры компьютерной обработки информации, что снимает ограничение на перечень привлекаемых к анализу признаков, характеризующих особенности каждой диаграммы. Предварительное рассмотрение различных диаграмм состояния, включающих в качестве одного из компонентов гафний, показало наличие для них ряда особенностей. Они касаются степени локализации расположения областей существования  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз Hf (или  $\beta$ -фаз гафния с другим элементом) в пределах сравниваемых диаграмм, температур плавления различных составов, числа образуемых эвтектик, количества промежуточных соединений и др. Данные особенности, как показал анализ, могут быть сведены к 8 количественным признакам:

Z1 — максимальная протяженность области существования  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы на диаграмме состояния при изменении содержания в сплаве второго компонента, ат.%;

Z2 — максимальная протяженность области существования  $\beta_{(Hf)}$ -фазы на диаграмме состояния при изменении содержания в сплаве второго компонента, ат.%;

Z3 — температура (°C), соответствующая максимальной протяженности области существования  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы при изменении содержания в сплаве второго компонента;

Z4 — температура (°C), соответствующая максимальной протяженности области существования  $\beta_{(Hf)}$ -фазы при изменении содержания в сплаве второго компонента;

Z5 — максимальная температура плавления в системе, °C;

Z6 — количество эвтектик в пределах двойной диаграммы состояния системы;

Z7 — общее число промежуточных соединений, образующихся при распаде твердого раствора при изменении содержания в системе другого компонента, шт.;

Z8 — количество промежуточных соединений, существующих в твердом растворе только при высоких температурах, шт.

Значения данных признаков конкретизировали на основе анализа диаграмм состояния двойных систем гафния с цирконием и титаном, а также с рядом других элементов (Ta, Ni, Cr, Al, Cu, Nb, Mn, Co, Mo, W, C, O, H, N), образующих с ним, по литературным данным, наиболее перспективные с позиций применения в инновационных отраслях

экономики базовые соединения. Информацию о содержательных особенностях диаграмм получали по большей части, используя справочник [8], при необходимости уточняя значения отдельных признаков по данным, представленным в более поздних экспериментальных работах.

Как показали результаты сопоставления, значения отличительных признаков для различных диаграмм состояния варьируются в широких пределах: Z1 = 0,5÷100,0 %, Z2 = 1,0÷100,0 %, Z3 = 720÷2218 °C, Z4 = 1250÷2300 °C, Z5 = 2231÷3950 °C, Z6 = 0÷4; Z7 = 0÷10; Z8 = 0÷3. Информативность перечисленных признаков оценивали с использованием корреляционного анализа. Получено, что только 6 пар этих величин из 28 частично дублируют друг друга с учетом того, что критический коэффициент корреляции для  $N - 2 = 14$  степеней свободы (где  $N$  — число сопоставляемых диаграмм состояния двойных систем, одним из компонентов которых является гафний) равен 0,497 (см. таблицу).

При этом расчеты коэффициентов детерминации для закоррелированных признаков характеризуют частичную взаимозависимость изменения, составляющую 31,4—67,2 % от общей вариации в пределах рассматриваемой выборки их значений. Данный факт наряду с протяженными интервалами изменения признаков свидетельствует о достаточной информативности каждого из них, а значит и о целесообразности привлечения всего перечня величин Z1—Z8 для классификации диаграмм состояния двойных систем.

В данной работе процедура классификации выполнена, исходя из предположения о равных степенях влияния каждого из признаков на интегральные

**Матрица корреляций между основными признаками диаграмм состояния двойных систем гафния**

Признак	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Z1	1	<b>0,562</b>	-0,249	0,046	-0,167	-0,304	-0,289	-0,228
Z2	<b>0,562</b>	1	-0,357	0,159	-0,151	-0,493	-0,487	-0,420
Z3	-0,249	-0,357	1	<b>0,560</b>	<b>0,630</b>	0,295	0,148	0,219
Z4	0,046	0,159	<b>0,560</b>	1	<b>0,662</b>	-0,476	-0,394	-0,054
Z5	-0,167	-0,151	<b>0,630</b>	<b>0,662</b>	1	-0,123	-0,315	-0,239
Z6	-0,304	-0,493	0,295	-0,476	-0,123	1	<b>0,825</b>	0,418
Z7	-0,289	-0,487	0,148	-0,394	-0,315	<b>0,825</b>	1	<b>0,763</b>
Z8	-0,228	-0,420	0,219	-0,054	-0,239	0,418	<b>0,763</b>	1

характеристики близости различных диаграмм. Для этого осуществляли нормирование значений признаков, приводя их к интервалу от 0,0 до 1,0. Однако это предположение не является жестким, и при необходимости подобные оценки близости диаграмм состояния могут быть получены для различных сочетаний приоритетов каждого из признаков Z1—Z8.

Основным методическим инструментом для многомерной классификации с учетом требований наглядности представления результатов, их композиционности и однозначности выделения однородных групп диаграмм состояния целесообразно использовать метод таксонометрии. Это подтвердили ранее проведенные исследования по близкой тематике [9]. В рамках данного подхода компьютерная классификация выделенных групп двойных диаграмм состояния в 8-мерном нормированном пространстве признаков  $Z_j$  ( $j = 1\div 8$ ) осуществима путем определения степени близости их значений при переборе всех пар диаграмм. Величину показателя близости между различными диаграммами состояния для каждой пары их сочетаний (по терминологии таксонометрических методов — элемента матрицы расстояний) вычисляли по формуле

$$C_{kl} = \sum_{j=1}^8 |Z_{jk}^h - Z_{jl}^h|,$$

где индексы  $k$  и  $l$  — обозначают порядковые номера сопоставляемых диаграмм в каждой их паре;  $C_{kl}$  — элемент матрицы расстояний.

Определение всех элементов матрицы расстояний дало возможность осуществить их группировку по принципу формирования групп элементов, имеющих между собой минимальное расстояние в 8-мерном пространстве признаков. Эту процедуру реализовывали с использованием рекомендаций работы [10]. Для большей наглядности графическое отображение элементов классификационной матрицы расстояний производили исходя из следующего их ранжирования:

	— совпадение признаков ( $C_{kl} = 0,00\div 0,20$ )
	— количественное соответствие признаков ( $C_{kl} = 0,21\div 0,30$ )
	— качественная близость значительной доли признаков ( $C_{kl} = 0,31\div 0,40$ )
	— отсутствие сходства для большинства сравниваемых признаков ( $C_{kl} = 0,41\div 0,50$ )
	— наличие множественных различий в значениях признаков ( $C_{kl} \leq 0,51$ )

В ходе упорядочивания элементов матрицы расстояний между 16 диаграммами состояния двойных систем, одним из компонентов которых является гафний, получено, что они наилучшим образом классифицируются на семь однородных групп:

- а) Hf—Ti, Hf—Zr;
- б) Hf—Nb, Hf—Ta;
- в) Hf—Mo, Hf—W, Hf—H;
- г) Hf—Mn, Hf—Cr, Hf—Cu;
- д) Hf—Co, Hf—Ni;
- е) Hf—Al;
- ж) Hf—O, Hf—N, Hf—C.

Для диаграмм в пределах каждой из них отмечается совпадение значений классифицирующих признаков за единственным исключением (группа «ж»), что представлено на рис. 1. При этом получено, что диаграммы состояния систем гафния с титаном и цирконием, отнесенные к группе «а», имеют следующие полностью идентичные признаки: максимальную протяженность  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы ( $Z1 = 100\%$ ), значение максимальной температуры плавления в системе ( $Z5 = 2231\text{ }^\circ\text{C}$ ), отсутствие эвтектик ( $Z6 = 0$ ), а также отсутствие во всем диапазоне температур промежуточных соединений в системе ( $Z7 = 0, Z8 = 0$ ). Диаграммы группы «б» характеризуются, наряду с отсутствием эвтектик и промежуточных соединений ( $Z6 = 0, Z7 = 0, Z8 = 0$ ), совпадением максимальной протяженности  $\beta_{(Hf)}$ -фазы (признак  $Z2 = 100\%$ ). Отличительными признаками группы

	Ti	Zr	Nb	Ta	Mo	W	H	Mn	Cr	Cu	Co	Ni	Al	O	N	C
Ti																
Zr																
Nb																
Ta																
Mo																
W																
H																
Mn																
Cr																
Cu																
Co																
Ni																
Al																
O																
N																
C																

Рис. 1. Результаты таксонометрической классификации диаграмм состояния двойных систем гафния

Сплошными линиями выделены группы диаграмм-аналогов, штриховыми — комплексы диаграмм, имеющих количественные соответствия

диаграмм «в» являлись малая протяженность зоны с  $\alpha_{(Hf)}$ -фазой ( $Z1 = 2,0 \div 5,0 \%$ ), а также единичное число промежуточных соединений ( $Z7 = 1 \div 2$ ).

Диаграммы, включенные в группу «г», прежде всего отличаются от других наличием эвтектик ( $Z6 = 1 \div 3$ ) и средним для всей выборки диаграмм числом промежуточных соединений ( $Z7 = 2 \div 5$ ). Отличительными значениями признаков диаграмм состояния группы «д», наряду с наименьшей протяженностью  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы ( $Z1 = 1,0 \%$ ) и умеренной температурой, соответствующей максимальной протяженности  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы по температурной шкале ( $Z3 = 1150 \div 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), отмечены наличие трех эвтектик ( $Z6 = 3$ ), а также наибольшее число промежуточных соединений ( $Z7 = 6 \div 10$ ,  $Z8 = 3$ ).

Диаграмма Hf–Al, отдельно выделенная в группу «е», имеет средние по общей выборке значения максимальной протяженности  $\alpha_{(Hf)}$ - и  $\beta_{(Hf)}$ -фаз ( $Z1 = 30 \%$ ,  $Z2 = 45 \%$ ), среднюю среди других величину температуры, соответствующую максимальной протяженности  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы на диаграмме ( $Z3 = 1450 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), и максимальное число эвтектик ( $Z6 = 4$ ). Наконец, группе «ж» диаграмм состояния присущи следующие особенности: умеренная протяженность  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы ( $Z1 = 12,5 \div 28,0 \%$ ) и наибольшая температура при максимальной протяженности  $\beta$ -фазы на диаграмме по шкале содержания элементов ( $Z4 = 2190 \div 2300 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).

Большинство перечисленных групп диаграмм состояния двойных систем гафния с другими элементами могут быть дополнительно объединены в более общие комплексы, в пределах которых признаки, отображающие особенности диаграмм различных групп, демонстрируют при сопоставлении количественное соответствие. В первый комплекс включены диаграммы состояния групп «а» и «б», во второй — «в» и «г», а третий объединяют группы диаграмм «д» и «е» (см. рис. 1).

Одновременно результаты осуществленной классификации демонстрируют наличие выраженной двумерной направленности в изменении особенностей рассматриваемых диаграмм. Во-первых, это обусловливается выявленной монотонной последовательностью классифицированных диаграмм состояния от Hf–Ti до Hf–Al (см. рис. 1). А во-вторых, это следует из учета факта совпадения признаков, характеризующих особенности диаграмм состояния систем Hf–W и Hf–N, а также количественного соответствия признаков диаграмм Hf–W, Hf–O и Hf–C. Поэтому общая рациональная классификационная

структура совокупности диаграмм состояния двойных систем, образуемых гафнием, включает группировку в двух условных направлениях (рис. 2):

AY1 — от системы Hf–Ti к Hf–Al;

AY2 — от системы Hf–W к Hf–C.

Другие возможные варианты классификации рассмотренных двойных систем гафния с другими элементами по их диаграммам состояния, исходя из данных о близости значений их признаков, имеют более сложную структуру группировки и, следовательно, обобщают рассматриваемую информацию менее концентрированно.

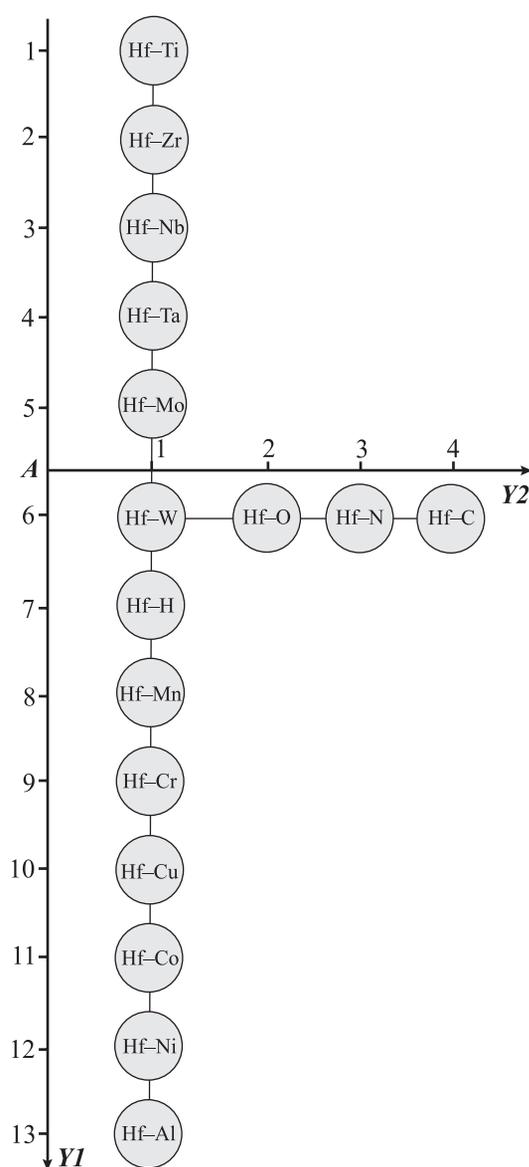


Рис. 2. Двумерная метрика для количественной оценки близости диаграмм состояния различных двойных систем гафния

Значения признаков  $Z1-Z8$ , характеризующих основные особенности диаграмм состояния двойных систем, одним из компонентов которых является гафний, могут быть использованы для определения физического смысла обобщенных показателей, варьирование которых отображает обоснованную двумерную классификацию. Осуществленный для этого расчет корреляций значений  $Z1-Z8$  с порядковыми номерами двойных систем (в пределах от Hf-Ti до Hf-Al) показал существование между ними целого ряда статистически значимых взаимосвязей:  $R(Z2-Y1) = -0,77$ ;  $R(Z4-Y1) = -0,57$ ;  $R(Z6-Y1) = 0,92$ ;  $R(Z7-Y1) = 0,88$ ;  $R(Z8-Y1) = 0,65$ .

С учетом наличия дополнительной более тесной закоррелированности значений признаков  $Z6$  и  $Z7$ , а также  $Z2$  и  $Z4$  величинами, оказывающими прямое значимое влияние на обобщенный показатель  $Y1$ , являются  $Z2$ ,  $Z6$  и  $Z8$ . Соответственно, направленность классификации диаграмм состояния двойных систем гафния по обобщенному показателю  $Y1$  на рис. 2 определяется положительной динамикой  $Z6$  и  $Z8$  (ростом количества эвтектик в рассматриваемых системах от 0 до 4 и числа промежуточных соединений в системе при высоких температурах от 0 до 3), а также отрицательной динамикой  $Z2$  (уменьшением протяженности  $\beta_{(Hf)}$ -фазы от 100 до 1 %). Конкретизация показателя  $Y1$  как результата совместного воздействия  $Z2$ ,  $Z6$  и  $Z8$  возможна путем моделирования его изменения в зависимости от перечисленных признаков.

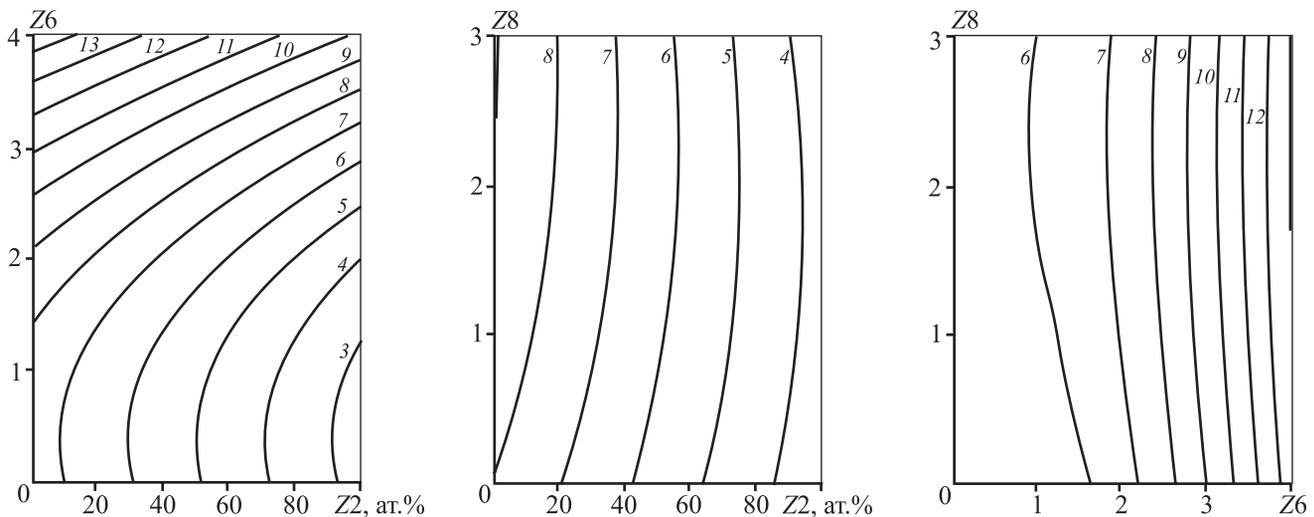
Разработку математической модели осуществляли с привлечением компьютерных процедур регрессионного анализа. В ходе вычислений получена модель следующей структуры:

$$Y1 = ROUND [7,083 - 4,640Z2 - 1,752Z6 + 2,215Z8 + 8,876(Z6)^2 - 1,148(Z8)^2 - 0,965Z2Z8],$$

где  $ROUND [..]$  — операция округления результата до ближайшего целого числа.

Модель справедлива для интервала изменения  $Y1$  от 1 до 13. Результаты моделирования характеризуются средним квадратическим отклонением от исходных значений показателя, равным 0,856, максимальным их отклонением — 1,771 и коэффициентом множественной корреляции с исходными значениями показателя — 0,976, что существенно выше его критической величины для заданных 95 %-ного уровня значимости и 11 степеней свободы, составляющей 0,553. Графическое отображение результатов приведено на рис. 3 и дает достаточно полное представление о характере совместного влияния признаков на динамику обобщенного показателя  $Y1$  классификации диаграмм состояния двойных систем гафния.

Применение процедур корреляционного анализа для конкретизации  $Y2$  показало по отношению к нему наличие следующих статистически значимых независимых друг от друга влияний признаков, характеризующих особенности диаграмм состояния:  $R(Z3-Y2) = 0,95$  и  $R(Z6-Y2) = 0,63$ . Учет выявлен-



**Рис. 3.** Графическое отображение совместного влияния признаков, характеризующих особенности диаграмм состояния двойных систем гафния, на обобщенный показатель  $Y1$  метрики их классификации

$Z2$  — максимальная область существования  $\beta_{(Hf)}$ -фазы, ат.%

$Z6$  — количество эвтектик

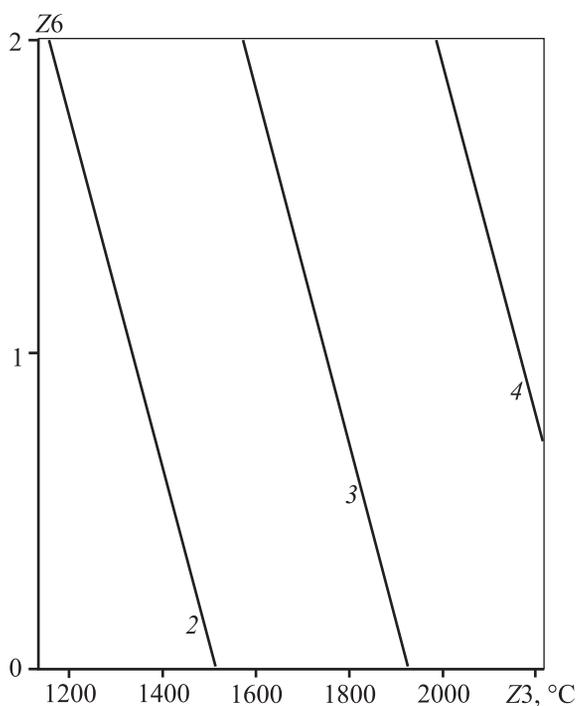
$Z8$  — количество промежуточных соединений, существующих в твердом растворе только при высоких температурах

ных влияний при моделировании характера изменения  $Y_2$  (от 1 до 4) приводит к следующей регрессионной зависимости:

$$Y_2 = \text{ROUND} [0,694 + 2,606Z_3 + 0,852Z_6].$$

Точность результатов моделирования данного показателя характеризуется их средним квадратическим отклонением от исходных значений, равным 0,282, максимальным отклонением 0,423 и коэффициентом множественной корреляции 0,977. Соответствующий коэффициент детерминации между модельными и исходными значениями  $Y_2$  отражает факт описания полученной зависимостью 95,22 % его общего изменения в выборке исходных данных. Графическое представление степени влияния на рассматриваемый показатель признаков  $Z_3$  (температура, соответствующая максимальной протяженности  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы на диаграмме по шкале содержания элементов) и  $Z_6$  (количество эвтектик в пределах диаграммы) приведено на рис. 4.

Таким образом, введение в рассмотрение показателей  $Y_1$  и  $Y_2$  эквивалентно введению метрики для получения количественных оценок близости диа-



**Рис. 4.** Графическое отображение совместного влияния признаков, характеризующих особенности диаграмм состояния двойных систем гафния, на обобщенный показатель  $Y_2$  метрики их классификации

$Z_6$  – количество эвтектик

$Z_3$  – температура, соответствующая максимальной протяженности области существования  $\alpha_{(Hf)}$ -фазы, °С

грамм состояния различных двойных систем гафния с рядом элементов. Это существенно облегчает определение аналогов для перспективных, но недостаточно изученных из числа рассмотренных соединений.

При необходимости разработанная классификационная схема, в силу удовлетворения условию композиционности, может быть без значительных трудозатрат дополнена информацией о диаграммах состояния других двойных систем гафния. Не вызывает сложностей и распространение использованного в работе таксонометрического подхода на классифицирование широкого класса двух- и многокомпонентных соединений по основным отличительным признакам их диаграмм состояния. Выявленные в ходе классификации закономерности изменения характера формирования областей существования  $\alpha_{(Hf)}$ - и  $\beta_{(Hf)}$ -фаз, температур структурно-фазовых превращений, образованных эвтектик, интерметаллидов и т.д. по отношению к различным двухкомпонентным соединениям гафния обусловили малозатратный выбор его сплавов-аналогов. Это дало возможность использовать полученные результаты при обосновании составов ряда двойных сплавов на основе гафния, востребованных в инновационных отраслях промышленности, и технологий их производства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты применения процедуры таксонометрического анализа для обобщения информации об особенностях 16 перспективных двойных систем гафния, содержащейся в рамках соответствующих им диаграмм состояния. Показано, что рассмотренные системы однозначно классифицируются на 7 однородных групп. При этом к соединениям, включенным в каждую из них, применим принцип аналогии, обеспечивающий возможность переноса по отношению к менее изученным системам закономерностей, характерных для более исследованных составов. Практическому использованию результатов классификации способствует введение метрики для получения количественных оценок близости сравниваемых двойных систем гафния по основным признакам их диаграмм состояния.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шиков А., Бочаров О., Аржакова В., Безумов В. // Нац. металлургия. 2002. № 6. С. 77
2. Киселева Н.Н. Компьютерное конструирование неор-

- ганических соединений: Использование баз данных и искусственного интеллекта. М.: Наука, 2005.
3. *Новиков И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И.* Металловедение, термообработка и рентгенография. М.: МИСиС, 1994.
  4. *Захаров А.М.* Диаграммы состояния двойных и тройных систем. Изд. 3-е. М.: Металлургия, 1990.
  5. *Рисованный В.Д., Клочков Е.П., Пономаренко В.Б.* Гафний в ядерной технике. Димитровград: ГНУ РФ НИИФР, 1993.
  6. *Бескорвайный Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И.* Конструкционные материалы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995.
  7. *Дуглас Д.* Металловедение циркония. М.: Атомиздат, 1975.
  8. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. Т. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997.
  9. *Бринза В.В., Бринза А.В.* // Сталь. 2010. № 7. С. 66.
  10. *Плюта В.* Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях: Методы таксонометрии и факторного анализа. М.: Статистика, 1980.

УДК 661.665

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ «НИКЕЛЬ–НАНОПОРОШОК ДИБОРИДА ХРОМА»

© 2013 г. И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, М.А. Терентьева, В.В. Руднева

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

Исследованы условия получения композиционного электрохимического покрытия (КЭП) на основе никеля с использованием в качестве упрочняющей фазы нанопорошка  $\text{CrB}_2$  в стандартном электролите никелирования. Установлено, что максимальное насыщение никелевой матрицы при использовании наноборида хрома происходит при его концентрации в электролите  $5\text{--}10\text{ кг/м}^3$ , что в  $8\text{--}12$  раз ниже, чем при добавке микропорошков  $\text{CrB}_2$ . Микротвердость КЭП состава  $\text{Ni-CrB}_{2(\text{нано})}$  при содержании в них упрочняющей фазы  $0,59\text{--}0,65\%$  в  $1,16\text{--}1,19$  раз выше, чем у покрытий  $\text{Ni-CrB}_{2(\text{микро})}$ , содержащих  $2,47\text{--}2,86\%$  борида, и в  $1,64\text{--}1,86$  раз выше, чем у никелевой матрицы. Оптимальными условиями осаждения КЭП являются: катодная плотность тока  $1,0\text{ кА/м}^2$ , концентрация наноборида в электролите  $5\text{--}10\text{ кг/м}^3$ ,  $\text{pH} = 5,0\pm 0,5$  и температура  $323\text{ К}$ .

**Ключевые слова:** композиционные покрытия, никель, наноборид хрома, параметры электроосаждения, микротвердость.

The conditions for obtaining composite electrochemical coatings (CEC) have been investigated on the basis of nickel with the use of  $\text{CrB}_2$  nanopowder as a hardening phase in standard nickel-plating electrolyte. It is established that the maximum saturation of the nickel matrix in using chromium nanoboride takes place when its concentration in the electrolyte is  $5\text{--}10\text{ kg/m}^3$  that is  $8\text{--}12$  times lower than in using micropowders. CEC microhardness of  $\text{Ni-CrB}_{2(\text{nano})}$  composition with the content of  $0,59\text{--}0,65\%$  hardening phase is  $1,16\text{--}1,19$  times higher than that of  $\text{Ni-CrB}_{2(\text{micro})}$  coatings containing  $2,47\text{--}2,86\%$  boride and  $1,64\text{--}1,86$  times higher than that of the nickel matrix. The optimum conditions of CEC deposition are cathodic current density of  $1,0\text{ kA/m}^2$ , nanoboride concentration of  $5\text{--}10\text{ kg/m}^3$  in the electrolyte,  $\text{pH } 5,0\text{--}5,5$ , and temperature of  $323\text{ K}$ .

**Key words:** composite coatings, nickel, chromium nanoboride, electrodeposition parameters, microhardness.

**Ноздрин И.В.** – канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии СибГИУ (654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). Тел. (3843) 74-89-13. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru.

**Галевский Г.В.** – докт. техн. наук, профессор, заведующий той же кафедрой. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru.

**Терентьева М.А.** – аспирант той же кафедры.

**Руднева В.В.** – докт. техн. наук, профессор той же кафедры.