

УДК 544.344.015.35:544.344.4:[546.74+546.719+546.75+546.88]

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr И Ni–Re–W–Mo ПРИ 1375 К

С.В. Николаев, Э.Ю. Керимов, Е.М. Слюсаренко

(кафедра общей химии, e-mail: slusarenko@laincom.chem.msu.ru)

Комплексом методов физико-химического анализа с использованием метода графов определены фазовые равновесия в пяти четырехкомпонентных системах Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К.

Ключевые слова: фазовые равновесия, метод графов, никель, рений, вольфрам, ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден.

Основой современной теории легирования и создания сплавов с заданными эксплуатационными характеристиками являются диаграммы фазовых равновесий многокомпонентных металлических систем, включающих все компоненты сплава. Кроме того, на основе диаграмм фазовых равновесий можно научно обосновать подход к выбору технологических режимов получения и последующей обработки сплавов.

Комплексное легирование никель-рениевых суперсплавов – один из самых перспективных путей повышения их конструкционных характеристик. Тем не менее, до настоящего времени изучены лишь двойные и тройные системы никеля и рения с легирующими элементами.

В настоящем исследовании с использованием метода графов осуществлено определение фазовых равновесий в пяти четырехкомпонентных системах Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К.

Фазовые равновесия в двух- и трехкомпонентных системах, составляющих четырехкомпонентные системы Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo

Для определения фазовых равновесий в исследуемых четырехкомпонентных системах необходимо иметь информацию обо всех двухкомпонентных диаграммах состояния, образующих эти системы. Анализ диаграмм состояния двухкомпонентных систем показывает, что в многокомпонентных системах на их основе при 1375 К будут существовать 10 фаз двухкомпонентных систем, представленных в табл. 1 [1–18].

Для построения графа фазовых равновесий исследуемых четырехкомпонентных систем необходимо иметь информацию о 16 изотермических сечениях диаграмм фазовых равновесий трехкомпонентных систем. Фазовые равновесия при 1375 К в тройных системах, составляющих четырехкомпонентные системы Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo, представлены в табл. 2.

В трехкомпонентных системах при 1375 К обнаружены два тройных соединения: *P*-фаза (пространственная группа *Pnma*, № 62, структурный тип $Cr_{18}Mo_{42}Ni_{40}$) в системах Ni–Re–Mo [19] и Mo–Ni–Cr [26, 27], а также σ' -фаза (пространственная группа $P4_2/mnm$, № 136, структурный тип $Cr_{0,49}Fe_{0,51}$, *tP30*) в системах Ni–W–Cr [28] и Ni–Re–V [19].

По данным работы [29], σ' -фаза изоструктурна двойной фазе σ и в четырехкомпонентных системах образует общую однофазную область. Следует отметить, что в системах переходных металлов фазы имеют, как правило, плотноупакованные структуры, и образование многокомпонентных фаз, отсутствовавших на двойных и тройных изотермических сечениях, в таких системах маловероятно.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно сделать заключение о существовании 11 фаз в четырехкомпонентных системах Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К.

Методика проведения исследований

Для приготовления сплавов использовали металлы: никель, хром, молибден и вольфрам чистотой не менее 99,95 мас.%; рений, ванадий, ниобий и тантал чистотой не менее 99,80 мас.%.

Т а б л и ц а 1

Данные о структуре фаз, существующих при 1375 К в двухкомпонентных системах, составляющих четырехкомпонентные системы Ni-Re-W-V, Ni-Re-W-Nb, Ni-Re-W-Ta, Ni-Re-W-Cr и Ni-Re-W-Mo

Номер фазы	Фаза	Символ Пирсона	Пространственная группа	Структурный тип	Ссылки
1	β	<i>cI2</i>	<i>Im-3m</i> , № 229	W	[2–18]
2	γ	<i>cF4</i>	<i>Fm-3m</i> , № 225	Cu	[1–7]
3	α	<i>tI8</i>	<i>I4/mmm</i> , № 139	TiAl ₃	[3, 4]
4	μ	<i>hR39</i>	<i>R-3m h</i> , №166	W ₆ Fe ₇	[3, 4]
5	χ	<i>cI58</i>	<i>I-43m</i> , № 217	Mn	[9, 10, 12, 13]
6	σ	<i>tP30</i>	<i>P4₂/mnm</i> , № 136	Cr _{0,49} Fe _{0,51}	[2, 11, 13]
7	Re	<i>hP2</i>	<i>P6₃/mmc</i> , № 194	Mg	[1, 8-13]
8	Ni ₂ Ta	<i>tI6</i>	<i>I4/mmm</i> , № 139	MoSi ₂	[4]
9	NiTa ₂	<i>tI12</i>	<i>I4/mcm</i> , № 140	CuAl ₂	[4]
10	δ	<i>oP56</i>	<i>P2₁2₁2₁</i> , № 19	Mo ₃ (Mo _{0,8} Ni _{0,2}) ₅ Ni ₆	[6]

Т а б л и ц а 2

Фазовые равновесия при 1375 К в тройных системах, составляющих четырехкомпонентные системы Ni-Re-W-V, Ni-Re-W-Nb, Ni-Re-W-Ta, Ni-Re-W-Cr и Ni-Re-W-Mo

Номер системы	Система	Трехфазные равновесия	Ссылка
1	Ni-W-V	$\gamma+\sigma+\beta$	[19]
2	Ni-W-Nb	$\alpha+\gamma+\beta$, $\alpha+\mu+\beta$	[19]
3	Ni-W-Ta	$\alpha+\beta+\gamma$, $\alpha+\beta+\text{Ni}_2\text{Ta}$, $\text{Ni}_2\text{Ta}+\mu+\beta$, $\mu+\text{NiTa}_2+\beta$	[19]
4	Ni-W-Cr	$\beta_1+\beta_2+\sigma'$, $\beta_1+\sigma'+\gamma$, $\beta_2+\sigma'+\gamma$	[19]
5	Ni-W-Mo	$\beta+\gamma+\delta$	[19]
6	Re-W-V	$\text{Re}+\beta+\sigma$, $\text{Re}+\chi+\sigma$	[8, 13, 19]
7	Re-W-Nb	$\chi+\sigma+\beta$	[9, 13, 15, 20]
8	Re-W-Ta	$\chi+\sigma+\beta$	[21, 22]
9	Re-W-Cr	$\text{Re}+\chi+\sigma$, $\beta_1+\beta_2+\sigma$	[11, 13, 17]
10	Re-W-Mo	–	[23]
11	Ni-Re-V	$\beta+\gamma+\sigma$, $\beta+\gamma+\sigma'$, $\beta+\sigma'+\text{Re}$, $\text{Re}+\sigma'+\gamma$	[24]
12	Ni-Re-Nb	$\alpha+\mu+\beta$, $\alpha+\beta+\chi$, $\alpha+\chi+\text{Re}$, $\alpha+\text{Re}+\gamma$	[24]
13	Ni-Re-Ta	$\beta+\mu+\text{Ta}_2\text{Ni}$, $\alpha+\mu+\text{TaNi}_2$, $\alpha+\mu+\beta$, $\alpha+\beta+\chi$, $\alpha+\chi+\text{Re}$, $\alpha+\text{Re}+\gamma$	[24]
14	Ni-Re-Cr	$\beta+\sigma+\gamma$, $\sigma+\gamma+\text{Re}$	[24]
15	Ni-Re-Mo	$\beta+P+\delta$, $\beta+P+\sigma$, $\sigma+\chi+\text{Re}$, $\text{Re}+\sigma+P$, $P+\text{Re}+\gamma$, $P+\delta+\gamma$	[24]
16	Ni-Re-W	$\text{Re}+\gamma+\chi$, $\chi+\gamma+\sigma$, $\sigma+\gamma+\beta$	[25]

Сплавы готовили в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере аргона с многократным переплавом. Сплавы гомогенизировали при 1375 ± 5 К в трубчатых печах электросопротивления в течение 1200 ч. Гомогенизирующий отжиг проводили в вакуумированных двойных кварцевых ампулах, между которыми помещали циркониевую стружку для поглощения кислорода. Концентрация элементов в сплавах изучаемых систем представлена в табл. 3.

Концентрацию элементов в сплавах и количественное содержание элементов в фазах сплавов исследовали методом электронно-зондового микроанализа на приборе «LEO EVO 50 XVP», снабженном энергодисперсионным анализатором «Inca Energy 450» («Oxford instruments»), при ускоряющем напряжении 20 кВ. Обработку результатов проводили на ЭВМ при помощи программного обеспечения INCA методом XPP (стандартная ошибка метода обработки результатов ± 2 отн. %).

Микроструктуру образцов исследовали методом растровой электронной микроскопии на приборе «LEO EVO 50 XVP» при ускоряющем напряжении 20 кВ. Изображение получали, используя детектор обратно рассеянных электронов (QBSD).

Рентгенофазовый анализ проводили методом порошка на автодифрактометре «STOE STADI P» в геометрии на пропускание (Ge-монохроматор, излучение $\text{CuK}_{\alpha 1}$, линейный PSD, интервал углов (2θ) $10-90^\circ$, время экспозиции 10 с на точку, шаг 0,01), а также на дифрактометре «ДРОН-4» с использованием $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучения (Ge-монохроматор, интервал углов (2θ) $10-90^\circ$, время экспозиции 10 с на точку, шаг 0,01). Для идентификации фаз и расчета параметров решетки использовали программное обеспечение STOE WinXPOW (Version 1.06 (17-Aug-1999) Copyright (C) 1999 STOE & Cie GmbH).

Результаты и их обсуждение

С помощью метода графов, описанного в работах [19, 29–31], можно осуществить теоретическую полиэдрацию изотермических сечений диаграмм фазовых равновесий четырехкомпонентных систем Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К, основываясь на информации о фазовых равновесиях в трехкомпонентных системах.

Суммарные графы фазовых равновесий четырехкомпонентных систем Ni–Re–W–V и Ni–Re–W–Cr при 1375 К представлены на рис. 1, 2 соответственно. Три трехфазных равновесия $\sigma'+\beta+\gamma$, $\sigma+\beta+\gamma$ и $\sigma'+\beta+\text{Re}$ в системе Ni–Re–W–V, а также три трехфазных

равновесия $\beta_1+\beta_2+\sigma$, $\beta_1+\sigma+\gamma$ и $\beta_2+\sigma+\gamma$ в системе Ni–Re–W–Cr рекомбинируют, образуя в обеих четырехкомпонентных системах три соответствующие области трехфазных равновесий, и не принимают участия в образовании четырехфазных равновесий. После выделение данных равновесий из суммарных графов соответствующих систем, получим остаточный граф (рис. 3), одинаковый для обеих четырехкомпонентных систем и являющийся графом четырехфазного равновесия $\chi+\text{Re}+\sigma+\gamma$.

Суммарные графы фазовых равновесий четырехкомпонентных систем Ni–Re–W–Nb и Ni–Re–W–Ta при 1375 К представлены на рис. 4, 5 соответственно. Трехфазное равновесие $\alpha+\beta+\mu$ в системе Ni–Re–W–Nb и трехфазное равновесие $\alpha+\text{NiTa}_2+\beta$ в системе Ni–Re–W–Ta рекомбинируют, образуя в четырехкомпонентных системах соответствующие области трехфазных равновесий, и не принимают участия в образовании четырехфазных равновесий. Кроме того, из суммарного графа фазовых равновесий системы Ni–Re–W–Ta можно выделить четырехфазное равновесие $\alpha+\mu+\beta+\text{Ni}_2\text{Ta}$. Полученный остаточный граф, имеет общее строение для обеих систем (рис. 6). Он содержит шесть фаз и может представлять собой либо блок из трех четырехфазных равновесий ($\alpha+\text{Re}+\chi+\gamma$, $\sigma+\chi+\beta+\gamma$ и $\alpha+\beta+\gamma+\chi$) при отсутствии равновесия $\alpha+\sigma$, либо блок из четырех четырехфазных равновесий ($\alpha+\text{Re}+\chi+\gamma$, $\alpha+\sigma+\chi+\gamma$, $\alpha+\sigma+\chi+\beta$ и $\alpha+\sigma+\beta+\gamma$) при существовании равновесия $\alpha+\sigma$, отмеченного на рис. 6 пунктирной линией.

Суммарный граф фазовых равновесий системы Ni–Re–W–Mo при 1375 К (рис. 7) представляет собой блок из четырех четырехфазных равновесий $\chi+\text{Re}+\sigma+\gamma$, $P+\text{Re}+\sigma+\gamma$, $P+\beta+\sigma+\gamma$ и $P+\beta+\delta+\gamma$.

Для подтверждения результатов полиэдрации изотермических сечений диаграмм фазовых равновесий четырехкомпонентных систем Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta и Ni–Re–W–Mo при 1375 К было исследовано 5 сплавов. Концентрация элементов в этих сплавах, фазовый состав, концентрация элементов в фазах, а также параметры кристаллических решеток фаз, образующихся в сплавах, представлены в табл. 3. Микроструктуры сплавов с указанием фаз представлены на рис. 8–12.

В ходе экспериментальной проверки в системе Ni–Re–W–Nb при 1375 К было установлено существование равновесия $\sigma+\alpha$, а в системе Ni–Re–W–Ta – четырехфазного равновесия $\alpha+\sigma+\chi+\gamma$, что однозначно устанавливает соответствующий набор четырех четырехфазных равновесий $\alpha+\text{Re}+\chi+\gamma$, $\alpha+\sigma+\chi+\gamma$, $\alpha+\sigma+\chi+\beta$ и $\alpha+\sigma+\beta+\gamma$ в указанных системах.

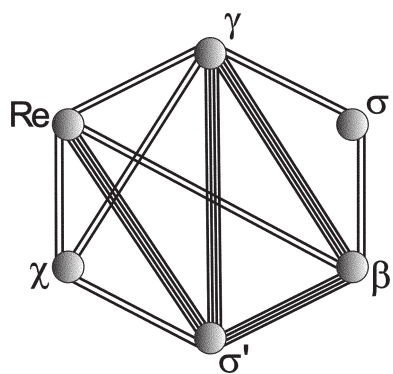


Рис. 1. Суммарный граф фазовых равновесий системы Ni-Re-W-V при 1375 К

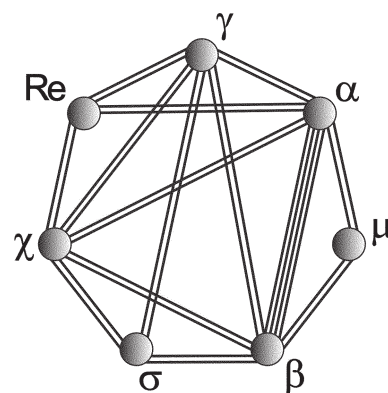


Рис. 4. Суммарный граф фазовых равновесий системы Ni-Re-W-Nb при 1375 К

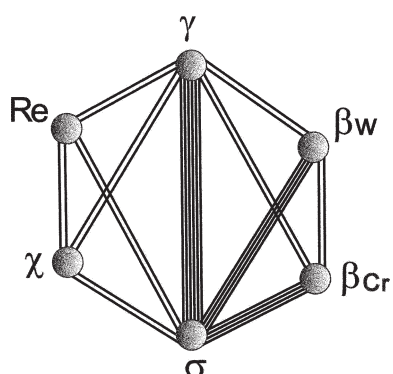


Рис. 2. Суммарный граф фазовых равновесий системы Ni-Re-W-Cr при 1375 К

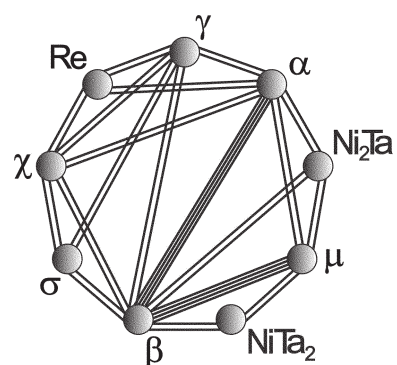


Рис. 5. Суммарный граф фазовых равновесий системы Ni-Re-W-Ta при 1375 К

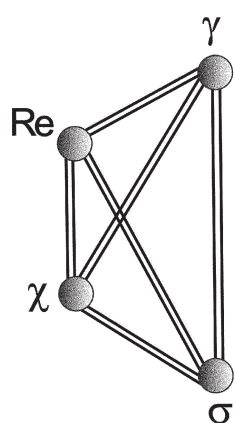


Рис. 3. Остаточный граф фазовых равновесий систем Ni-Re-W-V и Ni-Re-W-Cr при 1375 К

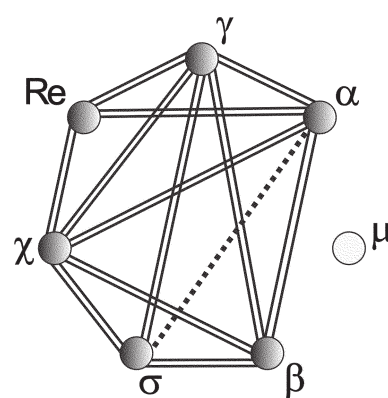


Рис. 6. Остаточный граф фазовых равновесий систем Ni-Re-W-Nb и Ni-Re-W-Ta при 1375 К с добавленным равновесием $\alpha+\sigma$

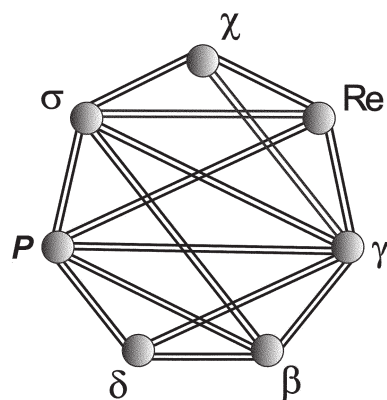


Рис. 7. Суммарный граф фазовых равновесий системы Ni-Re-W-Mo при 1375 К

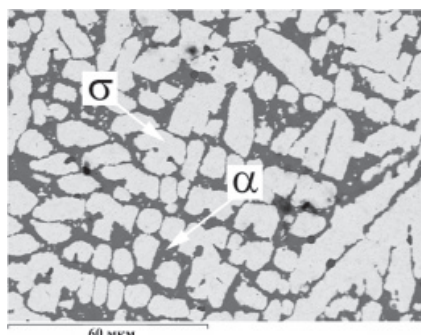


Рис. 8. Микроструктура сплава № 1 (система Ni-Re-W-Nb)

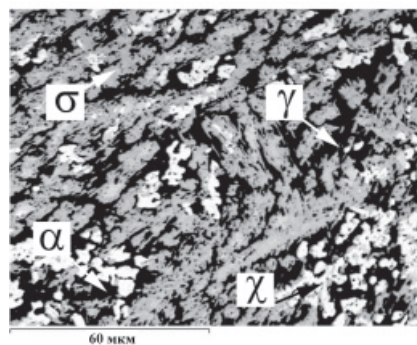


Рис. 10. Микроструктура сплава № 3 (система Ni-Re-W-Ta)

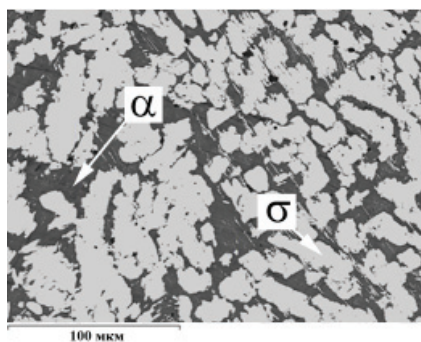


Рис. 9. Микроструктура сплава № 2 (система Ni-Re-W-Nb)

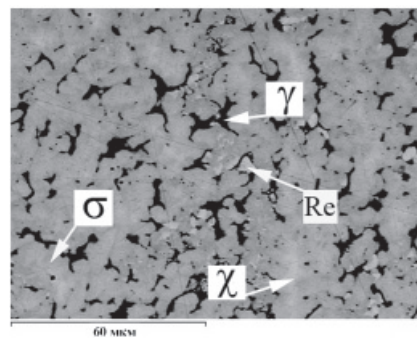


Рис. 11. Микроструктура сплава № 4 (система Ni-Re-W-Cr)

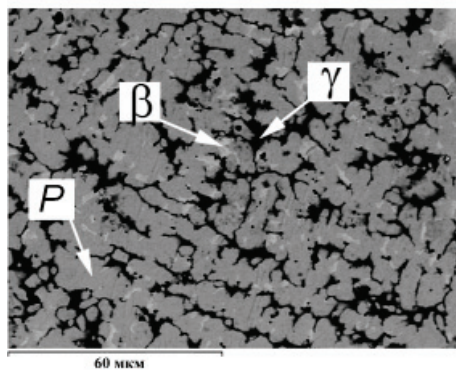


Рис. 12. Микроструктура сплава № 5 (система Ni-Re-W-Mo)

В системе Ni–Re–W–Cr при 1375 К единственное четырехфазное равновесие $Re+\chi+\sigma+\gamma$ подтверждено экспериментально.

В системе Ni–Re–W–Mo при 1375 К было установлено существование непроецирующегося трехфазного равновесия $P+\gamma+\beta$, которое подтверждает результаты полиэдрации данной системы, а, следовательно, существование четырех четырехфазных равновесий $\chi+Re+\sigma+\gamma$, $P+Re+\sigma+\gamma$, $P+\beta+\sigma+\gamma$ и $P+\beta+\delta+\gamma$.

Установленные в результате проведенных исследований фазовые равновесия в четырехкомпонентных системах Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta,

Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К представлены в табл. 4.

Выводы

1. Впервые комплексом методов физико-химического анализа с использованием метода графов установлено существование при 1375 К следующих четырехфазных равновесий в четырехкомпонентных системах: $\sigma+Re+\chi+\gamma$ в системах Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo; $\alpha+\gamma+\chi+Re$ в системах Ni–Re–W–Nb и Ni–Re–W–Ta; $\alpha+\sigma+\chi+\gamma$ в системах Ni–Re–W–Nb и Ni–Re–W–Ta; $\alpha+\sigma+\beta+\gamma$ в системах

Таблица 3

Концентрация элементов в сплавах, концентрация элементов в фазах сплавов и фазовый состав сплавов четырехкомпонентных систем Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К

Номер сплава	Концентрация элементов, ат. %	Фазовый состав сплавов	Структурный тип	Параметры ячейки, Å							
				a	b	c					
Система Ni–Re–W–Nb											
		Ni	Re	W	Nb						
1	в сплаве	33,9	29,9	13,8	22,4						
	в фазах сплава	71,3	0,0	1,1	27,6	α	TiAl ₃	3,3871(21)	–	7,404(6)	
		9,2	54,4	19,7	16,7	σ	Cr _{0,49} Fe _{0,51}	9,501(3)	–	4,9959(23)	
2	в сплаве	44,8	22,0	20,3	12,9						
	в фазах сплава	27,3	40,5	32,2	0,0	σ	Cr _{0,49} Fe _{0,51}	–	–	–	
		70,7	1,6	5,9	21,8	α	TiAl ₃	–	–	–	
Система Ni–Re–W–Ta											
		Ni	Re	W	Ta						
3	в сплаве	44,1	35,3	13,5	7,1						
	в фазах сплава	8,2	75,2	12,3	4,3	χ	Mn	9,5188(21)	–	–	
			29,0	53,4	16,2	1,4	σ	Cr _{0,49} Fe _{0,51}	9,4747(8)	–	5,0366(6)
			73,0	0,0	6,8	20,2	α	TiAl ₃	3,4068(10)	–	7,394(3)
	66,7	9,0	5,2	19,1	γ	Cu	3,649(2)	–	–		
Система Ni–Re–W–Cr											
		Ni	Re	W	Cr						
4	в сплаве	26,0	56,9	5,9	11,2						
	в фазах сплава	20,4	61,8	6,4	11,4	χ	Mn	9,478(3)	–	–	
			23,9	72,6	0,0	3,5	Re	Mg	2,7006(23)	–	4,4071(24)
			26,5	55,5	5,2	12,8	σ	Cr _{0,49} Fe _{0,51}	9,4222(9)	–	5,0267(7)
	72,6	13,3	2,9	11,2	γ	Cu	3,6368(7)	–	–		

Окончание табл. 3

Номер сплава	Концентрация элементов, ат. %	Фазовый состав сплавов	Структурный тип	Параметры ячейки, Å						
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>				
Система Ni–Re–W–Mo										
		Ni	Re	W	Mo					
5	в сплаве	40,0	12,6	18,6	28,8					
	в фазах сплава	1,9	11,8	44,7	41,6	β	W	3,1362(17)	–	–
		74,0	2,1	8,5	15,4	γ	Cu	3,593(10)	–	–
	31,0	15,9	19,9	33,2	<i>P</i>	$\text{Cr}_{18}\text{Mo}_{42}\text{Ni}_{40}$	16,989(4)	4,7434(15)	9,0875(25)	

Т а б л и ц а 4

Фазовые равновесия в четырехкомпонентных системах Ni–Re–W–V, Ni–Re–W–Nb, Ni–Re–W–Ta, Ni–Re–W–Cr и Ni–Re–W–Mo при 1375 К

Номер системы	Система	Фазы	Рекомбинирующиеся трехфазные равновесия	Установленные четырехфазные равновесия
1	Ni–Re–W–V	$\beta, \chi, \gamma, \sigma, \text{Re}$	$\sigma'+\beta+\gamma, \sigma+\beta+\gamma, \sigma'+\beta+\text{Re}$	$\sigma+\text{Re}+\chi+\gamma$
2	Ni–Re–W–Nb	$\alpha, \gamma, \beta, \chi, \sigma, \text{Re}, \mu$	$\alpha+\beta+\mu$	$\alpha+\text{Re}+\chi+\gamma, \alpha+\sigma+\chi+\gamma, \alpha+\sigma+\chi+\beta, \alpha+\sigma+\beta+\gamma$
3	Ni–Re–W–Ta	$\alpha, \gamma, \mu, \beta, \chi, \sigma, \text{Re}, \text{Ni}_2\text{Ta}, \text{NiTa}_2$	$\alpha+\text{NiTa}_2+\beta$	$\alpha+\sigma+\beta+\chi, \alpha+\sigma+\beta+\gamma, \alpha+\sigma+\gamma+\chi, \alpha+\gamma+\chi+\text{Re}, \alpha+\mu+\beta+\text{Ni}_2\text{Ta}$
4	Ni–Re–W–Cr	$\chi, \gamma, \sigma, \beta_1, \beta_2, \text{Re}$	$\beta_1+\beta_2+\sigma, \beta_1+\sigma+\gamma, \beta_2+\sigma+\gamma$	$\chi+\text{Re}+\sigma+\gamma$
5	Ni–Re–W–Mo	$\delta, \gamma, \beta, \chi, \sigma, P, \text{Re}$	–	$\chi+\text{Re}+\sigma+\gamma, P+\text{Re}+\sigma+\gamma, P+\beta+\sigma+\gamma, P+\beta+\delta+\gamma$

Ni–Re–W–Nb и Ni–Re–W–Ta; $\alpha+\sigma+\chi+\beta$ в системах Ni–Re–W–Nb и Ni–Re–W–Ta; $\alpha+\mu+\beta+\text{Ni}_2\text{Ta}$ в системе Ni–Re–W–Ta; $P+\text{Re}+\sigma+\gamma, P+\beta+\sigma+\gamma$ и $P+\beta+\delta+\gamma$ в системе Ni–Re–W–Mo.

2. С никелевым твердым раствором в исследованных четырехкомпонентных системах в равновесии находятся фазы $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \chi, \sigma, P, \text{Re}$, которые могут выделяться при старении никелевых суперсплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-03-00977).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никель–рений // Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н.П. Лякишева. Т. 3. Кн. I. М., 2001. С. 629.
2. Smith J.F., Carlson O.N., Nash P.G. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. 3. P. 2880.
3. Nash P., Nash A. // Там же. P. 2746.
4. Nash A., Nash P. // Там же. P. 2865.
5. Nash P. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. 2. P. 1298.
6. Singleton M.F., Nash P. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. 3. P. 2635.
7. Rama Rao P., Sriramamurthy A.M., Nagender Naidu S.V. // Там же. P. 2882.
8. Smith J.F. // J. Alloy Phase Diagrams. 1988. 4. P. 199.
9. Massalski T.B. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. 3. P. 2756.
10. Brophy J.H., Schwarzkopf P., Wulff J. // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. 1960. 218. P. 910.
11. Савицкий Е.М., Тылкина М.А., Поварова К.Б. // Журнал неорганической химии. 1959. 4. № 8. С. 873.
12. Massalski T.B. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. 3. P. 2656.

13. Williams R.K., Wiffen E.W., Bentley J., Stiegler J.O. // Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1983. **14**. P. 655.
14. Nagender Naidu S.V., Sriramamurthy A.M., Vijayakumar M., Rama Rao P. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. **3**. P. 3523.
15. Nagender Naidu S.V., Sriramamurthy A.M., Rama Rao P. // Там же. P. 2782.
16. Krishnan R., Garg S.P., Krishnamurthy N. // Там же. P. 3438.
17. Nagender Naidu S.V., Sriramamurthy A.M., Rama Rao P. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. **2**. P. 1353.
18. Nagender Naidu S.V., Sriramamurthy A.M., Rama Rao P. // Binary Alloy Phase Diagrams / Ed. T.B. Massalski. Ohio, 1990. **3**. P. 2682.
19. Sofin M.V., Kerimov E.Yu., Chastukhin A.E., Bazhanova N.A., Balykova Yu.V., Slyusarenko E.M. // J. Alloys and Compounds. 2001. **321**. P. 102.
20. Савицкий Е.М., Тылкина М.А., Жданова Л.Л. // Сб. Исследование и применение сплавов рения. М., 1975. С. 42.
21. Brophy J.H., Kamdar M.H., Wulff J. // Trans. Metall. Soc. AIME. 1961. **221**. P. 1137.
22. Трезубов И.А., Евсеева Л.Н., Иванов О.С., Марчукова И.Д. // Изв. АН СССР. Металлы. 1973. № 1. С. 199.
23. Тылкина М.А., Поварова К.Б., Савицкий Е.М. // Журнал неорганической химии. 1960. **5**. № 11. С. 2458.
24. Slyusarenko E.M., Peristy A.V., Kerimov E.Yu., Sofin M.V., Skorbov D.Yu. // J. Alloys and Compounds. 1998. **264**. P. 180.
25. Красноярова О.М., Грибанов А.В., Гузей Л.С. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1982. **23**. С. 405.
26. Kodenzov A.A., Dunaev S.F., Slusarenko E.M. // J. Less-Common Metals. 1988. **141**. N 2. P. 225.
27. Shoemaker D.P., Shoemaker C.B., Wilson F.C. // Acta Crystallographica, 1957. **10**. N 1. P. 1.
28. Kajihara M., Kadoya Y., Kikuchi M., Tanaka R. // J. Iron and steel Inst. Jap. 1985. **71**. N 15. P. 1773.
29. Борисов В.А. Автореф. ... канд. хим. наук. М., 1993.
30. Slyusarenko E.M., Kerimov E.Yu., Sofin M.V. // J. Mendeleev Communication. 1999. N 2. P. 56.
31. Slyusarenko E.M., Borisov V.A., Sofin M.V., Kerimov E.Yu., Chastukhin A.E. // J. Alloys and Compounds. 1999. **284**. P. 171.

Поступила в редакцию 04.04.13

PHASE EQUILIBRIA IN THE FOUR-COMPONENT SYSTEMS Ni-Re-W-V, Ni-Re-W-Nb, Ni-Re-W-Ta, Ni-Re-W-Cr AND Ni-Re-W-Mo AT 1375 K

S.V. Nikolaev, E.Yu. Kerimov, E.M. Slyusarenko

(Division of General Chemistry)

Phase equilibria in five four-component systems Ni-Re-W-V, Ni-Re-W-Nb, Ni-Re-W-Ta, Ni-Re-W-Cr and Ni-Re-W-Mo at 1375 K have been determined by complex of the methods of physico-chemical analysis with using graph method.

Key words: phase equilibria, graph method, nickel, rhenium, tungsten, vanadium, niobium, tantalum, chromium, molybdenum.

Сведения об авторах: Николаев Семен Владимирович – аспирант химического факультета МГУ (semen-nikolaev@inbox.ru); Керимов Эльшат Юсифович – доцент кафедры общей химии химического факультета МГУ, канд. хим. наук (eukr@yandex.ru); Слюсаренко Евгений Михайлович – вед. науч. сотр. кафедры общей химии химического факультета МГУ, докт. хим. наук (slusarenko@laincom.chem.msu.ru).