

УДК 544.344.015.35:544.344.9:546.719'75'88

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В СИСТЕМЕ Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W ПРИ 1375 К С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГРАФОВ¹

Аннотация. С использованием метода графов определены фазовые равновесия в семикомпонентной системе Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К. Установлено, что в данной системе при 1375 К существуют две четырехфазные области $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$ и $\beta+\sigma+\lambda+\chi$, а четырехфазное равновесие $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$, существовавшее в четырехкомпонентных системах, вырождается в трехфазное равновесие $\sigma+\beta+\lambda$ в системах большей мерности. В семикомпонентной системе Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К пяти-, шести- и семифазные равновесия отсутствуют.

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

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

DETERMINATION OF PHASE EQUILIBRIA IN THE Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W SYSTEM AT 1375 K USING THE GRAPH METHOD¹

Abstract. Phase equilibria in the seven-component system Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W at 1375 K have been determined with the help of the graph method. It is established that in this system two four-phase regions $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$ and $\beta+\sigma+\lambda+\chi$ exist at 1375 K; the four-phase equilibrium $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$ that existed in four-component systems is degenerated to three-phase equilibrium $\sigma+\beta+\lambda$ in five-component systems. There are no five-, six- and seven-phase equilibria in the seven-component system Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W at 1375 K.

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

Введение

Диаграммы фазовых равновесий являются универсальным источником информации о взаимодействии элементов в многокомпонентных системах и широко используются в химии твердого тела и материаловедении. Однако с увеличением числа компонентов в системе (больше четырех) объем экспериментальных исследований возрастает многократно. Кроме того, строение многокомпонентных диаграмм фазовых равновесий невозможно представить в трехмерном пространстве, и приходится работать с абстрактной информацией в виде уравнений, что существенно усложняет поиск и оптимизацию свойств новых материалов. Одно из решений проблемы было предложено в работе [1]. Использование графов, узлы которых представляют фазы систе-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-03-00977).

мы, а ребра отражают существование равновесий между фазами, позволяет представить на плоскости строение многокомпонентной диаграммы фазовых равновесий с любым числом компонентов. Более того, с использованием графов и термодинамических закономерностей удалось разработать метод прогнозирования строения изотермических сечений многокомпонентных диаграмм фазовых равновесий по данным о строении более простых систем [1–4]. Метод позволяет сократить экспериментальные процедуры до минимума.

В конце 60-х гг. интерес к материалам на основе ренийевых сплавов резко вырос после того, как М. А. Тылкиной и К. Н. Савицким [5, 6] было выяснено, что рений в несколько раз повышает жаропрочность никельхромовых сплавов. При этом пластичность и деформируемость их не уменьшаются, а температура рекристаллизации увеличивается, что позволяет повысить рабочую температуру сплава. Кроме того, было установлено [5], что рений повышает прочность и пластичность металлов V–VI групп. Это позволяет создать новый класс тугоплавких материалов. Тем не менее даже некоторые тройные изотермы рения с переходными металлами V–VI групп до сих пор не исследованы.

В настоящей работе представлены результаты исследования изотермического сечения семикомпонентной системы Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К с использованием метода графов [7–59].

1. Диаграммы фазовых равновесий двух- и трехкомпонентных систем рения с переходными металлами V–VI групп

Переходные металлы V–VI групп имеют одинаковую структуру и при 1375 К образуют непрерывные или ограниченные ряды твердых растворов с ОЦК структурой [7, 9–12, 14, 15, 17–21]. Только в трех двухкомпонентных системах: Nb-Cr [13], Ta-Cr [16] и Ta-V [8] – наблюдается образование фаз Лавеса (λ).

В системе Re-V при 1375 К не обнаружено интерметаллических соединений [22]. Ниобий и тантал с рением образуют фазу χ [23, 24]. При взаимодействии всех переходных металлов VI группы с рением при 1375 К наблюдается образование фазы σ , а в системах Re-Mo и Re-W, кроме σ -фазы, образуется и χ -фаза [25–27].

В восьми трехкомпонентных системах: V-Nb-Mo [31], V-Nb-W [7, 11, 15], Nb-Ta-Mo [35], Nb-Ta-W [36], V-Cr-Mo [3, 37], V-Mo-W [4, 10, 11, 21], Nb-Mo-W [42] и Ta-Mo-W [43] – при 1375 К существует непрерывный ряд β -твердых растворов; в трех системах: V-Nb-Ta [28], V-Ta-Mo [28] и V-Ta-W [33] – при 1375 К существует одно двухфазное равновесие $\lambda+\beta$; в трех системах: V-Nb-Cr [29, 30], V-Ta-Cr [4, 8, 9, 16, 32] и Nb-Ta-Cr [4, 12, 13, 16, 34] – существуют два двухфазных равновесия $\lambda+\beta_1$ и $\lambda+\beta_2$; в двух системах: V-Cr-W [4, 9, 11, 20] и Cr-Mo-W [44, 45] – при 1375 К наблюдается расслоение β -твердого раствора (равновесие $\beta_1+\beta_2$); в четырех системах: Nb-Cr-Mo [29, 38, 39], Ta-Cr-Mo [4, 16, 17, 19], Nb-Cr-W [40, 41] и Ta-Cr-W – существует одно трехфазное равновесие $\lambda+\beta_1+\beta_2$ [4].

Фазовые равновесия, устанавливающиеся при 1375 К в трехкомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп, представлены в табл. 1. В трехкомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп тройных соединений не обнаружено.

Таблица 1

Фазовые равновесия, устанавливающиеся при 1375 К
в трехкомпонентных системах рения
с переходными металлами V–VI групп

Система	Фазы	Фазовые равновесия	Литература
Re-V-Nb	Re, β , χ	Re+ β + χ	[46]
Re-V-Ta	Re, β , χ , λ	Re+ β + χ , λ + β	[8, 22, 24, 47, 48]
Re-V-Cr	Re, β , σ	Re+ β + σ	[3]
Re-V-Mo	Re, β , σ , χ	Re+ β + σ , Re+ χ + σ	[3]
Re-V-W	Re, β , σ , χ	Re+ β + σ , Re+ χ + σ	[11, 22, 27]
Re-Nb-Ta	Re, β , σ , χ	Re+ χ , χ + β	[49]
Re-Nb-Cr	Re, β , σ , χ , λ	Re+ χ + σ , β_1 + λ + σ , χ + λ + σ , χ + λ + β_2	[50]
Re-Nb-Mo	Re, β , σ , χ	χ + β + σ , Re+ χ	[51, 52]
Re-Nb-W	Re, β , σ , χ	χ + β + σ , Re+ χ	[53]
Re-Ta-Cr	Re, β , σ , χ , λ	Re+ χ + σ , χ + β_2 + σ , β_1 + β_2 + σ , β_1 + β_2 + λ	[54]
Re-Ta-Mo	Re, β , σ , χ	χ + β + σ , Re+ χ	[55]
Re-Ta-W	Re, β , σ , χ	χ + β + σ , Re+ χ	[56, 57]
Re-Cr-Mo	Re, β , σ , χ	Re+ χ + σ , β + σ	[3]
Re-Cr-W	Re, β , σ , χ	Re+ χ + σ , β_1 + β_2 + σ	[20, 25, 27]
Re-Mo-W	Re, β , σ , χ	Re+ χ , χ + σ , σ + β	[58, 59]

2. Полиэдрация изотермических сечений диаграмм фазовых равновесий четырехкомпонентных систем рения и переходных металлов V–VI групп

Определение фазовых равновесий в четырехкомпонентных системах рения и переходных металлов V–VI групп при 1375 К возможно осуществить путем полиэдрации изотермических сечений диаграмм фазовых равновесий систем с использованием метода графов [1–4]. В четырехкомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп при 1375 К в образовании всех фазовых равновесий принимают участие пять фаз, следовательно, для графического представления фазовых равновесий целесообразно использовать граф с пятью узлами, и только в случае, когда в системах имеется расслоение β -твердого раствора, – граф с шестью узлами.

Фазовые равновесия, устанавливающиеся при 1375 К в четырехкомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп, представлены в табл. 2.

В системе Re-V-Nb-Ta при 1375 К образуется одно трехфазное равновесие Re+ β + χ (рис. 1).

В четырехкомпонентных системах Re-V-Cr-Mo, Re-V-Cr-W, Re-Ta-Cr-Mo и Re-V-Mo-W при 1375 К в результате рекомбинации соответствующих трехфазных равновесий образуются две трехфазные области: Re+ χ + σ и Re+ β + σ (рис. 2). Трехфазное равновесие β_1 + β_2 + σ вырождается в четырехкомпонентных системах Re-V-Cr-W и Re-Ta-Cr-Mo в двухфазное равновесие β + σ , а трехфазное равновесие β_1 + β_2 + λ в четырехкомпонентной системе Re-Ta-Cr-Mo – в двухфазное равновесие β + λ .

В четырехкомпонентных системах Re-Nb-Ta-Mo, Re-Nb-Ta-W, Re-Nb-Mo-W и Re-Ta-Mo-W при 1375 К образуется единая трехфазная область χ + β + σ вследствие рекомбинации соответствующих трехфазных равновесий (рис. 3).

Фазовые равновесия, устанавливающиеся при 1375 К
в четырехкомпонентных системах рения
с переходными металлами V–VI групп

Система	Трехфазные равновесия			Четырех- фазные равновесия
	трехкомпонентных систем	вырожда- ющиеся	рекомбини- рующиеся	
1. Re-V-Nb-Ta	Re+β+χ, Re+β+χ		Re+β+χ	
2. Re-V-Nb-Cr	Re+β+χ, Re+β+σ, Re+χ+σ, β ₁ +λ+σ, χ+λ+σ, χ+λ+β ₂			Re+β+χ+σ; λ+β+χ+σ
3. Re-V-Nb-Mo	Re+β+χ, Re+β+σ, Re+χ+σ, χ+β+σ			Re+β+χ+σ
4. Re-V-Nb-W	Re+β+χ, Re+β+σ, Re+χ+σ, χ+β+σ			Re+β+χ+σ
5. Re-V-Ta-Cr	Re+β+χ, Re+β+σ, Re+χ+σ, χ+β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +λ	β ₁ +β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +λ		Re+β+χ+σ
6. Re-V-Ta-Mo	Re+β+χ, Re+β+σ, Re+χ+σ, χ+β+σ			Re+β+χ+σ
7. Re-V-Ta-W	Re+β+χ, Re+β+σ, Re+χ+σ, χ+β+σ			Re+β+χ+σ
8. Re-V-Cr-Mo	Re+β+σ, Re+β+σ, Re+χ+σ, Re+χ+σ		Re+β+σ, Re+χ+σ	
9. Re-V-Cr-W	Re+β+σ, Re+β+σ, Re+χ+σ, Re+χ+σ, β ₁ +β ₂ +σ	β ₁ +β ₂ +σ	Re+β+σ, Re+χ+σ	
10. Re-V-Mo-W	Re+β+σ, Re+χ+σ, Re+β+σ, Re+χ+σ		Re+χ+σ, Re+β+σ	
11. Re-Nb-Ta-Cr	Re+χ+σ; χ+β ₂ +σ; β ₁ +β ₂ +σ; β ₁ +β ₂ +λ; Re+χ+σ; β ₁ +λ+σ; χ+λ+σ; χ+λ+β ₂		Re+χ+σ	β ₁ +β ₂ +λ+σ; χ+β ₂ +λ+σ
12. Re-Nb-Ta-Mo	χ+β+σ, χ+β+σ		χ+β+σ	
13. Re-Nb-Ta-W	χ+β+σ, χ+β+σ		χ+β+σ	
14. Re-Nb-Cr-Mo	Re+χ+σ, β ₁ +λ+σ, χ+λ+σ, χ+λ+β ₂ , χ+β+σ, Re+χ+σ		Re+χ+σ	β+χ+λ+σ
15. Re-Nb-Cr-W	Re+χ+σ, β ₁ +λ+σ, χ+λ+σ, χ+λ+β ₂ , χ+β+σ, Re+χ+σ, β ₁ +β ₂ +λ		Re+χ+σ	β ₂ +χ+λ+σ; β ₁ +β ₂ +λ+σ
16. Re-Nb-Mo-W	χ+β+σ, χ+β+σ		χ+β+σ	
17. Re-Ta-Cr-Mo	Re+χ+σ, χ+β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +λ, χ+β+σ, Re+χ+σ, β ₁ +β ₂ +λ	β ₁ +β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +λ	Re+χ+σ, χ+β+σ	
18. Re-Ta-Cr-W	Re+χ+σ, χ+β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +λ, Re+χ+σ, β ₁ +β ₂ +σ, χ+β+σ, β ₁ +β ₂ +λ		Re+χ+σ, χ+β+σ, β ₁ +β ₂ +σ, β ₁ +β ₂ +λ	
19. Re-Ta-Mo-W	χ+β+σ, χ+β+σ		χ+β+σ	
20. Re-Cr-Mo-W	Re+χ+σ, Re+χ+σ, β ₁ +β ₂ +σ	β ₁ +β ₂ +σ	Re+χ+σ	

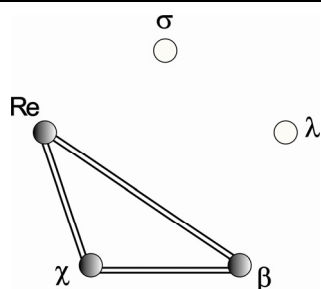


Рис. 1. Граф четырехкомпонентной системы Re-V-Nb-Ta при 1375 К

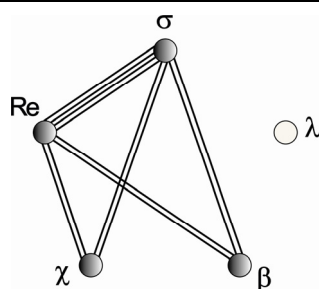


Рис. 2. Граф четырехкомпонентных систем Re-V-Cr-Mo, Re-V-Cr-W, Re-Ta-Cr-Mo и Re-V-Mo-W при 1375 К

В четырехкомпонентной системе Re-Cr-Mo-W при 1375 К образуется единая трехфазная область $Re+\chi+\sigma$ вследствие рекомбинации соответствующего трехфазного равновесия (рис. 4). Трехфазное равновесие $\beta_1+\beta_2+\sigma$ вырождается в четырехкомпонентной системе Re-Cr-Mo-W в двухфазное равновесие $\beta+\sigma$.

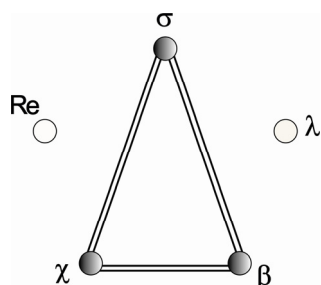


Рис. 3. Граф четырехкомпонентных систем Re-Nb-Ta-Mo, Re-Nb-Ta-W, Re-Nb-Mo-W и Re-Ta-Mo-W при 1375 К

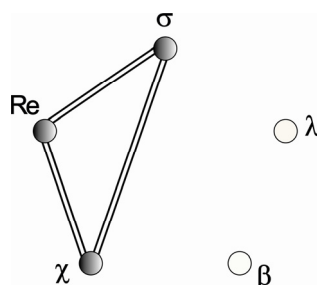


Рис. 4. Граф четырехкомпонентной системы Re-Cr-Mo-W при 1375 К

В четырехкомпонентной системе Re-Ta-Cr-W при 1375 К в результате рекомбинации соответствующих трехфазных равновесий образуются четыре трехфазные области: $Re+\chi+\sigma$, $\chi+\beta+\sigma$, $\beta_1+\beta_2+\sigma$ и $\beta_1+\beta_2+\lambda$ (рис. 5).

В четырехкомпонентных системах Re-V-Nb-Mo, Re-V-Nb-W, Re-V-Ta-Cr, Re-V-Ta-Mo и Re-V-Ta-W при 1375 К образуется единая четырехфазная область $Re+\beta+\chi+\sigma$ и четыре трехфазные области: $Re+\chi+\sigma$, $\chi+\beta+\sigma$, $\beta_1+\beta_2+\sigma$ и $\beta_1+\beta_2+\lambda$ – в результате рекомбинации соответствующих трехфазных равновесий (рис. 6). Трехфазные равновесия $\beta_1+\beta_2+\sigma$ и $\beta_1+\beta_2+\lambda$ вырождаются в четырехкомпонентной системе Re-V-Ta-Cr в двухфазные равновесия $\beta+\sigma$ и $\beta+\lambda$.

В четырехкомпонентной системе Re-V-Nb-Cr при 1375 К образуются два четырехфазных равновесия $Re+\beta+\chi+\sigma$, $\lambda+\beta+\chi+\sigma$ (рис. 7).

В четырехкомпонентных системах Re-Nb-Ta-Cr и Re-Nb-Cr-W при 1375 К образуются два четырехфазных равновесия: $Re+\beta+\chi+\sigma$ и $\lambda+\beta+\chi+\sigma$ – и одна трехфазная область $Re+\chi+\sigma$ в результате рекомбинации соответствующих трехфазных равновесий (рис. 8).

В четырехкомпонентной системе Re-Nb-Cr-Mo при 1375 К образуются одно четырехфазное равновесие $\lambda+\beta+\chi+\sigma$ и одна трехфазная область $Re+\chi+\sigma$ в результате рекомбинации соответствующих трехфазных равновесий (рис. 9).

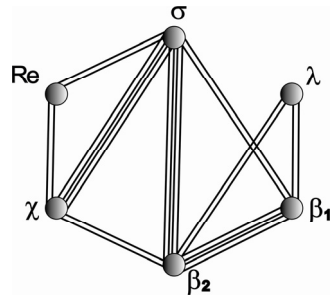


Рис. 5. Граф четырехкомпонентной системы Re-Ta-Cr-W при 1375 К

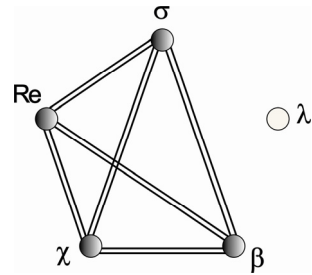


Рис. 6. Граф четырехкомпонентной системы Re-V-Nb-Mo, Re-V-Nb-W, Re-V-Ta-Cr, Re-V-Ta-Mo и Re-V-Ta-W при 1375 К

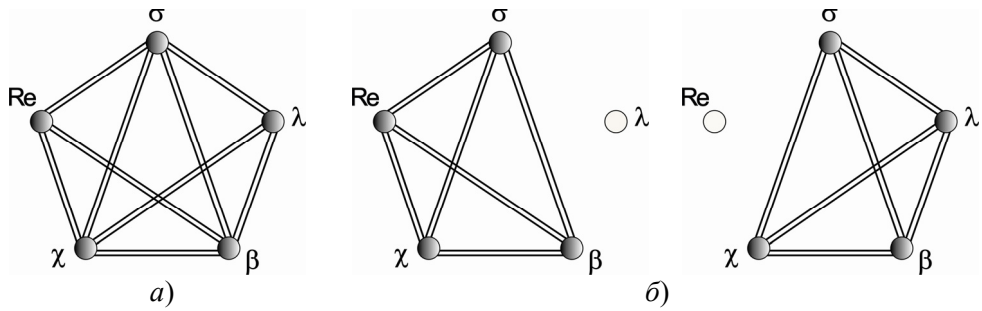


Рис. 7. Графы четырехкомпонентной системы Re-V-Nb-Cr при 1375 К: а – суммарный граф; б – графы четырехфазных равновесий

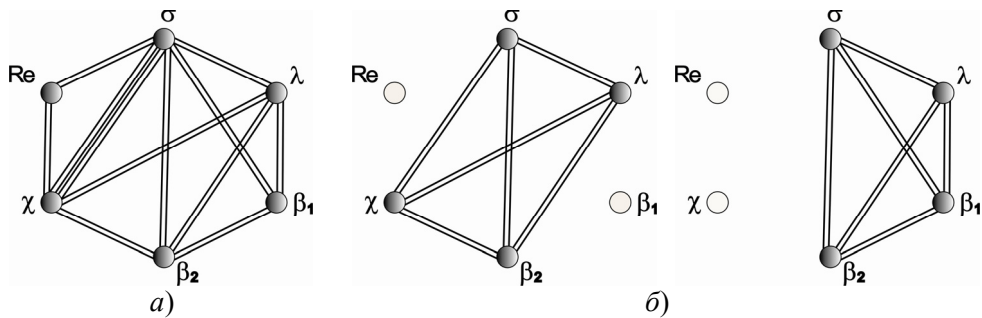


Рис. 8. Графы четырехкомпонентных систем Re-Nb-Ta-Cr и Re-Nb-Cr-W при 1375 К: а – суммарный граф; б – графы четырехфазных равновесий

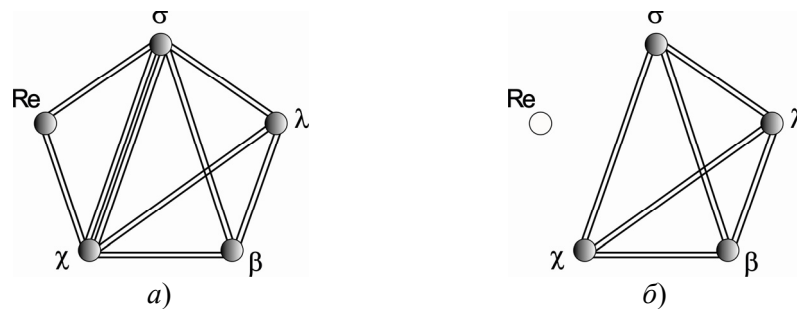


Рис. 9. Графы четырехкомпонентной системы Re-Nb-Cr-Mo при 1375 К: а – суммарный граф; б – граф четырехфазных равновесий

3. Полиэдрация изотермических сечений диаграмм фазовых равновесий пяти-, шести- и семикомпонентных систем рения и переходных металлов V–VI групп

Результаты полиэдрации изотермических сечений диаграмм фазовых равновесий пятикомпонентных систем рения с переходными металлами V–VI групп с использованием метода графов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Фазовые равновесия, устанавливающиеся при 1375 К в пятикомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп

Система	Четырехфазные равновесия			Пятифазные равновесия
	четырёхкомпонентных систем	вырождающиеся	рекомбинирующие	
1. Re-V-Nb-Ta-Cr	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$ $\sigma+Re+\beta+\chi$; $\beta_2+\sigma+\lambda+\chi$; $\lambda+\beta_1+\beta_2+\sigma$	$\lambda+\beta_1+\beta_2+\sigma$		–
2. Re-V-Nb-Ta-Mo	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+Re+\beta+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$	–
3. Re-V-Nb-Ta-W	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+Re+\beta+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$	–
4. Re-V-Nb-Cr-Mo	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$ $\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+\beta+\lambda+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$	–
5. Re-V-Nb-Cr-W	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$ $\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+\lambda+\beta_2+\chi$; $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$	$\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$	–
6. Re-V-Nb-Mo-W	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+Re+\beta+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$	–
7. Re-V-Ta-Cr-Mo	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+Re+\beta+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$	–
8. Re-V-Ta-Cr-W	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+Re+\beta+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$	–
9. Re-V-Ta-Mo-W	$\sigma+Re+\beta+\chi$; $\sigma+Re+\beta+\chi$		$\sigma+Re+\beta+\chi$	–
10. Re-V-Cr-Mo-W	–	–	–	–
11. Re-Nb-Ta-Cr-Mo	$\beta_2+\sigma+\lambda+\chi$; $\lambda+\beta_1+\beta_2+\sigma$ $\sigma+\beta+\lambda+\chi$	$\lambda+\beta_1+\beta_2+\sigma$	$\sigma+\beta+\lambda+\chi$	–
12. Re-Nb-Ta-Cr-W	$\beta_2+\sigma+\lambda+\chi$; $\lambda+\beta_1+\beta_2+\sigma$ $\sigma+\lambda+\beta_2+\chi$; $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$; $\sigma+\beta_1+\beta_2+\chi$	$\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$	$\beta+\sigma+\lambda+\chi$	–
13. Re-Nb-Ta-Mo-W	–	–	–	–
14. Re-Nb-Cr-Mo-W	$\sigma+\beta+\lambda+\chi$; $\sigma+\lambda+\beta_2+\chi$; $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$	$\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$	$\sigma+\lambda+\beta+\chi$	–
15. Re-Ta-Cr-Mo-W	–	–	–	–

В пятикомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп пятифазные равновесия отсутствуют.

В пятикомпонентных системах Re-V-Cr-Mo-W, Re-Nb-Ta-Mo-W и Re-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К четырехфазные равновесия отсутствуют.

В пятикомпонентных системах Re-V-Nb-Ta-Mo, Re-V-Nb-Ta-W, Re-V-Nb-Mo-W, Re-V-Ta-Cr-Mo, Re-V-Ta-Cr-W и Re-V-Ta-Mo-W при 1375 К образуется одно четырехфазное равновесие $\sigma+Re+\beta+\chi$.

В пятикомпонентных системах Re-Nb-Ta-Cr-Mo, Re-Nb-Ta-Cr-W и Re-Nb-Cr-Mo-W при 1375 К образуется одно четырехфазное равновесие $\sigma+\lambda+\beta+\chi$, а четырехфазное равновесие $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$, существующее в соответствующих четырехкомпонентных системах, в указанных пятикомпонентных системах вырождается в трехфазное равновесие $\sigma+\beta+\lambda$.

В пятикомпонентных системах Re-V-Nb-Ta-Cr, Re-V-Nb-Cr-Mo и Re-V-Nb-Cr-W при 1375 К образуются два четырехфазных равновесия: $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$ и $\sigma+\lambda+\beta+\chi$, а четырехфазное равновесие $\sigma+\beta_1+\beta_2+\lambda$, существующее в соответствующих четырехкомпонентных системах, в пятикомпонентных системах Re-V-Nb-Ta-Cr и Re-V-Nb-Cr-W вырождается в трехфазное равновесие $\sigma+\beta+\lambda$.

В шести шестикомпонентных системах рения с переходными металлами V–VI групп будут существовать только четырехфазные равновесия (табл. 4).

Таблица 4

Фазовые равновесия, устанавливающиеся при 1375 К
в шестикомпонентных системах рения
с переходными металлами V–VI групп

Система	Четырехфазные равновесия	
	пятикомпонентных систем	рекомбинирующиеся
1. Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\beta+\lambda+\chi$	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$
2. Re-V-Nb-Ta-Cr-W	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$
3. Re-V-Nb-Ta-Mo-W	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$
4. Re-V-Nb-Cr-Mo-W	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\lambda+\beta+\chi$	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$
5. Re-V-Ta-Cr-Mo-W	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$; $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$	$\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$
6. Re-Nb-Ta-Cr-Mo-W	$\sigma+\beta+\lambda+\chi$; $\beta+\sigma+\lambda+\chi$; $\sigma+\lambda+\beta+\chi$	$\sigma+\lambda+\beta+\chi$

В трех шестикомпонентных системах: Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo, Re-V-Nb-Ta-Cr-W и Re-V-Nb-Cr-Mo-W – при 1375 К образуются два четырехфазных равновесия: $\sigma+\text{Re}+\beta+\chi$ и $\sigma+\lambda+\beta+\chi$.

В двух шестикомпонентных системах: Re-V-Nb-Ta-Mo-W и Re-V-Ta-Cr-Mo-W – при 1375 К образуется одно четырехфазное равновесие $\sigma + \text{Re} + \beta + \chi$.

В шестикомпонентной системе Re-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К образуется одно четырехфазное равновесие $\sigma + \lambda + \beta + \chi$.

В семикомпонентной системе Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К существуют две четырехфазные области: $\sigma + \text{Re} + \beta + \chi$ и $\sigma + \lambda + \beta + \chi$, – образующиеся вследствие рекомбинации соответствующих четырехфазных равновесий.

Заключение

Таким образом, в семикомпонентной системе рения с переходными металлами V–VI групп при 1375 К существуют две четырехфазные области: $\sigma + \text{Re} + \beta + \chi$, $\beta + \sigma + \lambda + \chi$, а четырехфазное равновесие $\sigma + \beta_1 + \beta_2 + \lambda$, существовавшее в четырехкомпонентных системах, вырождается в трехфазное равновесие $\sigma + \beta + \lambda$ в системах большей мерности. В семикомпонентной системе Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К пяти-, шести- и семифазные равновесия отсутствуют.

Список литературы

1. **Слюсаренко, Е. М.** Взаимодействие фаз в многокомпонентных системах и его описание с помощью графов / Е. М. Слюсаренко // Тез. докл. Пятой Всесоюз. конф. по кристаллохимии интерметаллических соединений (Львов, 17–19 октября 1989 г.). – Львов : ЛГУ, 1989. – С. 94.
2. **Slyusarenko, E. M.** Analysis of the phase equilibria in multicomponent systems using graphs / E. M. Slyusarenko, E. Yu. Kerimov, M. V. Sofin // J. of Mendeleev Communication. – 1999. – № 2. – P. 56–59.
3. **Slyusarenko, E. M.** Determination of phase equilibria in the Ni-V-Cr-Mo-Re system at 1425 K using the graph method / E. M. Slyusarenko, V. A. Borisov, M. V. Sofin, E. Yu. Kerimov, A. E. Chastukhin // J. of Alloys and Compounds. – 1999. – Vol. 284. – P. 171–189.
4. **Sofin, M. V.** Determination of phase equilibria in the Ni-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W system at 1375 K using the graph method / M. V. Sofin, E. Yu. Kerimov, A. E. Chastukhin, N. A. Bazhanova, Yu. V. Balykova, E. M. Slyusarenko // J. of Alloys and Compounds. – 2001. – Vol. 321. – P. 102–131.
5. **Тылкина, М. А.** Современное состояние и перспективы работ по сплавам рения / М. А. Тылкина, Е. М. Савицкий // Рений в новой технике. – М. : Наука, 1970. – Ч. 2. – С. 5–21.
6. **Савицкий, Е. М.** Сплавы никеля с рением / Е. М. Савицкий, М. А. Тылкина, Е. П. Арская // Сплавы цветных металлов. – М. : Наука, 1972. – С. 220–229.
7. **Smith, J. F.** Nb-V (Niobium-Vanadium) / J. F. Smith, O. N. Carlson // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2779–2782.
8. **Smith, J. F.** Ta-V (Tantalum-Vanadium) / J. F. Smith, O. N. Carlson // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 3434–3438.
9. **Smith, J. F.** Cr-V (Chromium-Vanadium) / J. F. Smith // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1351–1352.
10. **Smith, J. F.** Mo-V (Molybdenum-Vanadium) / J. F. Smith // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2682–2684.
11. **Nagender Naidu, S. V.** V-W (Vanadium-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, M. Vijayakumar, P. Rama Rao // Binary Alloy Phase Diagrams,

- Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 3523–3524.
12. **Krishnan, R.** Nb-Ta (Niobium-Tantalum) / R. Krishnan, S. P. Garg, N. Krishnamurthy // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2772–2773.
 13. **Venkatraman, M.** Cr-Nb (Chromium-Niobium) / M. Venkatraman, J. P. Neumann // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1298–1299.
 14. **Brewer, L.** Mo-Nb (Molybdenum-Niobium) / L. Brewer, R. H. Lamoreaux // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2631–2634.
 15. **Nagender Naidu, S. V.** Nb-W (Niobium-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2782–2783.
 16. **Venkatraman, M.** Cr-Ta (Chromium-Tantalum) / M. Venkatraman, J. P. Neumann // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1338–1340.
 17. **Krishnan, R.** Mo-Ta (Molybdenum-Tantalum) / R. Krishnan, S. P. Garg, N. Krishnamurthy // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2671–2672.
 18. **Krishnan, R.** Ta-W (Tantalum-Tungsten) / R. Krishnan, S. P. Garg, N. Krishnamurthy // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 3438–3439.
 19. **Venkatraman, M.** Cr-Mo (Chromium-Molybdenum) / M. Venkatraman, J. P. Neumann // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1293–1294.
 20. **Nagender Naidu, S. V.** Cr-W (Chromium-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1353–1354.
 21. **Nagender Naidu, S. V.** Mo-W (Molybdenum-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2682–2686.
 22. **Smith, J. F.** The Re-V (Rhenium-Vanadium) system / J. F. Smith // Journal of Alloy Phase Diagrams – 1988. – Vol. 4. – P. 199–203.
 23. **Massalski, T. B.** Nb-Re (Niobium-Rhenium) / T. B. Massalski // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2756–2757.
 24. **Brophy, J. H.** The Tantalum-Rhenium System / J. H. Brophy, P. Schwarzkopf, J. Wulff // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. – 1960. – Vol. 218. – P. 910–914.
 25. **Савицкий, Е. М.** Фазовая диаграмма системы хром–рений / Е. М. Савицкий, М. А. Тылкина, К. Б. Поварова // Журнал неорганической химии. – 1959. – Т. 4, № 8. – С. 873–874.
 26. **Савицкий, Е. М.** Фазовая диаграмма системы рений–молибден / Е. М. Савицкий, М. А. Тылкина, К. Б. Поварова // Журнал неорганической химии. – 1959. – Т. 4, № 2. – С. 424–434.
 27. **Williams, R. K.** Irradiation Induced Precipitation in Tungsten Based, W-Re Alloys / R. K. Williams, E. W. Wiffen, J. Bentley, J. O. Stiegler // Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 1983. – Vol. 14. – P. 655–666.

28. **Нефедов, А. П.** О диаграммах состояния тройных систем V-Ta-Nb и V-Ta-Mo / А. П. Нефедов, Е. М. Соколовская, А. Т. Григорьев, И. Г. Соколова // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1965. – Т. 1, № 5. – С. 715–720.
29. **Yoshida, M.** Phase relation and microstructure of Nb-Cr-V and Nb-Cr-Mo alloy systems / M. Yoshida, T. Takasugi // Materials Science and Engineering. – 1997. – А. 224. – Р. 69–76.
30. **Chu, F.** Phase stability and defect structure of the C15 Laves phase Nb(Cr,V)₂ / F. Chu, D. J. Thoma, P. G. Kotula, S. Gerstl, T. E. Mitchell, I. M. Anderson, J. Bentley // Acta Mater. – 1998. – Vol. 46, № 5. – С. 1759–1769.
31. **Барон, В. В.** Диаграммы состояния и некоторые свойства сплавов системы ниобий–молибден–ванадий / В. В. Барон, К. Н. Иванова, Е. М. Савицкий // Изв. АН СССР. Отд. техн. н. Металлургия и топлива. – 1960. – № 4. – С. 143–149.
32. **Федоров, Д. В.** Взаимодействие хрома с танталом и ванадием / Д. В. Федоров, Л. Л. Мешков // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 1984. – Т. 25, № 6. – С. 579–583.
33. **Гузей, Л. С.** Исследование превращений в твердом состоянии в системе тантал–ванадий–вольфрам / Л. С. Гузей, Е. М. Соколовская, И. Г. Соколова, Г. В. Высоцкая, Г. Н. Ронами, С. М. Кузнецова // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 1968. – № 3. – С. 62–65.
34. **Федоров, Д. В.** Изотермическое сечение тройной системы хром–ниобий–тантал при 1000 °С / Д. В. Федоров, Г. П. Муравьева, Л. Л. Мешков // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 1984. – Т. 25, № 3. – С. 269–271.
35. **Пряхина, Л. И.** Исследование сплавов системы молибден–ниобий–тантал / Л. И. Пряхина, Р. С. Полякова, В. Г. Громова, К. П. Мясникова, О. В. Ожимкова // Металловедение цветных металлов и сплавов. – М. : Наука, 1972. – С. 27–31.
36. **Пряхина, Л. И.** Исследование сплавов системы W-Nb-Ta / Л. И. Пряхина, Р. С. Полякова, В. Г. Громова, К. П. Мясникова, О. В. Ожимкова // Изв. АН СССР. Металлы. – 1971. – № 6. – С. 175–178.
37. **Борисов, В. А.** Фазовые равновесия в системе Cr-Mo-Ni-V при 1425 К / В. А. Борисов, Е. М. Слюсаренко, С. Ф. Дунаев, А. П. Бабкин // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 1995. – Т. 36, № 6. – С. 564–569.
38. **Прокошкин, Д. А.** Изотермическое сечение при 1200 °С диаграммы состояния ниобий–молибден–хром / Д. А. Прокошкин, М. И. Захарова // Исследования по жаропрочным сплавам. – М. : АН СССР, 1962. – Т. 8. – С. 70–74.
39. **Свечников, В. Н.** Диаграммы фазовых равновесий систем хром–ниобий–молибден / В. Н. Свечников, Г. Ф. Гобзенко // Фазовые превращения в металлах и сплавах. – Киев : Наукова думка, 1965. – С. 147–158.
40. **Прокофьев, Д. И.** Фазовая диаграмма ниобиевого угла системы Nb-W-Cr / Д. И. Прокофьев // Изв. АН СССР. Металлы. – 1975. – № 1. – С. 206–210.
41. **English, J. J.** Binary and Ternary Phase Diagrams of Niobium, Molybdenum and Tungsten / J. J. English // Available as NTIS Document AD. – 1961. – № 257. – Р. 739.
42. **Савицкий, Е. М.** Диаграммы плавкости и некоторые свойства сплавов системы ниобий–молибден–вольфрам / Е. М. Савицкий, В. В. Барон, К. Н. Иванова // Изв. АН СССР. Отд. техн. н. Металлургия и топливо. – 1962. – № 2. – С. 119–125.
43. **Пряхина, Л. И.** Исследование сплавов системы W-Mo-Ta / Л. И. Пряхина, Р. С. Полякова, В. Г. Громова, К. П. Мясникова, О. В. Ожимкова // Изв. АН СССР. Металлы. – 1971. – № 2. – С. 180–182.
44. **Kaufman, L.** Calculation of superalloy phase diagrams: part IV / L. Kaufman, H. Nesor // Met. Trans. – 1975. – А. 6, № 11. – Р. 2123–2131.
45. **Frisk, K.** An assessment of the Cr-Mo-W system / K. Frisk, P. Gustafson // CALPHAD. – 1988. – № 3. – Р. 247–254.
46. **Смолянинова, Э. А.** Диаграммы фазовых равновесий тройных систем рения с ванадием, ниобием и молибденом / Э. А. Смолянинова, Е. К. Стрибук, В. И. Тьявловский // Изв. АН СССР. Металлы. – 1987. – № 3. – С. 207–209.

47. **Николаев, С. В.** Фазовые равновесия в тройной системе Ta-V-Re при 1375 К / С. В. Николаев, Д. Н. Аржников, Ю. В. Балыкова, Э. Ю. Керимов, К. Б. Калмыков, Е. М. Слюсаренко // IX Междунар. Курнаковское совещание по физико-химическому анализу : тез. докл. (Пермь, 5–9 июля 2010 г.). – Пермь : Пермский гос. ун-т, 2010. – С. 229.
48. **English, J. J.** Tantalum–Rhenium–Vanadium System, Binary and Ternary Phase Diagrams of Cb, Mo, Ta, and W / J. J. English // DMIC Rep. – 1961. – Vol. 152. – P. 177–178.
49. **Тылкина, М. А.** Диаграмма состояния Ta-Nb-Re / М. А. Тылкина, Е. М. Савицкий, В. Е. Аллюшин // Изв. АН СССР. Металлы. – 1973. – № 4. – С. 225–229.
50. **Балыкова, Ю. В.** Изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий системы Cr-Nb-Re при 1375 К / Ю. В. Балыкова, С. В. Николаев, Э. Ю. Керимов, Е. М. Слюсаренко // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 2012. – № 6. – С. 380–385.
51. **Николаев, С. В.** Изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий трехкомпонентной системы Mo-Nb-Re при 1375 К / С. В. Николаев, Р. Х. Шаипов // Менделеев-2012. Неорганическая химия. Шестая Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием : тез. докл. – СПб. : Соло, 2012. – С. 275.
52. **Цагараева, Э. А.** Изотермическое сечение системы молибден–рений–ниобий при 1700 °С / Э. А. Цагараева, Е. М. Соколовская, М. В. Раевская, И. Г. Соколова, С. В. Кабанов // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 1985. – Т. 26, № 4. – С. 424–425.
53. **Савицкий, Е. М.** Тройные фазовые диаграммы систем W-Re-(Ru, Ir, Nb) / Е. М. Савицкий, М. А. Тылкина, Л. Л. Жданова // Исследование и применение сплавов рения. – М. : Наука, 1975. – С. 42–47.
54. **Балыкова, Ю. В.** Изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий системы Cr-Ta-Re при 1375 К / Ю. В. Балыкова, С. В. Николаев, Э. Ю. Керимов, Е. М. Слюсаренко // Вестн. Моск. ун-та. Химия. – 2013. – № 4. (Принято к печати).
55. **Трегубов, И. А.** Исследование диаграммы состояния Re-Ta-Mo / И. А. Трегубов, Л. Н. Евсеева, О. С. Иванов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1977. – № 2. – С. 213–218.
56. **Brophy, J. H.** The Ta-W-Re system / J. H. Brophy, M. H. Kamdar, J. Wulff // Trans. Metall. Soc. – 1961. – A. 221. – P. 1137–1140.
57. **Трегубов, И. А.** Изучение диаграммы состояния W-Ta-Re методом диффузионных слоев / И. А. Трегубов, Л. Н. Евсеева, О. С. Иванов, И. Д. Марчукова // Изв. АН СССР. Металлы. – 1973. – № 1. – С. 199–204.
58. **Тылкина, М. А.** Тройные твердые растворы в системе вольфрам–молибден–рений / М. А. Тылкина, К. Б. Поварова, Е. М. Савицкий // Журнал неорган. химии. – 1960. – Т. 5, № 11. – С. 2458–2461.
59. **Савицкий, Е. М.** Диаграмма состояния систем Re-W-Mo(Nb, Ta) и свойства некоторых сплавов / Е. М. Савицкий, М. А. Тылкина, О. Х. Хамидов // Изв. АН ТаджССР. Отд. физ.-матем. и геол.-хим. н. – 1968. – № 4 (30). – С. 41–46.

References

1. **Slyusarenko, E. M.** Vzaimodeystvie faz v mnogokomponentnykh sistemakh i ego opisanie s pomoshch'yu grafov / E. M. Slyusarenko // Tez. dokl. Pyatoy Vsesoyuz. konf. po kristalloghimii intermetallicheskih soedineniy (L'vov, 17–19 oktyabrya 1989 g.). – L'vov : LGU, 1989. – S. 94.
2. **Slyusarenko, E. M.** Analysis of the phase equilibria in multicomponent systems using graphs / E. M. Slyusarenko, E. Yu. Kerimov, M. V. Sofin // J. of Mendeleev Communication. – 1999. – № 2. – P. 56–59.
3. **Slyusarenko, E. M.** Determination of phase equilibria in the Ni-V-Cr-Mo-Re system at 1425 K using the graph method / E. M. Slyusarenko, V. A. Borisov, M. V. Sofin, E. Yu. Kerimov, A. E. Chastukhin // J. of Alloys and Compounds. – 1999. – Vol. 284. – P. 171–189.

4. **Sofin, M. V.** Determination of phase equilibria in the Ni-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W system at 1375 K using the graph method / M. V. Sofin, E. Yu. Kerimov, A. E. Chastukhin, N. A. Bazhanova, Yu. V. Balykova, E. M. Slyusarenko // *J. of Alloys and Compounds*. – 2001. – Vol. 321. – P. 102–131.
5. **Tylkina, M. A.** Sovremennoe sostoyanie i perspektivy rabot po splavam reniya / M. A. Tylkina, E. M. Savitskiy // *Reniy v novoy tekhnike*. – M. : Nauka, 1970. – Ch. 2. – C. 5–21.
6. **Savitskiy, E. M.** Splavy nikelya s reniem / E. M. Savitskiy, M. A. Tylkina, E. P. Arskaya // *Splavy tsvetnykh metallov*. – M. : Nauka, 1972. – S. 220–229.
7. **Smith, J. F.** Nb-V (Niobium-Vanadium) / J. F. Smith, O. N. Carlson // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2779–2782.
8. **Smith, J. F.** Ta-V (Tantalum-Vanadium) / J. F. Smith, O. N. Carlson // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 3434–3438.
9. **Smith, J. F.** Cr-V (Chromium-Vanadium) / J. F. Smith // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1351–1352.
10. **Smith, J. F.** Mo-V (Molybdenum-Vanadium) / J. F. Smith // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2682–2684.
11. **Nagender Naidu, S. V.** V-W (Vanadium-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, M. Vijayakumar, P. Rama Rao // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 3523–3524.
12. **Krishnan, R.** Nb-Ta (Niobium-Tantalum) / R. Krishnan, S. P. Garg, N. Krishnamurthy // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2772–2773.
13. **Venkatraman, M.** Cr-Nb (Chromium-Niobium) / M. Venkatraman, J. P. Neumann // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1298–1299.
14. **Brewer, L.** Mo-Nb (Molybdenum-Niobium) / L. Brewer, R. H. Lamoreaux // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2631–2634.
15. **Nagender Naidu, S. V.** Nb-W (Niobium-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2782–2783.
16. **Venkatraman, M.** Cr-Ta (Chromium-Tantalum) / M. Venkatraman, J. P. Neumann // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1338–1340.
17. **Krishnan, R.** Mo-Ta (Molybdenum-Tantalum) / R. Krishnan, S. P. Garg, N. Krishnamurthy // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2671–2672.
18. **Krishnan, R.** Ta-W (Tantalum-Tungsten) / R. Krishnan, S. P. Garg, N. Krishnamurthy // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 3438–3439.
19. **Venkatraman, M.** Cr-Mo (Chromium-Molybdenum) / M. Venkatraman, J. P. Neumann // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1293–1294.
20. **Nagender Naidu, S. V.** Cr-W (Chromium-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // *Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition* / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 2. – P. 1353–1354.

21. **Nagender Naidu, S. V.** Mo-W (Molybdenum-Tungsten) / S. V. Nagender Naidu, A. M. Sriramamurthy, P. Rama Rao // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2682–2686.
22. **Smith, J. F.** The Re-V (Rhenium-Vanadium) system / J. F. Smith // Journal of Alloy Phase Diagrams – 1988. – Vol. 4. – P. 199–203.
23. **Massalski, T. B.** Nb-Re (Niobium-Rhenium) / T. B. Massalski // Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition / ed. T. B. Massalski, ASM International, Materials Park, Ohio. – 1990. – Vol. 3. – P. 2756–2757.
24. **Brophy, J. H.** The Tantalum-Rhenium System / J. H. Brophy, P. Schwarzkopf, J. Wulff // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. – 1960. – Vol. 218. – P. 910–914.
25. **Savitskiy, E. M.** Fazovaya diagramma sistemy khrom–reniy / E. M. Savitskiy, M. A. Tylkina, K. B. Povarova // Zhurnal neorgan. khimii. – 1959. – T. 4, № 8. – S. 873–874.
26. **Savitskiy, E. M.** Fazovaya diagramma sistemy reniy–molibden / E. M. Savitskiy, M. A. Tylkina, K. B. Povarova // Zhurnal neorgan. khimii. – 1959. – T. 4, № 2. – S. 424–434.
27. **Williams, R. K.** Irradiation Induced Precipitation in Tungsten Based, W-Re Alloys / R. K. Williams, E. W. Wiffen, J. Bentley, J. O. Stiegler // Metallurgical Transactions, Section A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 1983. – Vol. 14. – P. 655–666.
28. **Nefedov, A. P.** O diagrammakh sostoyaniya troynykh sistem V-Ta-Nb i V-Ta-Mo / A. P. Nefedov, E. M. Sokolovskaya, A. T. Grigor'ev, I. G. Sokolova // Izv. AN SSSR. Neorgan. materialy. – 1965. – T. 1, № 5. – S. 715–720.
29. **Yoshida, M.** Phase relation and microstructure of Nb-Cr-V and Nb-Cr-Mo alloy systems / M. Yoshida, T. Takasugi // Materials Science and Engineering. – 1997. – A. 224. – P. 69–76.
30. **Chu, F.** Phase stability and defect structure of the C15 Laves phase Nb(Cr,V)₂ / F. Chu, D. J. Thoma, P. G. Kotula, S. Gerstl, T. E. Mitchell, I. M. Anderson, J. Bentley // Acta Mater. – 1998. – Vol. 46, № 5. – S. 1759–1769.
31. **Baron, V. V.** Diagrammy sostoyaniya i nekotorye svoystva splavov sistemy niobiy–molibden–vanadiy / V. V. Baron, K. N. Ivanova, E. M. Savitskiy // Izv. AN SSSR. Otd. tekhn. n. Metallurgiya i topliva. – 1960. – № 4. – S. 143–149.
32. **Fedorov, D. V.** Vzaimodeystvie khroma s tantalom i vanadiem / D. V. Fedorov, L. L. Meshkov // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 1984. – T. 25, № 6. – S. 579–583.
33. **Guzey, L. S.** Issledovanie prevrashcheniy v tverdom sostoyanii v sisteme tantal–vanadiy–vol'fram / L. S. Guzey, E. M. Sokolovskaya, I. G. Sokolova, G. V. Vysotskaya, G. N. Ronami, S. M. Kuznetsova // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 1968. – № 3. – S. 62–65.
34. **Fedorov, D. V.** Izotermicheskoe sechenie troynoy sistemy khrom–niobiy–tantal pri 1000 °S / D. V. Fedorov, G. P. Murav'eva, L. L. Meshkov // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 1984. – T. 25, № 3. – S. 269–271.
35. **Pryakhina, L. I.** Issledovanie splavov sistemy molibden–niobiy–tantal / L. I. Pryakhina, R. S. Polyakova, V. G. Gromova, K. P. Myasnikova, O. V. Ozhimkova // Metallovedenie tsvetnykh metallov i splavov. – M. : Nauka, 1972. – S. 27–31.
36. **Pryakhina, L. I.** Issledovanie splavov sistemy W-Nb-Ta / L. I. Pryakhina, R. S. Polyakova, V. G. Gromova, K. P. Myasnikova, O. V. Ozhimkova // Izv. AN SSSR. Metally. – 1971. – № 6. – S. 175–178.
37. **Borisov, V. A.** Fazovye ravnovesiya v sisteme Cr-Mo-Ni-V pri 1425 K / V. A. Borisov, E. M. Slyusarenko, S. F. Dunaev, A. P. Babkin // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 1995. – T. 36, № 6. – S. 564–569.
38. **Prokoshkin, D. A.** Izotermicheskoe sechenie pri 1200 °S diagrammy sostoyaniya niobiy–molibden–khrom / D. A. Prokoshkin, M. I. Zakharova // Issledovaniya po zharoprochnym splavam. – M. : AN SSSR, 1962. – T. 8. – S. 70–74.

39. **Svechnikov, V. N.** Diagrammy fazovykh ravnovesiy sistem khrom–niobiy–molibden / V. N. Svechnikov, G. F. Gobzenko // Fazovye prevrashcheniya v metallakh i splavakh. – Kiev : Naukova dumka, 1965. – S. 147–158.
40. **Prokof'ev, D. I.** Fazovaya diagramma niobievogo ugla sistemy Nb-W-Cr / D. I. Prokof'ev // Izv. AN SSSR. Metally. – 1975. – № 1. – S. 206–210.
41. **English, J. J.** Binary and Ternary Phase Diagrams of Niobium, Molybdenum and Tungsten / J. J. English // Available as NTIS Document AD. – 1961. – № 257. – P. 739.
42. **Savitskiy, E. M.** Diagrammy plavkosti i nekotorye svoystva splavov sistemy niobiy–molibden–vol'fram / E. M. Savitskiy, V. V. Baron, K. N. Ivanova // Izv. AN SSSR. Otd. tekhn. n. Metallurgiya i toplivo. – 1962. – № 2. – S. 119–125.
43. **Pryakhina, L. I.** Issledovanie splavov sistemy W-Mo-Ta / L. I. Pryakhina, R. S. Polyakova, V. G. Gromova, K. P. Myasnikova, O. V. Ozhimkova // Izv. AN SSSR. Metally. – 1971. – № 2. – C. 180–182.
44. **Kaufman, L.** Calculation of superalloy phase diagrams: part IV / L. Kaufman, H. Nesor // Met. Trans. – 1975. – A. 6, № 11. – P. 2123–2131.
45. **Frisk, K.** An assessment of the Cr-Mo-W system / K. Frisk, P. Gustafson // CALPHAD. – 1988. – № 3. – P. 247–254.
46. **Smol'yaninova, E. A.** Diagrammy fazovykh ravnovesiy troynykh sistem reniya s vanadiem, niobiem i molibdenom / E. A. Smol'yaninova, E. K. Stribuk, V. I. Tyavlovskiy // Izv. AN SSSR. Metally. – 1987. – № 3. – S. 207–209.
47. **Nikolaev, S. V.** Fazovye ravnovesiya v troynoy sisteme Ta-V-Re pri 1375 K / S. V. Nikolaev, D. N. Arzhnikov, Yu. V. Balykova, E. Yu. Kerimov, K. B. Kalmykov, E. M. Slyusarenko // IX Mezhdunar. Kurnakovskoe soveshchanie po fiziko-khimicheskomu analizu : tez. dokl. (Perm', 5–9 iyulya 2010 g.). – Perm' : Permskiy gos. un-t, 2010. – S. 229.
48. **English, J. J.** Tantalum–Rhenium–Vanadium System, Binary and Ternary Phase Diagrams of Cb, Mo, Ta, and W / J. J. English // DMIC Rep. – 1961. – Vol. 152. – P. 177–178.
49. **Tylkina, M. A.** Diagramma sostoyaniya Ta-Nb-Re / M. A. Tylkina, E. M. Savitskiy, V. E. Alyushin // Izv. AN SSSR. Metally. – 1973. – № 4. – S. 225–229.
50. **Balykova, Yu. V.** Izotermicheskoe sechenie diagrammy fazovykh ravnovesiy sistemy Cr-Nb-Re pri 1375 K / Yu. V. Balykova, S. V. Nikolaev, E. Yu. Kerimov, E. M. Slyusarenko // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 2012. – № 6. – S. 380–385.
51. **Nikolaev, S. V.** Izotermicheskoe sechenie diagrammy fazovykh ravnovesiy trekhkomponentnoy sistemy Mo-Nb-Re pri 1375 K / S. V. Nikolaev, R. Kh. Shaipov // Mendeleev-2012. Neorganicheskaya khimiya. Shestaya Vseros. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov s mezhdunar. uchastiem : tez. dokl. – SPb. : Solo, 2012. – S. 275.
52. **Tsagaraeva, E. A.** Izotermicheskoe sechenie sistemy molibden–reniy–niobiy pri 1700 °S / E. A. Tsagaraeva, E. M. Sokolovskaya, M. V. Raevskaya, I. G. Sokolova, S. V. Kabanov // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 1985. – T. 26, № 4. – S. 424–425.
53. **Savitskiy, E. M.** Troynye fazovye diagrammy sistem W-Re-(Ru, Ir, Nb) / E. M. Savitskiy, M. A. Tylkina, L. L. Zhdanova // Issledovanie i primeneniye splavov reniya. – M. : Nauka, 1975. – S. 42–47.
54. **Balykova, Yu. V.** Izotermicheskoe sechenie diagrammy fazovykh ravnovesiy sistemy Cr-Ta-Re pri 1375 K / Yu. V. Balykova, S. V. Nikolaev, E. Yu. Kerimov, E. M. Slyusarenko // Vestn. Mosk. un-ta. Khimiya. – 2013. – № 4. (Prinyato k pečati).
55. **Tregubov, I. A.** Issledovanie diagrammy sostoyaniya Re-Ta-Mo / I. A. Tregubov, L. N. Evseeva, O. S. Ivanov // Izv. AN SSSR. Metally. – 1977. – № 2. – S. 213–218.
56. **Brophy, J. H.** The Ta-W-Re system / J. H. Brophy, M. H. Kamdar, J. Wulff // Trans. Metall. Soc. – 1961. – A. 221. – P. 1137–1140.
57. **Tregubov, I. A.** Izuchenie diagrammy sostoyaniya W-Ta-Re metodom diffuzionnykh sloev / I. A. Tregubov, L. N. Evseeva, O. S. Ivanov, I. D. Marchukova // Izv. AN SSSR. Metally. – 1973. – № 1. – S. 199–204.

58. **Tylkina, M. A.** Troynye tverdye rastvory v sisteme vol'fram–molibden–reniy / M. A. Tylkina, K. B. Povarova, E. M. Savitskiy // Zhurnal neorgan. khimii. – 1960. – Т. 5, № 11. – S. 2458–2461.
59. **Savitskiy, E. M.** Diagramma sostoyaniya sistem Re-W-Mo(Nb, Ta) i svoystva nekotorykh splavov / E. M. Savitskiy, M. A. Tylkina, O. Kh. Khamidov // Izv. AN TadzhSSR. Otd. fiz.-matem. i geol.-khim. n. – 1968. – № 4 (30). – S. 41–46.
-

Балыкова Юлия Валентиновна

младший научный сотрудник, кафедра общей химии, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3)

E-mail: yubalykova@yandex.ru

Balykova Yuliya Valentinovna

Junior researcher, sub-department of general chemistry, Moscow State University named after M. V. Lomonosov (Moscow, 1 Leninskiye Gory, building 3)

Керимов Эльшат Юсифович

кандидат химических наук, доцент, докторант, кафедра общей химии, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3)

E-mail: eukr@yandex.ru

Kerimov El'shat Yusifovich

Candidate of chemical sciences, associate professor, doctoral student, sub-department of general chemistry, Moscow State University named after M. V. Lomonosov (Moscow, 1 Leninskiye Gory, building 3)

Николаев Семен Владимирович

аспирант, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3)

E-mail: semen-nikolaev@inbox.ru

Nikolaev Semen Vladimirovich

Postgraduate student, Moscow State University named after M. V. Lomonosov (Moscow, 1 Leninskiye Gory, building 3)

Слюсаренко Евгений Михайлович

доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, кафедра общей химии, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3)

E-mail: slusarenko@laincom.chem.msu.ru

Slyusarenko Evgeniy Mikhaylovich

Doctor of chemical sciences, leading researcher, sub-department of general chemistry, Moscow State University named after M. V. Lomonosov (Moscow, 1 Leninskiye Gory, building 3)

УДК 544.344.015.35:544.344.9:546.719'75'88

Балыкова, Ю. В.

Определение фазовых равновесий в системе Re-V-Nb-Ta-Cr-Mo-W при 1375 К с использованием метода графов / Ю. В. Балыкова, Э. Ю. Керимов, С. В. Николаев, Е. М. Слюсаренко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2013. – № 1 (1). – С. 111–126.