

УДК 544.344.015.3:544.344.3:546.74:546.76:546.883

## ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ НИКЕЛЬ–ХРОМ–ТАНТАЛ ПРИ 1375 К

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

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

Методом равновесных сплавов построено изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий системы Ni–Cr–Ta при 1375 К и установлено существование шести трехфазных равновесий  $\gamma\text{-Ni}+\beta\text{-Cr}+\alpha$ ;  $\beta\text{-Cr}+\alpha+\lambda$ ;  $\alpha+\lambda+\text{Ni}_2\text{Ta}$ ;  $\lambda+\text{Ni}_2\text{Ta}+\mu$ ;  $\mu+\lambda+\text{NiTa}_2$  и  $\lambda+\text{NiTa}_2+\beta\text{-Ta}$ . Показано, что в двойной фазе Лавеса индицируются как кубическая, так и гексагональная модификации.

**Ключевые слова:** никель, хром, тантал, фазовые равновесия.

В настоящее время интерес к материалам на основе танталовых сплавов резко возрос вследствие их высокой химической стойкости и жаропрочности в инертной среде. Кроме того, при легировании танталом жаростойких никельхромовых сплавов существенно повышается их жаропрочность.

Характер физико-химического взаимодействия компонентов в любом материале и его свойства определяются равновесной диаграммой фазовых равновесий, которая включает все компоненты, входящие в состав материала. Сведения о ее строении являются крайне важными для прогнозирования возможности создания того или иного материала. Несмотря на интенсивные исследования диаграмм фазовых равновесий на основе никеля, система Ni–Cr–Ta до сих пор не была изучена.

Цель данной работы – исследование взаимодействия тантала с никелем и хромом и определение комплексом методов физико-химического анализа состава и структуры фаз в сплавах, находящихся в равновесии при 1375 К.

### Двойные диаграммы фазовых равновесий Ni–Cr, Ni–Ta и Cr–Ta

В системе Ni–Cr интерметаллические соединения не образуются. При 1375 К никель растворяет до 47 ат.% Cr, а хром – до 12 ат.% Ni [1].

В системе Ta–Cr взаимодействие тантала с хромом при 1375 К приводит к образованию фазы Лавеса  $\text{TaCr}_2$  с кубической структурой ( $\text{MgCu}_2$ ), содержащей 33–37 ат.% Ta. При более высокой температуре наблюдается переход кубической структуры в гексагональную (типа  $\text{MgZn}_2$ ) [2]. Данные по температуре перехода весьма противоречивы и лежат в интервале 1700–2100 К. Указывается также на образование других структурных типов этого соединения ( $\text{MgNi}_2$ ,  $\text{NiTi}_2$ ) [3, 4]. Растворимость хрома в тантале составляет 5 ат.%. Растворимость тантала в хrome – не более 2–3 ат.%.

В системе Ni–Ta при 1375 К наблюдается образование четырех интерметаллических соединений:  $\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$ ,  $\text{Ni}_2\text{Ta}$ ,  $\text{Ni}_{6,5}\text{Ta}_{6,5}$  и  $\text{NiTa}_2$  [5]. Фаза  $\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$  изоструктурна соединению  $\text{NbPt}_3$ . В присутствии небольших примесей кислорода фаза может кристаллизоваться с образованием других плотноупакованных структур ( $\text{Mg}$ ,  $\text{Cu}_3\text{Ti}$ ,  $\text{TiAl}_3$ ) [6]. Фаза  $\text{Ni}_2\text{Ta}$  изоструктурна  $\text{MoSi}_2$ . Соединение  $\text{Ni}_{6,5}\text{Ta}_{6,5}$  относится к  $\mu$ -фазам. Структура  $\mu$ -фаз состоит из чередующихся гексагональных слоев фаз Лавеса и слоев фазы  $\text{Al}_3\text{Zr}_4$ . Кристаллическая структура  $\text{NiTa}_2$  относится к структурному типу  $\text{CuAl}_2$ . Растворимость тантала в никеле при 1375 К достигает 12 ат.%, никеля в тантале – 2 ат.%. [5]. В одной из работ [7] указывается на возможность образования фазы  $\text{Ta}_5\text{Ni}$ , относящейся к структурному типу  $\text{NiTi}_2$ .

### Экспериментальная часть

Для получения образцов использовали никель и хром электролитические, тантал электронно-лучевой плавки.

Сплавы готовили в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере аргона с восьмикратным переплавом. Полученные сплавы отжигали в печах сопротивления при температуре  $1375\pm 5$  К в течение 1000 ч.

Отожженные образцы монтировали в обоймы с помощью сплава Вуда, затем шлифовали наждачной бумагой разной зернистости и полировали алмазной пастой разной абразивности.

Микроструктуру реакционных зон в диффузионных парах и микроструктуру сплавов исследовали на сканирующем электронном микроскопе «LEO EVO 50XVP» при ускоряющем напряжении 20 кВ с использованием детектора обратно рассеянных электронов «QBSD».

Количественный состав фаз определяли с помощью энергодисперсионного спектрометра «INCA ENERGY 500» при том же ускоряющем напряжении.

Рентгенофазовый анализ проводили методом порошковой дифрактометрии на приборе «STOE STADI P» с использованием излучения  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ . Дифрактометр оборудован изогнутым по Иоганну  $\text{Ge}(111)$ -монокроматором и линейным детектором PSD. Результаты обрабатывали с использованием программного обеспечения WinXpow Software Manual STOE&CIE Gmbh 2003 [8] и FullProf [9].

### Результаты исследования

Для определения равновесий в системе Ni–Cr–Ta комплексом методов физико-химического анализа были исследованы 18 сплавов. Изучены их брутто-состав, фазовый состав и концентрация элементов в фазах (таблица). Микроструктура сплавов №№ 1–12 приведена на рис. 1–12.

### Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют построить изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий Ni–Cr–Ta при 1375 К (рис. 13). Составы фаз в трехфазных сплавах №№ 1–4 (таблица) определяют положение четырех трехфазных равновесий на изотермическом сечении:  $\gamma\text{-Ni}+\beta\text{-Cr}+\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$ ;  $\beta\text{-Cr}+\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}+\lambda$ ;  $\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}+\lambda+\text{Ni}_2\text{Ta}$ ;  $\lambda+\text{Ni}_2\text{Ta}+\mu$ . Растворимость хрома в фазах  $\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$ ,  $\text{Ni}_2\text{Ta}$  и  $\mu\text{-Ni}_{6,5}\text{Ta}_{6,5}$  составляет соответственно 5, 3 и 14 ат.%. Необходимо отметить, что кристаллическая структура фазы  $\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$  в сплавах №№ 2–4 и № 18 относится к структурному типу  $\text{TiAl}_3$ .

При определении положений трехфазных равновесий между фазами  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\beta\text{-Ta}$  и  $\text{NiTa}_2$  возникают определенные трудности. Кристаллизация сплавов в этой области происходит с первичным выделением тантала, причем растворимость хрома и никеля в тантале при затвердевании сплавов достигает 25–30 ат.%. Переход этих сплавов в равновесие при температуре 1375 К требует растворения образовавшихся выделений или их распада с образованием тантала, содержащего 2–3 ат.% никеля и хрома и сильно затруднен из-за очень малой подвижности атомов тантала при данной температуре.

Такие переходы сопровождаются еще и образованием метастабильных фаз. В результате распад пересыщенных твердых растворов на основе тантала происходит через промежуточную метастабильную фазу  $\text{Ta}_5(\text{Ni,Cr})$  со структурой  $\text{NiTi}_2$ .

Более того, в данной системе не происходит затвердевания эвтектики  $\beta\text{-Ta}+\lambda$ . Эвтектика затвердевает с образованием фазы также со структурой  $\text{NiTi}_2$ , а не классической смеси двух фаз. Поэтому данная фаза присутствует практически во всех сплавах (сплавы №№ 5–12). Распад фазы происходит очень медленно с

образованием тонкой сетки выделений промежуточной фазы  $\text{Ta}_5(\text{Ni,Cr})$  со структурой  $\text{NiTi}_2$ . Аналогичная ситуация возникает и при кристаллизации сплавов в областях равновесия с участием фазы  $\text{NiTa}_2$ . Равновесная фаза  $\text{NiTa}_2$  (структурный тип  $\text{CuAl}_2$ ) растворяет не более 2 ат.% хрома. При более высоком содержании хрома равновесная фаза не выделяется. Сплав кристаллизуется также с образованием метастабильной фазы  $(\text{Ni,Cr})\text{Ta}_2$  (структурный тип  $\text{NiTi}_2$ ). После длительных отжигов равновесная фаза (структурный тип  $\text{CuAl}_2$ ) образуется во всех сплавах, где она должна присутствовать. Однако содержание ее в сплавах находится на уровне чувствительности рентгеновского анализа. Только в сплавах № 6 и № 7 удалось визуально установить ее присутствие и определить состав.

В результате проведенных исследований определено положение трехфазных равновесий  $\mu+\lambda+\text{NiTa}_2$  и  $\lambda+\text{NiTa}_2+\beta\text{-Ta}$  на изотермическом сечении (рис. 13).

Исследование шести сплавов с постоянным содержанием тантала 33,3 ат.% по изоконцентрате показало, что все они однофазны (кроме сплава № 18). Фаза  $\text{TaCr}_2$  растворяет до 38 ат.% никеля. Данные рентгеновского анализа сплавов приведены в таблице. Параметры структур закономерно уменьшаются с увеличением в структуре количества атомов никеля, имеющих меньший размер. В гексагональной структуре соотношение осей также уменьшается. Это указывает на процесс упорядочения расположения атомов никеля в структуре. Установлено, что отражения на рентгенограмме двойной фазы Лавеса (сплав № 13) соответствуют и кубической ( $\text{MgCu}_2$ ), и гексагональной ( $\text{MgZn}_2$ ) структурам. Фазовый анализ рентгенограмм с использованием программы FullProf дает возможность количественно оценить содержание обеих структур в сплавах. При увеличении содержания никеля более 15 ат.% отражения, соответствующие кубической фазе Лавеса, падают практически до нуля. Это может происходить по двум причинам: а) имеется смесь фаз; б) образуется политип фазы Лавеса. На основании результатов эксперимента дать точный ответ невозможно. Однако тот факт, что в трехфазных сплавах №№ 2–4 фазы Лавеса имеют кубическую структуру, а по составу соответствуют области фазы Лавеса с гексагональной структурой, может быть объяснен только с точки зрения явления политипии.

Таким образом, впервые комплексом методов физико-химического анализа исследовано взаимодействие тантала с хромом и никелем при 1375 К, установлен состав фаз в равновесных сплавах и построено изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий Ni–Cr–Ta при 1375 К. Установлено существование шести трехфазных равновесий:  $\gamma\text{-Ni}+\beta\text{-Cr}+\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$ ;  $\beta\text{-Cr}+\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}+\lambda$ ;

**Концентрация элементов в сплавах, концентрация элементов в фазах сплавов и фазовый состав сплавов системы  
Ni–Cr–Ta при 1375 К**

| Номер сплава      | Концентрация элементов в сплавах, ат. % |        |        | Фазовый состав сплава                      | Концентрация элементов в фазах, ат. % |      |      | Структурный тип                | Количество фазы, % | Параметры ячейки, Å |         |
|-------------------|---|--------|--------|--|---------------------------------------|------|------|--------------------------------|--------------------|---------------------|---------|
|                   | Cr                                      | Ni     | Ta     |  | Cr                                    | Ni   | Ta   |                                |                    | a                   | c       |
| 1                 | 47,1                                    | 43,3   | 9,6    | $\alpha$ -Ni <sub>3</sub> Ta               | 5,2                                   | 71,6 | 23,2 | TiAl <sub>3</sub>              | –                  | 3,618               | 7,468   |
|                   |   |        |        | $\gamma$ -Ni                               | 41,8                                  | 55,1 | 3,1  | Cu                             | –                  | 3,522               | –       |
|                   |   |        |        | $\beta$ -Cr                                | 90,3                                  | 9,6  | 0,1  | W                              | –                  | 2,879               | –       |
| 2                 | 44,5                                    | 36,3   | 19,2   | $\lambda$                                  | 38,0                                  | 32,9 | 29,1 | MgCu <sub>2</sub>              | –                  | 7,0434              | –       |
|                   |   |        |        | $\beta$ -Cr                                | 96,8                                  | 2,9  | 0,3  | W                              | –                  | 2,875               | –       |
|                   |   |        |        | $\alpha$ -Ni <sub>3</sub> Ta               | 2,8                                   | 72,6 | 24,6 | TiAl <sub>3</sub>              | –                  | 3,418               | 7,468   |
| 3                 | 5,4                                     | 65,2   | 29,4   | $\alpha$ -Ni <sub>3</sub> Ta               | 0,0                                   | 74,3 | 25,7 | TiAl <sub>3</sub>              | –                  | 3,422               | 7,471   |
|                   |   |        |        | $\lambda$                                  | 23,5                                  | 43,2 | 33,3 | MgCu <sub>2</sub>              | –                  | 7,0422              | –       |
|                   |   |        |        | Ni <sub>2</sub> Ta                         | 3,4                                   | 62,4 | 34,2 | MoSi <sub>2</sub>              | –                  | 3,157               | 7,906   |
| 4                 | 10,2                                    | 53,2   | 36,6   | $\mu$ -Ni <sub>6,5</sub> Ta <sub>6,5</sub> | 9,5                                   | 43,8 | 46,7 | Fe <sub>7</sub> W <sub>6</sub> | –                  | 4,9214              | 26,361  |
|                   |   |        |        | Ni <sub>2</sub> Ta                         | 0,0                                   | 66,4 | 33,6 | MoSi <sub>2</sub>              | –                  | 3,221               | 7,841   |
|                   |   |        |        | $\lambda$                                  | 23,4                                  | 40,9 | 35,7 | MgCu <sub>2</sub>              | –                  | 7,038               | –       |
| 5                 | 13,5                                    | 33,1   | 53,4   | NiTa <sub>2</sub>                          | 8,9                                   | 26,4 | 64,7 | CuAl <sub>2</sub>              | 1                  | 6,2823              | 4,8714  |
|                   |   |        |        |  |                                       |      |      | Ti <sub>2</sub> Ni             | 30                 | 11,5285             | –       |
|                   |   |        |        | $\mu$ -Ni <sub>6,5</sub> Ta <sub>6,5</sub> | 13,8                                  | 37,9 | 48,3 | Fe <sub>7</sub> W <sub>6</sub> | 55                 | 4,8976              | 26,6808 |
|                   |   |        |        | $\lambda$                                  | 29,5                                  | 32,4 | 38,1 | MgCu <sub>2</sub>              | 5                  | 6,9132              | –       |
| MgZn <sub>2</sub> | 9                                       | 4,8745 | 7,8524 |  |                                       |      |      |                                |                    |                     |         |
| 6                 | 13,9                                    | 26,4   | 59,7   | $\lambda$ +NiTa <sub>2</sub>               | 17,9                                  | 24,8 | 57,3 | MgCu <sub>2</sub>              | –                  | 7,0421              | –       |
|                   |   |        |        |  |                                       |      |      | MgZn <sub>2</sub>              | –                  | 4,9041              | 8,0431  |
|                   |   |        |        | NiTa <sub>2</sub>                          | 1,3                                   | 33,3 | 65,4 | CuAl <sub>2</sub>              | –                  | 6,2030              | 4,8540  |
| 7                 | 5,4                                     | 19,3   | 75,3   | $\beta$ -Ta                                | 4,5                                   | 0,0  | 95,5 | W                              | –                  | 3,302               | –       |
|                   |   |        |        | NiTa <sub>2</sub>                          | 0,6                                   | 34,6 | 64,8 | CuAl <sub>2</sub>              | –                  | 6,188               | 4,872   |
|                   |   |        |        | $\lambda$ +NiTa <sub>2</sub>               | 14,4                                  | 25,8 | 59,8 | Ti <sub>2</sub> Ni             | –                  | –                   | –       |
| 8                 | 69,7                                    | 4,9    | 25,4   | $\lambda$                                  | 60,4                                  | 5,8  | 33,8 | MgCu <sub>2</sub>              | –                  | 6,9699              | –       |
|                   |   |        |        |  |                                       |      |      | MgZn <sub>2</sub>              | –                  | 4,9228              | 8,0576  |
|                   |   |        |        | $\beta$ -Cr                                | 98,6                                  | 0,9  | 0,5  | W                              | –                  | 2,8853              | –       |
| 9                 | 57,8                                    | 13,6   | 28,6   | $\lambda$                                  | 50,4                                  | 16,2 | 33,4 | MgCu <sub>2</sub>              | 3                  | 6,9019              | –       |
|                   |   |        |        |  |                                       |      |      | MgZn <sub>2</sub>              | 61                 | 4,8729              | 7,9819  |
|                   |   |        |        | $\beta$ -Cr                                | 98,1                                  | 1,6  | 0,3  | W                              | 3                  | 2,8862              | –       |
|                   |   |        |        | NiTa <sub>2</sub>                          | 40,2                                  | 11,2 | 48,6 | Ti <sub>2</sub> Ni             | 33                 | 11,4715             | –       |
| 10                | 44,1                                    | 5,4    | 50,5   | NiTa <sub>2</sub>                          | 26,9                                  | 11,7 | 61,4 | Ti <sub>2</sub> Ni             | 50                 | 11,5229             | –       |
|                   |   |        |        | $\beta$ -Ta                                | 7,4                                   | 0,0  | 92,6 | W                              | 1                  | 3,1466              | –       |
|                   |   |        |        | $\lambda$                                  | 58,0                                  | 2,5  | 39,5 | MgCu <sub>2</sub>              | 29                 | 6,9814              | –       |
|                   |   |        |        |  |                                       |      |      | MgZn <sub>2</sub>              | 20                 | 4,9221              | 8,1168  |

Продолжение табл.

| Номер сплава | Концентрация элементов в сплавах, ат.% |      |      | Фазовый состав сплава         | Концентрация элементов в фазах, ат.% |      |      | Структурный тип    | Количество фазы, % | Параметры ячейки, Å |        |
|--------------|--|------|------|-------------------------------|--------------------------------------|------|------|--------------------|--------------------|---------------------|--------|
|              | Cr                                     | Ni   | Ta   |                               | Cr                                   | Ni   | Ta   |                    |                    | a                   | c      |
| 11           | 35,0                                   | 14,2 | 50,8 | $\lambda$                     | 52,5                                 | 9,0  | 38,5 | MgCu <sub>2</sub>  | 15                 | 7,0204              | –      |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | MgZn <sub>2</sub>  | 33                 | 4,9238              | 8,0857 |
|              |  |      |      | NiTa <sub>2</sub> + $\lambda$ | 31,2                                 | 18,3 | 50,5 | –                  | –                  | –                   |        |
|              |  |      |      | NiTa <sub>2</sub>             | 7,5                                  | 27,6 | 64,9 | Ti <sub>2</sub> Ni | 48                 | 11,5689             | –      |
| 12           | 18,0                                   | 19,7 | 62,3 | $\beta$ -Ta                   | 5,5                                  | 0,0  | 94,5 | W                  | –                  | 3,2940              | –      |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | MgCu <sub>2</sub>  | –                  | 7,0158              | –      |
|              |  |      |      | NiTa <sub>2</sub> + $\lambda$ | 28,7                                 | 16,7 | 54,6 | MgZn <sub>2</sub>  | –                  | 4,961               | 8,066  |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | NiTa <sub>2</sub>  | 13,5               | 21,2                | 65,3   |
| 13           | 66,7                                   | 0,0  | 33,3 | $\lambda$                     | 66,7                                 | 0,0  | 33,3 | MgCu <sub>2</sub>  | 14                 | 6,9846              | –      |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | MgZn <sub>2</sub>  | 86                 | 4,9338              | 8,0966 |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      |                    |                    | c/a = 1,6410        |        |
| 14           | 61,9                                   | 4,4  | 33,7 | $\lambda$                     | 61,9                                 | 4,4  | 33,7 | MgCu <sub>2</sub>  | 24                 | 6,9480              | –      |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | MgZn <sub>2</sub>  | 76                 | 4,9036              | 8,0437 |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      |                    |                    |                     |        |
| 15           | 51,9                                   | 14,9 | 33,2 | $\lambda$                     | 51,9                                 | 14,9 | 33,2 | MgCu <sub>2</sub>  | 2                  | 6,9115              | –      |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | MgZn <sub>2</sub>  | 98                 | 4,8869              | 8,0102 |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      |                    |                    |                     |        |
| 16           | 41,6                                   | 25,1 | 33,3 | $\lambda$                     | 41,6                                 | 25,1 | 33,3 | MgCu <sub>2</sub>  | 3                  | 6,8452              | –      |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      | MgZn <sub>2</sub>  | 97                 | 4,8634              | 7,9526 |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      |                    |                    |                     |        |
| 17           | 31,6                                   | 34,8 | 33,6 | $\lambda$                     | 31,6                                 | 34,8 | 33,6 | MgZn <sub>2</sub>  | 100                | 4,8440              | 7,9091 |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      |                    |                    |                     |        |
| 18           | 24,0                                   | 42,9 | 33,1 | $\alpha$ -Ni <sub>3</sub> Ta  | 0,0                                  | 73,8 | 26,2 | TiAl <sub>3</sub>  | –                  | 3,4186              | 7,4630 |
|              |  |      |      | $\lambda$                     | 27,8                                 | 38,2 | 34,0 | MgZn <sub>2</sub>  | –                  | 4,8455              | 7,9091 |
|              |  |      |      |                               |                                      |      |      |                    |                    |                     |        |

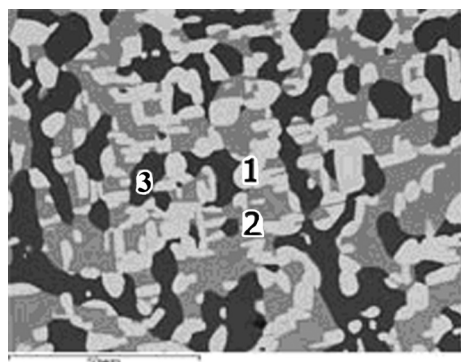


Рис. 1. Микроструктура сплава № 1:  
1 –  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ta, 2 –  $\gamma$ -Ni, 3 –  $\beta$ -Cr

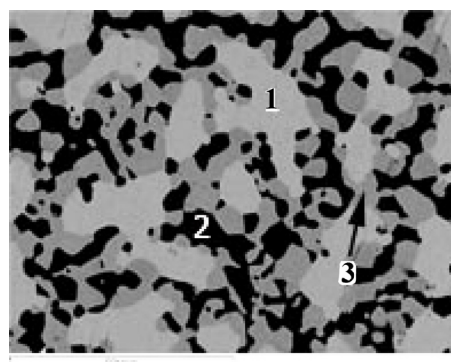


Рис. 2. Микроструктура сплава № 2: 1 –  $\lambda$ ,  
2 –  $\beta$ -Cr, 3 –  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ta



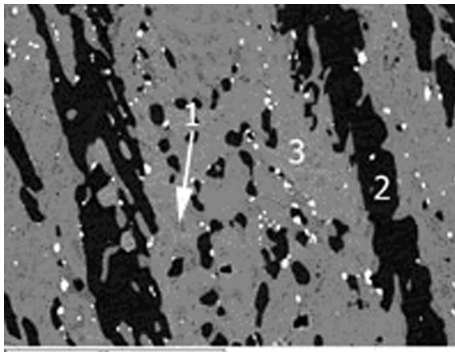


Рис. 3. Микроструктура сплава № 3:  
1 –  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ta, 2 –  $\lambda$ , 3 – Ni<sub>2</sub>Ta

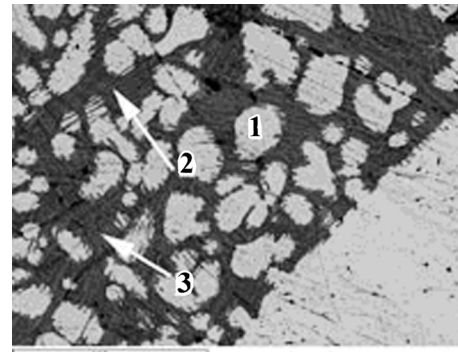


Рис. 7. Микроструктура сплава № 7:  
1 –  $\beta$ -Ta, 2 – NiTa<sub>2</sub>, 3 –  $\lambda$ +NiTa<sub>2</sub>

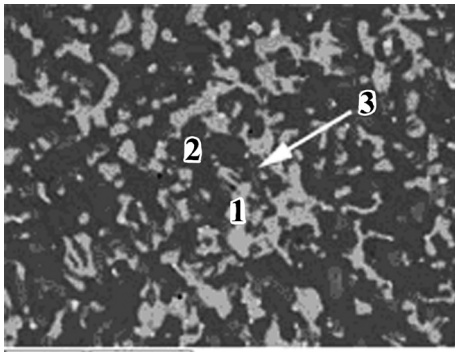


Рис. 4. Микроструктура сплава № 4:  
1 –  $\mu$ -Ni<sub>6,5</sub>Ta<sub>6,5</sub>, 2 – Ni<sub>2</sub>Ta, 3 –  $\lambda$

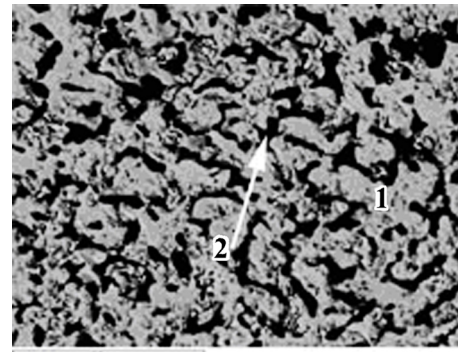


Рис. 8. Микроструктура сплава № 8:  
1 –  $\lambda$ , 2 –  $\beta$ -Cr

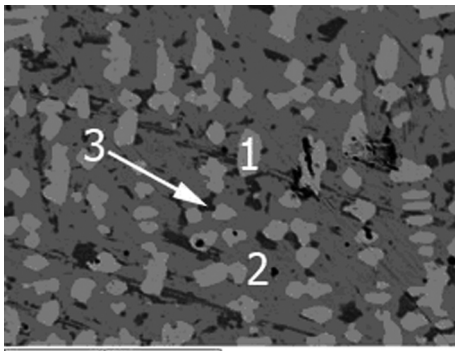


Рис. 5. Микроструктура сплава № 5:  
1 – NiTa<sub>2</sub>, 2 –  $\mu$ -Ni<sub>6,5</sub>Ta<sub>6,5</sub>, 3 –  $\lambda$

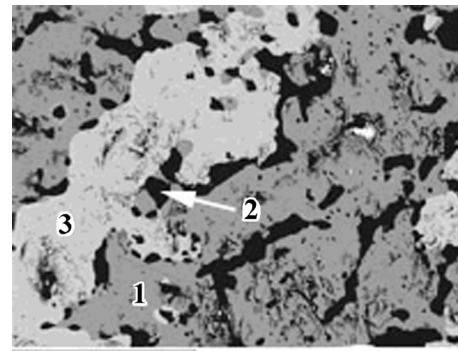


Рис. 9. Микроструктура сплава № 9: 1 –  $\lambda$ ,  
2 –  $\beta$ -Cr, 3 – NiTa<sub>2</sub>

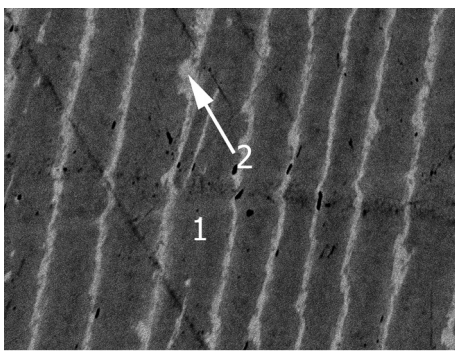


Рис. 6. Микроструктура сплава № 6:  
1 –  $\lambda$ +NiTa<sub>2</sub>, 2 – NiTa<sub>2</sub>

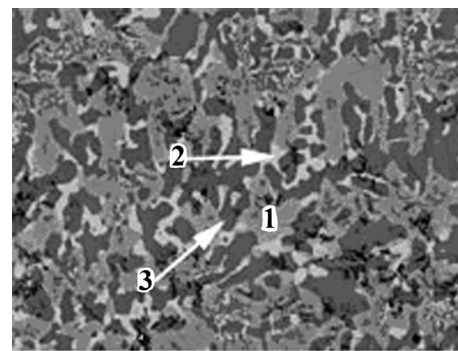


Рис. 10. Микроструктура сплава № 10:  
1 – NiTa<sub>2</sub>, 2 –  $\beta$ -Ta, 3 –  $\lambda$

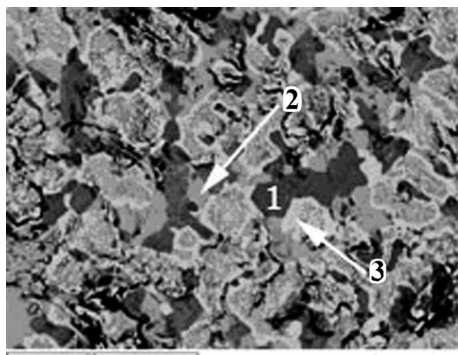


Рис. 11. Микроструктура сплава № 11:  
1 –  $\lambda$ , 2 –  $\text{NiTa}_2 + \lambda$ , 3 –  $\text{NiTa}_2$

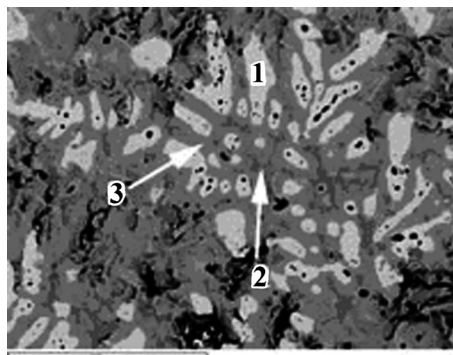


Рис. 12. Микроструктура сплава № 12:  
1 –  $\beta\text{-Ta}$ , 2 –  $\text{NiTa}_2 + \lambda$ , 3 –  $\text{NiTa}_2$

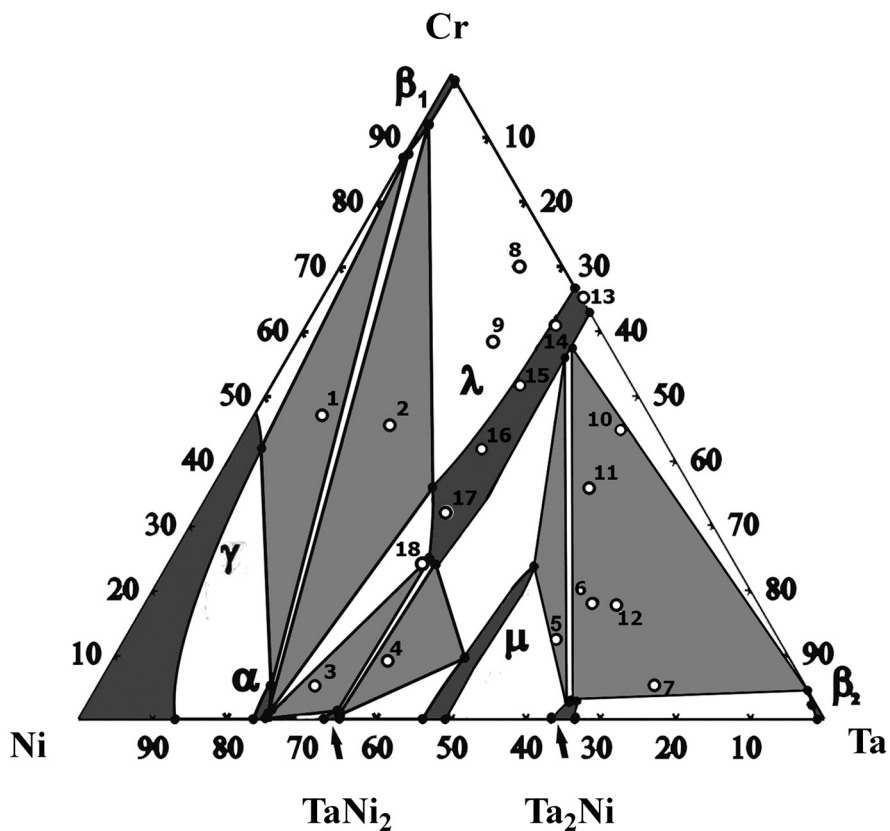


Рис. 13. Изотермическое сечение диаграммы фазовых равновесий системы Ni–Cr–Ta при 1375 К

$\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta} + \lambda + \text{Ni}_2\text{Ta}$ ;  $\lambda + \text{Ni}_2\text{Ta} + \mu$ ;  $\mu + \lambda + \text{NiTa}_2$  и  $\lambda + \text{NiTa}_2 + \beta\text{-Ta}$ . Растворимость хрома в фазах  $\alpha\text{-Ni}_3\text{Ta}$ ,  $\text{Ni}_2\text{Ta}$ ,  $\mu\text{-Ni}_{6,5}\text{Ta}_{6,5}$  и  $\text{NiTa}_2$  составляет соответственно 5, 3, 14 и 2 ат.%.

Установлено, что в области первичной кристаллизации тантала (более 50 ат.%) переход сплавов в равновесное состояние осуществляется через образование метастабильных фаз переменного состава (структурный тип  $\text{NiTi}_2$ ). Рентгеноструктурные исследования сплавов в области фазы Лавеса показали, что в двойной

фазе Лавеса индицируются как кубическая, так и гексагональная модификации. По мере увеличения концентрации никеля в фазе (до 38 ат.%) содержание кубической модификации фазы уменьшается, а при концентрациях никеля более 25 ат.%, содержание кубической модификации фазы исчезает. Уменьшение соотношения осей  $c/a$  в гексагональной модификации при увеличении концентрации никеля указывает на упорядочение расположения атомов никеля в структуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nash P.* // Binary Alloy Phase Diagrams. 2<sup>nd</sup> ed. /Ed. T.B. Massalski. Ohio. 1990. **2**. P. 1298.
2. *Venkatraman M., Neumann J.P.* // Binary Alloy Phase Diagrams. 2<sup>nd</sup> ed. /Ed. T.B. Massalski. Ohio. 1990. **2**. P. 1338.
3. *Кочержинский Ю.А., Петьков В.В., Шишкин Е.А.* // Металлофизика. АН СССР. 1973. **46**. С. 75.
4. *Гусева Л.Н., Мариенгоф Л.Б.* // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1965. **1**. С. 809.
5. *Nash A., Nash P.* // Binary Alloy Phase Diagrams. 2<sup>nd</sup> ed. / Ed. T.B. Massalski. Ohio. 1990. **3**. P. 2865.
6. *Ruhl R.C., Giessen B.C., Cohen M., Grant N.J.* // J. Less-Common Metals. 1967. **13**. P. 611.
7. *Крипякевич П.И., Пылаева Е.Н.* // Кристаллография. 1967. **12**. С. 294.
8. STOE WINXPOW. Stoe & Cie GmbH. Germany. Darmstadt, 1999.
9. *Rodriguez-Carvajal J.* // Satellite Meeting on Powder Diffraction of the XV Congress of the IUCr. France. Toulouse, 1990. P. 127.

Поступила в редакцию 14.06.12

## PHASE EQUILIBRIA IN THE THREE-COMPONENT SYSTEM NICKEL–CHROMIUM–TANTALUM AT 1375 K

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

*(Division of General Chemistry)*

**The isothermic section of the phase equilibria diagram of the Ni–Cr–Ta system has been constructed at 1375 K by means of the methods of equilibrium alloys and existence of six three-phase equilibria  $\gamma$ -Ni+ $\beta$ -Cr+ $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ta;  $\beta$ -Cr+ $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ta+ $\lambda$ ;  $\alpha$ -Ni<sub>3</sub>Ta+ $\lambda$ +Ni<sub>2</sub>Ta;  $\lambda$ +Ni<sub>2</sub>Ta+ $\mu$ ;  $\mu$ + $\lambda$ +NiTa<sub>2</sub> и  $\lambda$ +NiTa<sub>2</sub>+ $\beta$ -Ta has been established. It is shown, that both cubic, and hexagonal modifications are indicated in Laves binary phase.**

**Key words:** *nickel, chromium, tantalum, phase equilibria.*

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