

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гюнтер В.Э., Домбаев Г.Ц., Сысолятин П.Г. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. – Томск: ТГУ, 1998. – 486 с.
2. Корнилов И.И., Белоусов О.К., Качур В.В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти». – М.: Наука, 1975. – 178 с.
3. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys // *Progr. Mat. Sci.* – 2005. – V. 50. – № 4. – P. 511–678.
4. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Козлов Э.В. и др. Слабоустойчивые предпереходные структуры в никелиде титана. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 296 с.
5. Пирсон У. Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
6. Диаграммы состояния металлических систем, опубликованных в 1981 г. / под ред. Н.В. Агеева. – М.: ВИНТИ, 1983. – Вып. 27. – 300 с.
7. Shiue R.H., Wu S.K. Infrared brazing of $Ti_{50}Ni_{50}$ shape memory alloy using two Ag-Cu-Ti active braze alloys // *Intermetallics*. – 2006. – V. 4. – № 6. – P. 630–638.
8. Yong-heng Tan, Hong-hui Xu, Yong Du. Isothermal section at 927 °C of Cr-Ni-Ti system // *Transact. Nonferrous Metals Soc. China*. – 2007. – V. 17. – № 4. – P. 711–714.
9. Guanjun Y., Shiming H. Study on the phase equilibria of the Ti-Ni-Nb ternary system at 900 °C // *J. Alloys Compounds*. – 2000. – V. 297. – № 1–2. – P. 226–230.
10. Yong Du, Honghui Xu, Yichun Zhou, Yifang Ouyang and Zhanpeng Jin. Phase equilibria of the Ni-Ti-Ta system at 927 °C // *Mat. Sci. Engin.* – 2007A. – V. 448. – № 1–2. – P. 210–215.
11. Клопотов А.А., Ясенчук Ю.Ф., Абзаев Ю.А. и др. Система Ti-Ni. Кристаллогеометрические особенности // *Известия вузов. Физика*. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 7–17.
12. Боцанов С.С. Экспериментальные основы структурной химии. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 240 с.
13. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996–2000. – Т. 1–3.

Поступила 14.03.2011 г.

УДК 538.911

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ВЫБОРУ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТРОЙНЫХ СПЛАВАХ С ЭФФЕКТАМИ ПАМЯТИ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА. II. ЛЕГИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ – МЕТАЛЛЫ ГРУПП VIA–VIIIА, IB И IIIB

В.Д. Клопотов, А.А. Клопотов*, А.И. Потекаев**, В.Э. Гюнтер***, Ю.Ф. Ясенчук***, Ш.А. Джалолов**, Е.С. Марченко***, Э.В. Козлов*

Томский политехнический университет

*Томский государственный архитектурно-строительный университет

**Сибирский физико-технический институт

***НИИ Медицинских материалов г. Томск

E-mail: vklopotov@mail2000.ru

Проведена систематизация тройных диаграмм состояния Ti-Ni-Me (Me – легирующий элемент) и выявлена общая закономерность: в тех системах, в которых значения среднегрупповых чисел, определяемых как число электронов у элемента за пределами оболочки соответствующего инертного газа, близки к 7 эл/ат, наблюдаются протяженные областями гомогенности соединений на основе TiNi (Me) с B2 структурой. На основе анализа литературных данных, кристаллохимических факторов и морфологии расположения областей гомогенности на диаграммах состояний Ti-Ni-Me исследованы зависимости в расположении атомов легирующего элемента по подрешеткам никеля и титана в узлах кристаллической решетки в B2 структуре.

Ключевые слова:

Мартенситные превращения, эффект памяти формы, областями гомогенности, кристалло-химические факторы, сплавы на основе никелида титана.

Key words:

Martensitic transformations, shape memory effects, crystal-chemical of the factors, areas homogeneity, nickel titanium alloys.

Введение

Тройные соединения Ti-Ni-Me интенсивно исследуются, так как находят широкое применение в технике и медицине [1]. Важным является получение необходимых эксплуатационных характеристик сплавов, которые определяются устойчивостью высокотемпературной решетки фазы с B2 структурой. Особое место занимают сплавы вблизи стехиометрического состава TiNi, легированных переходными элементами из групп VIA–VIIIА периодической таблицы (такие как Cr, Mn, Fe, Co, Pd

и др.), а также элементами Cu (из группы IB), Al (из группы IIIB), на примере которых видно, что легирование этими элементами значительно влияет на температурные области термоупругих мартенситных превращений (МП) и на изменение последовательностей переходов в стабильную при низких температурах мартенситную фазу со структурами B19, B19' или B19'' [2].

Настоящее исследование продолжает анализ влияния третьего элемента на структурно-фазовые состояния в тройных системах Ti-Ni-Me и поиску

общих закономерностей в существовании областей фазы с B2 структурой в никелиде титана относительно концентрации и сорта легирующих элементов с целью получить материалы с оптимальными функциональными свойствами.

Тройные диаграммы состояния систем Ti-Ni-Me

В зависимости от характера межатомного взаимодействия между сплавообразующими компонентами различают разные типы диаграмм состояния. Классификация этих типов важна, так как позволяет выявить общие закономерности в различных диаграммах состояний. Более того, важна возможность обнаружить корреляцию между эволюцией диаграмм в зависимости от их кристаллогеометрических и физико-химических свойств. Проявление эффектов памяти формы в сплавах на основе никелида титана связывается с структурно-фазовым составом, его стабильностью и способностью испытывать термоупругие мартенситные превращения.

Легирующие бинарных сплавов системы Ti-Ni третьим элементом переходными металлами из групп VIA, VIIA, VIIIA и из групп IB и IIIB Периодической системы обладает рядом отличительных особенностей относительно сплавов, легируемых металлами из групп IVA и VA, что описано ниже [1, 2].

Для наглядного представления различия в размерах атомов основных сплавообразующих элементов Ni и Ti относительно третьего легирующего компонента (Me) были получены диаграммы

в координатах $1 - \frac{R_{Me}}{R_{Ni}}$ (либо $1 - \frac{R_{Me}}{R_{Ti}}$) от номера

группы Периодической системы элементов третьего легирующего элемента (рис. 1). Эти диаграммы выявляют корреляции между размерами основных сплавообразующих элементов (Ti, Ni) и легирующих элементов (Me) и его положения в Периодической системе элементов. Из диаграммы $1 - \frac{R_{Me}}{R_{Ni}}$

от номера группы Периодической системы элементов видно, что точки располагаются на выпуклых кривых с максимумами, приходящимися на группу атомов из периодов VIIA–VIIIA. На этих диаграммах хорошо прослеживается тенденция, что наибольшее отклонение в размерах от атомов Ni дают элементы, находящиеся в конце и в начале диаграммы. Видно, что основная масса элементов имеет размеры атомов сравнимые или меньше размеров атома Ni (рис. 1, а). Тогда, как на диаграммах, рис. 1, б, отражено то обстоятельство, что атомы групп с IV по X имеют размеры больше атомов Ti. В серой полосе на диаграммах находятся атомы, у которых размеры атомов попадают в интервал значений $(R_{Ti}...R_{Ni})$.

1. Металлы группы VIA

Cr(d^5s^1), Mo(d^5s^1) и W($f^4d^5s^2$) – переходные металлы группы VIA, занимают в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева промежуточное положение между электроположительными (Ti) и электроотрицательными (Ni) металлами.

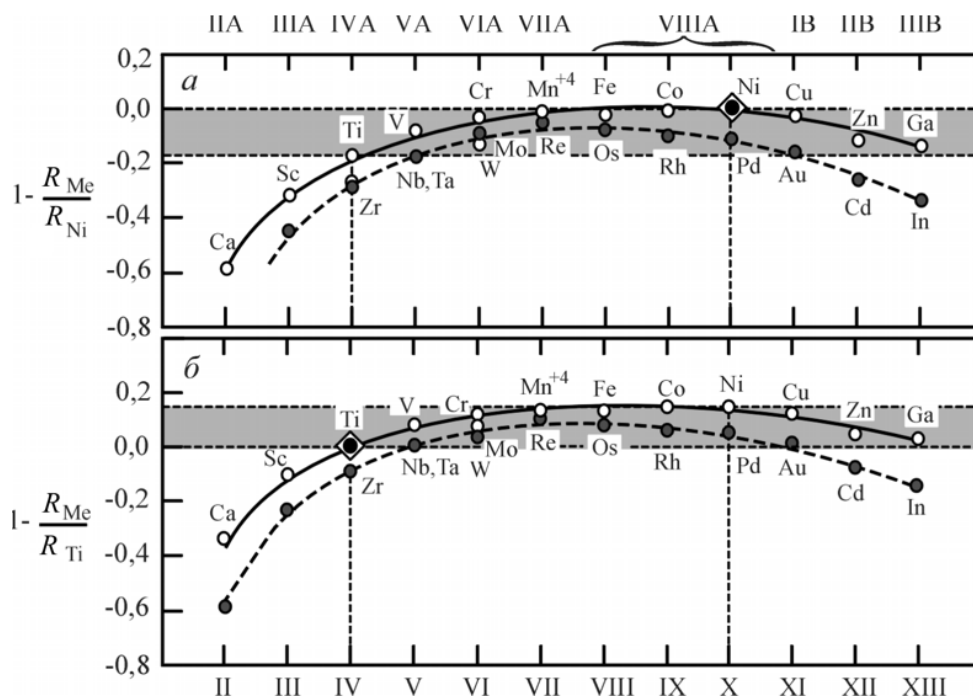


Рис. 1. Диаграммы распределения размеров атомов основных сплавообразующих элементов Ni и Ti относительно легирующих элементов в зависимости от положения в Периодической системе (группы IB–VIIIA). Нижняя шкала отражает нумерацию групп в Периодической системе элементов по рекомендации ИЮПАК (1989). Здесь R_{Ni} , R_{Ti} и R_{Me} радиусы атомов Ni, Ti и Me соответственно в тройных системах Ti-Ni-Me

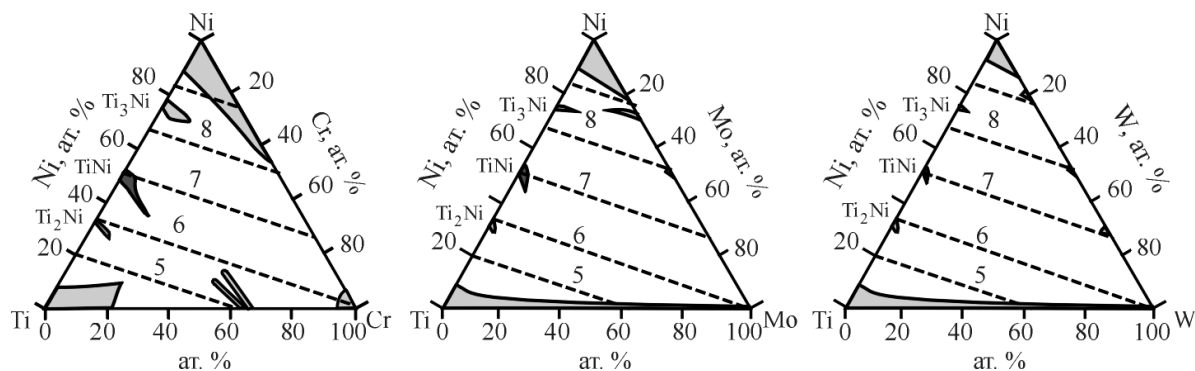


Рис. 2. Твердые растворы на основе соединения TiNi в тройных системах Ti-Ni-Cr, Ti-Ni-Mo и Ti-Ni-W. Экспериментальные данные получены из работ [3–5]

Из приведенных тройных диаграмм состояния систем Ti-Ni-Cr, Ti-Ni-Mo и Ti-Ni-W (рис. 2) видно, что атомы Mo и W растворяются в неограниченных количествах в Ti. Хром растворяется в значительных количествах в Ti (20 ат. % при 900 °C) и образует ряд промежуточных интерметаллических соединений. С другой стороны, в ряду Cr, Mo и W наблюдается уменьшение растворимости в Ni. Наличие небольших по размерам областей гомогенности в тройных соединениях свидетельствует о том, что переходные элементы группы VIA в незначительных количествах растворяются в соединениях на основе Ti-Ni.

Оценка влияния отношения значений размерного фактора между основными сплавообразующими и легирующими элементами показывает, что атомные радиусы Mo и W ($R_{Mo}=0,139$ нм, $R_W=0,140$ нм) ближе к радиусам атомов Ti ($R_{Ti}=0,1462$ нм), чем к атомам Ni и это наглядно проявляется на диаграммах на рис. 1. Размеры атомов Cr ($R_{Cr}=0,128$ нм) близки к значениям атомов Ni ($R_{Ni}=0,124$ нм). Из соотношения размеров атомов основных сплавообразующих элементов на основе соединения TiNi и атомов легирующих элементов можно сделать предположение, что атомы Mo и W наиболее вероятно будут стремиться занять места на Ti подрешетке, а атомам Cr более благоприятно попасть на подрешетку Ni.

Исходя из протяженности и направления области твердого раствора на основе TiNi (рис. 2), близости размеров атомов Cr и Ni (рис. 1) [3], можно сделать предположение, что атомы Cr преимущественно располагаются на Ni подрешетке.

Области гомогенности тройных соединений TiNi(Mo) и TiNi(W) незначительны (рис. 2). Другим известным фактом, который можно привлечь для анализа, является отличие электронных конфигураций атомов Mo(d^5s^1) и W($f^4d^5s^2$) от соответствующих конфигураций основных сплавообразующих элементов Ti(d^2s^2) и Ni(d^8s^2). Однако, эти данные не могут служить критерием для заключения о том, на какие позиции преимущественно будут стремиться атомы Mo и W в соединении TiNi. По другим известным фактам: размерным (разме-

ры атомов Mo и W близки к соответствующим значениям атомов Ti), по растворимости (атомы Mo и W растворяются в неограниченных количествах в Ti) можно сделать предположение, что атомы Mo и W могут преимущественно занимать места на подрешетке атомов Ti.

2. Металлы группы VIIA

Mn(d^5s^2), Re($f^4d^5s^2$) – слабо электроотрицательные переходные металлы группы VIIA. На диаграмме, рис. 1, хорошо проявляется это обстоятельство, что атомные радиусы атомов Re группы VIIA имеют промежуточные значения между размерами атомов Ti и Ni ($R_{Re}=0,1370$ нм). С размерами атомов марганца все сложнее ($R_{Mn}=0,1304$ нм четырехвалентный и $R_{Mn}=0,1264$ нм шестивалентный, $R_{Re}=0,1370$ нм), но ближе к электроотрицательному Ni.

Авторам не известны литературные данные о тройных фазовых диаграммах в системах Ti-Ni-Mn и Ti-Ni-Re, поэтому предположения о том, какие места будут занимать атомы Mn и Re, приходится делать на основе других фактов.

Из литературных данных известно, что Mn обладает, с одной стороны, большой растворимостью в никеле, с другой стороны, установлена очень слабая растворимость Mn в титане [3, 9]. Размерный фактор в этом случае хорошо работает (рис. 1), так как размеры атомов Mn и Ni близки, то растворимость атомов Mn в никеле большая. Перечисленные факты при отсутствии тройной фазовой диаграммы Ti-Ni-Mn позволяют сделать предположение, что марганец стремится в соединении TiNi на места в подрешетке Ni. К сожалению, приведенных здесь фактов недостаточно, чтобы сделать однозначное заключение о протяженности и размерах областей непрерывных твердых растворов в квазибинарных соединениях TiNi-TiMn или TiNi-NiMn.

Подобная ситуация (как и с Mn) имеет место при легировании никелида титана Re, так как рений растворяется в значительных количествах в Ni. В Ti растворение Re зависит от кристаллической модификации: незначительно в α -Ti и в значительных количествах в β -Ti.

3. Металлы группы VIIIА

Fe(d^6s^2), Co(d^7s^2), Ru(d^7s^1), Rh(d^7s^1), Pd(d^{10}), Os($f^4d^5s^2$), Ir($f^4d^5s^2$), Pt($f^4d^5s^1$) — электроотрицательные переходные металлы, которые принадлежат той же группе, что и Ni, и значительно влияют на стабильность γ -фазы в Ni.

Для элементов этой группы характерно, что на них завершается заполнение внутренней d -электронной оболочки при наличии во внешней s -оболочке двух электронов. Общие свойства, которые позволяют объединить их в одну группу, проявляются в том, прежде всего, что они обладают хорошо выраженным металлическим типом связи [8]. Это проявляется в том, в частности, что основная часть этих элементов имеют плотноупакованные ГЦК или ГПУ кристаллические решетки. В этой группе элементы имеют близкие значения атомных радиусов и потенциалов ионизации, они близко расположены в ряду электроотрицательности. Эти свойства определяют особенности их взаимодействия с другими элементами.

Атомные радиусы элементов группы VIII имеют промежуточные значения между размерами атомов Ti и Ni (рис. 1). Исключение составляют Fe и Co ($R_{Fe}=0,1274$ нм, $R_{Co}=0,125$ нм). Примечательными

являются области гомогенности тройных соединений Ti-Ni-Fe и Ti-Ni-Co, т. е. сплавы по квазибинарному разрезу TiNi-TiFe и TiNi-TiCo обладают широкой областью гомогенности фаз с B2 структурой, рис. 3. Штриховые линии соответствуют значениям среднегрупповых чисел (СГЧ), которое определяются как число электронов у элементов за пределами оболочки соответствующего инертного газа.

Данных о тройных фазовых диаграммах систем Ti-Ni-Ru, Ti-Ni-Rh, Ti-Ni-Os и Ti-Ni-Ir нам не известны. Поэтому заключения о расположении выше перечисленных третьих компонентов по подрешеткам Ni и Ti в сплавах на основе никелида титана, которые можно сделать только на основе физико-химических свойств легирующих и основных сплавобразующих элементов, будут носить предположительный характер.

В литературе нет данных изотермических сечений тройных фазовых диаграмм в системах Ti-Ni-Pd и Ti-Ni-Pt. На основе анализа литературных данных [1, 3] были реконструированы фрагменты диаграмм систем Ti-Ni-Pd, Ti-Ni-Pt. При этом учитывалось, что палладий и платина образуют непрерывные твердые растворы с Ni [3]. В [1] показано,

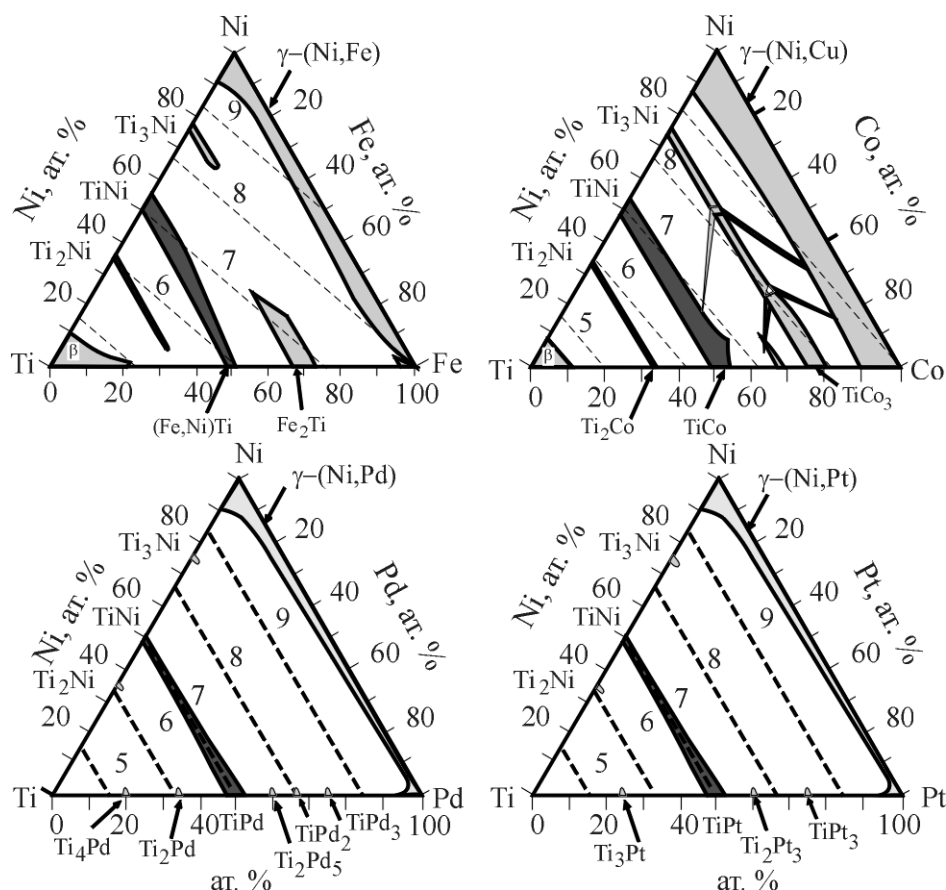


Рис. 3. Изотермические сечения при 900...1100 °С тройных фазовых диаграмм систем Ti-Ni-Me с легирующим элементом, принадлежащем к переходным элементам из VIIIА Периодической таблицы. Темным цветом выделены области существования фазы на основе TiNi с легирующими элементами со структурой B2. Штриховыми линиями показаны значения СГЧ. Тройные фазовые диаграммы систем Ti-Ni-Fe и Ti-Ni-Co получены из экспериментальных данных в [6, 7], фрагменты диаграмм систем Ti-Ni-Pd и Ti-Ni-Pt реконструированы на основе анализа литературных данных [1, 3]

что сплавы в области квазибинарного разреза TiNi-TiPd и TiNi-TiPt образуют структуру B2 в высокотемпературной области, а при низких температурах испытывают мартенситный переход в фазу с B19 структурой.

Таким образом, на основе приведенных данных (определяющими среди которых является расположение областей гомогенности соединений TiNi(Fe), TiNi(Co), TiNi(Pd) и TiNi(Pt)) можно сделать заключение, что при легировании соединения TiNi элементами Fe, Co, Pd и Pt последние стремятся занять подрешетку Ni в соединении TiNi.

4. Металлы группы IB

Cu($d^{10}s^1$), Ag($d^{10}s^1$), Au($d^{10}s^1$). Металлы этой группы имеют полностью заполненные 3d, 4d, 5d-электронные оболочки с 10 электронами, причем все металлы этой группы имеют гранецентрированную решетку. С этих элементов начинается ряд электроотрицательных металлов, в ряду электроотрицательности элементы этой группы находятся на границе между переходными и более резко выраженными электроотрицательными металлами (Zn, Cd, Al, B). Это обстоятельство способствует тому, что Cu, Ag и Au обладают способностью как образовывать твердые растворы, так и создавать соединения с другими элементами [8]. С никелем элементы Cu, Ag и Au образует непрерывные твердые растворы с ГЦК структурой.

Атомный радиус Cu близок к размеру атомов Ni ($R_{Cu}=0,1278$ нм), тогда как другие элементы группы IB имеют значения, близкие к соответствующему значению атомов Ti ($R_{Au}=0,1442$ нм, $R_{Ag}=0,1445$ нм) (рис. 1). Анализ показал, что электрохимические параметры атомов Cu, Au и Ag близки к соответствующим параметрам Ni, тогда как только размеры атомов Cu близки к размерам атомов Ni. Поэтому кажется необычным, что область гомогенности тройных соединений Ti-Ni-Cu с B2 структурой по квазибинарному разрезу TiNi-TiCu терпит раз-

рыв, тогда как соединение с B2 структурой полностью занимает область квазибинарного разреза TiNi-TiAu (рис. 4). Это коррелирует с данными в [10], что предпочтение занимать Ni или Ti подрешетки квазибинарных сплавов TiNi-TiCu зависит от концентрации атомов Cu.

5. Металлы группы IIIB

Al(s^2p^1), Ga(s^2p^1), In(s^2p^1) и Tl(s^2p^1). Металлы этой группы имеют полностью заполненную десятью электронами d-оболочку (за исключением алюминия). Электронное строение металлов данной группы характеризуется появлением одного электрона на p-оболочке. Металлы этой группы относятся к электроотрицательным элементам и образуют многочисленные соединения с другими элементами периодической системы. Это наглядно видно на тройной фазовой диаграмме системы Ti-Ni-Al (рис. 5).

Металлы группы IIIB мономорфны, за исключением таллия. Чистый алюминий обладает ГЦК решеткой.

В данной работе рассмотрены только соединения в тройной диаграмме Ti-Ni-Al. Это связано с тем, что остальные металлы этой группы являются более редкими, чем алюминий. Их практическое применение обусловлено только особыми физическими свойствами соединений этих металлов, они практически никогда не были использованы в качестве легирующих добавок в сплавах на основе никелида титана.

Алюминий — типичный электроотрицательный элемент с конфигурацией валентных электронов s^2p^1 . Он в обычных условиях не образует непрерывных твердых растворов ни с одним из элементов периодической таблицы. Атомный радиус Al близок радиусу Ti ($R_{Al}=0,1432$ нм).

Из приведенной тройной диаграммы состояния систем Ti-Ni-Al (рис. 5) видно, что атомы Al хорошо растворяются в Ni (до 18 ат. % при температуре

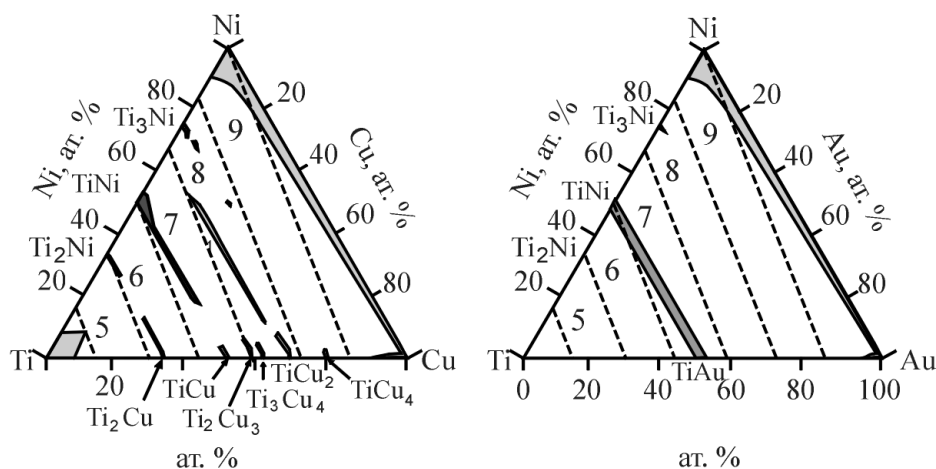


Рис. 4. Изотермические сечения при 900 °C тройной фазовой диаграммы системы Ti-Ni-Cu [6, 9]. Фрагмент диаграммы системы Ti-Ni-Au реконструирован на основе анализа литературных данных [1, 3]. Темным цветом выделены области существования фазы на основе TiNi с легирующими элементами со структурой B2. Штриховыми линиями показаны одинаковые значения СГЧ

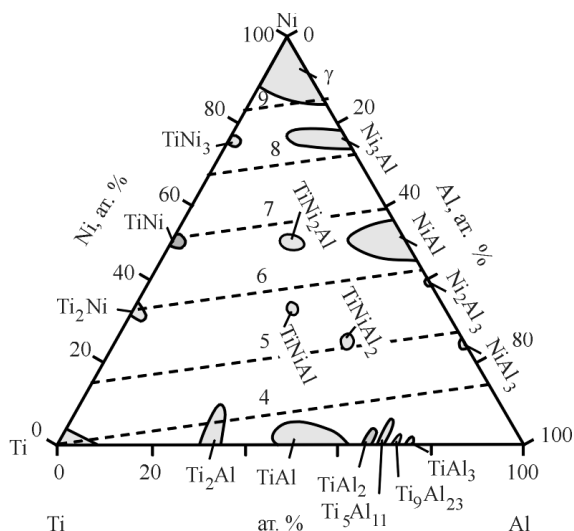


Рис. 5. Изотермические сечения при 900 °С тройной фазовой диаграммы системы Ti-Ni-Al [11–13]. Темным цветом выделены области существования фазы на основе TiNi с легирующими элементами со структурой B2. Штриховыми линиями показаны одинаковые значения СГЧ

900 °С). Гораздо хуже алюминий растворяется в Ti и образует ряд промежуточных интерметаллических соединений. Наличие небольших по размерам областей гомогенности в тройных соединениях на основе Ti-Ni свидетельствует о том, что атомы алюминия в незначительных количествах растворяются в этих соединениях. На этой диаграмме системы Ti-Ni-Al соединение TiNi (Al) с B2 структурой занимает небольшую область гомогенности. Штриховая линия области существования соединения TiNi и соответствующая значению СГЧ, равному 7, значительно отклоняется от направлений сечений TiNi-TiAl и TiNi-NiAl для изотермическо-

го сечения и практически не пересекает область гомогенности сплавов TiNi (Al) с B2 структурой (рис. 5). Приведенные данные еще раз подчеркивают, что необходимо учитывать размерный фактор при анализе диаграмм состояния [14].

Выводы

Проведенный анализ сплавов вблизи стехиометрического состава TiNi, легированных переходными элементами из групп VIA–VIIIA, IB, IIIB периодической таблицы показал, что легирование этими элементами оказывает существенное влияние на температурные области термоупругих мартенситных превращений и на изменение последовательностей переходов при низких температурах в стабильную мартенситную фазу со структурами B19, B19' или B19". Найдены закономерности в существовании областей фазы с B2 структурой в никелиде титана относительно концентрации и сорта легирующих элементов.

Исследование диаграмм тройных систем Ti-Ni-Me, для указанных легирующих элементов позволяет утверждать, что протяженные области гомогенности соединений на основе TiNi (Me) с B2 структурой существуют в тех тройных системах, в которых значения электронной концентрации СГЧ близки к 7 эл/ат и эти области гомогенности наиболее близки к направлению стороны Ni-Me на фазовых диаграммах Ti-Ni-Me.

На основании анализа морфологии расположения областей гомогенности соединений TiNi на тройных диаграммах Ti-Ni-Me и с учетом размерного фактора, который определяется соотношением между размерами сплавообразующих элементов, выявлены закономерности преимущественного расположения атомов третьего элемента в решетке сплавов никелида титана с B2 структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понтер В.Э., Домбаев Г.Ц., Сысолятин П.Г. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. – Томск: Том. гос. ун-т, 1998. – 486 с.
2. Диаграммы состояния металлических систем, опубликованных в 1981 г. / под ред. Н.В. Агеева. – М.: ВИНТИ, 1983. – Вып. 27. – 300 с.
3. Yong-heng Tan, Hong-hui Xu, Yong Du. Isothermal section at 927 °C of Cr-Ni-Ti system // Transact. Nonferrous Metals Soc. China. – 2007. – V. 17. – № 4. – P. 711–714.
4. Коломыцев В.И. Структурные фазовые превращения в сплавах переходных металлов TiNi-Me и Cu-Al-Me: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Томск, 1996. – 45 с.
5. Shiue R.H., Wu S.K. Infrared brazing of Ti₅₀Ni₅₀ shape memory alloy using two Ag-Cu-Ti active braze alloys // Intermetallics. – 2006. – V. 4. – № 6. – P. 630–638.
6. Guanjun Y., Shiming H. Study on the phase equilibria of the Ti-Ni-Nb ternary system at 900 °C // J. Alloys Compounds. – 2000. – V. 297. – № 1–2. – P. 226–230.
7. Корнилов И.И., Матвеева Н.М., Пряхина Л.И., Полякова Р.С. Металлохимические свойства элементов Периодической системы. – М.: Наука, 1966. – 165 с.
8. Корнилов И.И. Металлиды и взаимодействие между ними. – М.: Наука, 1964. – 180 с.
9. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys // Progr. Mat. Sci. – 2005. – V. 50. – № 4. – P. 511–678.
10. Пушин В.Г., Хачин В.Н. и др. Предпереходные явления и мартенситные превращения в B2-сплавах TiNi-TiCu // Актуальные проблемы прочности: Научные труды семинара. – Новгород, 1997. – Т. 1. – С. 174–178.
11. Schuster J.C. Critical data evaluation of the aluminium-nickel-titanium system // Intermetallics. – 2006. – V. 14. – № 6. – P. 1304–1311.
12. Schuster J.C., Zhu Pan, Shuhong Liu, Weitzer F., Yong Du. On the constitution of the ternary system Al-Ni-Ti // Intermetallics. – 2007. – V. 15. – № 4. – P. 1257–1267.
13. Клопотов А.А., Ясенчук Ю.Ф., Абзаев Ю.А. и др. Система Ti-Ni. Кристаллогеометрические особенности // Известия вузов. Физика. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 7–17.
14. Клопотов А.А., Потекаев А.И., Грибов Ю.А., Козлов Э.В. Размерный фактор, интенсивность изменения фазового состава и особенности поведения атомного объема при мартенситных превращениях в слабоустойчивых сплавах на основе никелида титана // Известия вузов. Физика. – 2003. – Т. 45. – № 7. – С. 54–62.

Поступила 14.03.2011 г.