

12. Tsigoza L.T., Yashnik S.F., Ismagilov Z.R., Shkabina R.A., Koryabkina R.A., Kuznetsov V.V. *Katalizator vysokotemperaturnogo szhiganiya uglevodorodnogo topliva (varianty)* [Catalytic high-temperature combustion of hydrocarbon fuels (options)]. Patent RF, no. 2185238, 2001.
13. Gryaznova E.N., Shiyani L.N., Yavorovskiy N.A. Struktura i svoystva nanovolokon AlOOH, modifitsirovannykh ionami margantsa [Structure and properties of nanofibers AlOOH, modified manganese ions]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 3, pp. 46–49.
14. Gryaznova E.N., Shiyani L.N., Lobanova G.L., Yavorovskiy N.A. Vzaimodeystviye nanoporoshka alyuminiya s vodnym rastvorom soli margantsa (II) [Interaction of aluminum nanopowder with an aqueous solution of a manganese salt (II)]. *Izvestiy vusov. Fizika – Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7/2, pp. 211–215.
15. Gryaznova E.N., Shiyani L.N., Yavorovskiy N.A., Korobochkin V.V. Vliyaniye protsessa modifitsirovaniya na svoystva nanovolokon oksidirovaniya alyuminiya [Modification influence on AlOOH nanofiber properties]. *Zhurnal prikladnoy khimii – Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, vol. 86, no. 3, pp. 389–395.
16. Pakhomov N.A., Buyanov R.A. Sovremennyye tendentsii v oblasti razvitiya traditsionnykh i sozdaniya novykh metodov prigotovleniya katalizatorov [Current trends in improvement and development of catalyst preparation methods]. *Kinetika i kataliz – Kinetics and Catalysis*, 2005, vol. 46, no. 5, pp. 711–727.
17. Kortov V.S., Ermakov A.E., Zatselin A.F., Uymin M.A., Nikiforov S.V., Mysik A.A., Gaviko V.S. Osobennosti lyuminestsentnykh svoystv nanostrukturnogo oksida alyuminiya [Features of luminescent properties of nanostructured alumina]. *Fizika tverdogo tela*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 916–920.

УДК 661.571.1+66.091.3

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТИТАНОХРОМОВОГО ФЕРРОСПЛАВА С АЗОТОМ

Крюкова Ольга Геннадьевна,

канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории новых металлургических процессов Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра Сибирского отделения РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/4. E-mail: olchik4@yandex.ru

Чухломина Людмила Николаевна,

д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра Сибирского отделения РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 10/4. E-mail: liudnik@yandex.ru

Представлены результаты исследования механизма взаимодействия комплексного титанохромового ферросплава с азотом в изотермических и неизотермических условиях. Актуальность исследований имеет как научный, так и практический интерес, поскольку азотирование комплексного сплава, содержащего несколько нитридообразующих элементов, не исследовано. Изучение механизма нитридообразования в изотермических условиях осуществляли печным способом в трубчатой печи в атмосфере газообразного азота в диапазоне температур 700...1200 °С в течение 15, 30, 60, 120, 240 минут. Процесс азотирования в неизотермических условиях изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием синхронного термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в диапазоне температур 20...1500 °С в среде азота. Установлено, что процесс нитридообразования осуществляется за счет реакционной диффузии азота в хром- и титансодержащие фазы по твердофазному механизму с образованием нитридов хрома (CrN) и титана (TiN) с последующей их взаимной растворимостью и образованием твердого раствора Cr_{0,5}Ti_{0,5}N.

Ключевые слова:

Титанохромовый ферросплав, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, азотирование, изотермический синтез, дифференциальная сканирующая калориметрия.

Введение

Азот как легирующий элемент находит широкое применение при производстве коррозионно-стойких сталей благодаря упрочняющему воздействию без существенного изменения пластичности и коррозионной стойкости стали, а также как аустенитообразующий элемент – заменитель дорогостоящего никеля. Для легирования сталей азотом используются азотсодержащие ферросплавы в качестве легирующих добавок [1, 2].

Сотрудниками Отдела структурной макрокинетики Томского научного центра Сибирского отделения РАН разработана технология получения

азотированных ферросплавов (феррониобий, феррохром, ферросилиций и др.) с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3–8]. СВС- метод позволяет существенно снизить энергозатраты, продолжительность технологического процесса, получить продукт с максимальным содержанием азота, а также исключить попадание вредных выбросов в окружающую среду. На сегодняшний день СВС-технология получения азотированных ферросплавов освоена на ООО «НТПФ "Эталон"» (г. Магнитогорск), ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической технологии» (г. Ижевск), ООО

«Азотированные материалы-10» (г. Челябинск), на ОАО «Чусовской металлургический завод» (г. Чусовой, Пермский край).

В настоящее время одним из приоритетных направлений металлургической промышленности является получение высококонцентрированных азотсодержащих лигатур, содержащих одновременно несколько легирующих элементов. Данные материалы можно создавать на базе комплексных ферросплавов (сплавы, содержащие несколько нитридообразующих элементов), которые азотируют методом СВС.

На предприятии ОАО «Уралредмет» (г. Екатеринбург) выпускается комплексный титанохромовый ферросплав (ФТХ) по экологически чистой «бездымной миниметаллургической технологии». ФТХ востребован предприятиями черной металлургии, поскольку обладает одновременно модифицирующим и раскисляющим эффектом. Сплав выпускается нескольких марок (ФТХ 5...ФТХ 35) со следующим содержанием элементов, мас. %: Cr – 5...35; Ti – 15...30; Al – 5...10; Si – 5...8; остальное железо и микропримеси (менее 0,13).

В работе [9] нами было изучено влияние основных параметров СВС-процесса (дисперсность сплава, давление азота, диаметр образца) на закономерности синтеза и фазовый состав продуктов азотирования ФТХ. Исследования показали, что основным параметром, влияющим на процесс горения, является дисперсность и фазовый состав исходного ферросплава. Увеличение давления азота с 0,6 до 5 МПа и диаметра образца с 30 до 50 мм приводит к увеличению содержания азота в продуктах горения. На основании полученных результатов был осуществлен синтез азотированного ФТХ в реакторе опытно-промышленного типа и наработана опытная партия этого легирующего материала. Разработанная технология [10] позволяет получать крупногабаритные спеки азотированного ФТХ, являющегося эффективным легирующим материалом при выплавке сталей и чугунов.

Несмотря на то, что азотированный ФТХ можно получать в промышленных масштабах, невыясненным остается вопрос о механизме нитридообразования сплава, имеющего в своем составе четыре нитридообразующих элемента (Ti, Cr, Al, Si). Настоящая работа посвящена исследованию механизма взаимодействия ФТХ с азотом с использованием методов изотермического синтеза и дифференциальной сканирующей калориметрии. Знание механизма данного процесса имеет как практический, так и научный интерес, поскольку азотирование сплавов, содержащих несколько нитридообразующих элементов, не исследовано.

При азотировании ФТХ процесс нитридообразования может осуществляться за счет взаимодействия с азотом Cr, Ti, Al и Si. (Нитриды железа (Fe_4N , Fe_3N , Fe_2N) в исследуемых условиях не образуются. Для синтеза нитридов железа используется аммиак или аммиачно-водородная смесь [11]). Для понимания сложного процесса азотирования

сплава рассмотрим известные литературные данные по азотированию элементарных порошков Ti, Cr, Si и Al.

В системе Ti-N обнаружены четыре фазы: β , α , ε , δ [12]. Перетектоидная фаза β -TiN содержит около 1,4 % азота и образуется при реакции между α -твердым раствором азота в титане и расплавом при 2020 ± 25 °C. Растворимость азота в α -Ti при температуре перетектоидной реакции лежит в пределах 6,5...7,4 %. ε -фаза, которой приписывают условную формулу Ti_2N , гомогенна в пределах 6,8...8,9 % азота. Область гомогенности нитрида титана TiN [13] составляет 10...23 % азота. Нижний предел области гомогенности соответствует формуле $TiN_{0,6}$ (14,8 % азота). Верхняя граница области гомогенности нитрида титана соответствует формуле $TiN_{1,0}$.

В системе Cr-N образуются два нитрида: Cr_2N с областью гомогенности 9,3...11,9 % азота и CrN с очень узкой областью гомогенности и максимальным содержанием азота 21,7 %. При азотировании порошка хрома максимальное поглощение азота хромом происходит в интервале температур 800...1000 °C с образованием CrN, а при температуре более 1000 °C термически неустойчивая фаза CrN превращается в Cr_2N [11].

В системе Si-N образуется одно химическое соединение Si_3N_4 в двух полиморфных модификациях α и β с содержанием азота 39,9 %.

В системе Al-N образуется нитрид алюминия AlN с содержанием азота 34,9 %. Температура интенсивного взаимодействия Al с азотом очень сильно зависит от дисперсности исходного алюминия. При азотировании пудры (ПАК-4) образование нитрида AlN начинается уже при 400 °C, а особенно интенсивно происходит при 720...730 °C. Азотирование порошка ПА-4 начинается при 600 °C, до 800 °C количество AlN не превышает 1,0 % [14].

Экспериментальная часть

В качестве исходного сырья использовался сплав марки ФТХ 25 с размером частиц менее 80 мкм. Содержание основных элементов, %: Cr – 23,4; Ti – 20,2; Fe – 42,2; Al – 6,2; Si – 6,4. Согласно результатам рентгенофазового анализа полидисперсный титанохромовый ферросплав состоит из следующих фаз: Cr(Fe,Cr), Fe_2Ti , Cr_2Ti .

Результаты локального микрорентгеноспектрального анализа сплава свидетельствуют о том, что титан в сплаве находится в виде интерметаллических соединений (Fe_2Ti , Cr_2Ti), а хром – в виде твердого раствора в железе, а также в виде самостоятельной фазы (рис. 1, точки 1–12). Алюминий (точки 13 и 14) и кремний (точка 15) находятся в исходном ферросплаве в виде отдельных частиц.

Для изучения механизма нитридообразования проводили детальные исследования взаимодействия титанохромового ферросплава с азотом в изотермических (печное азотирование) и неизотермических условиях. Азотирование печным способом осуществляли в трубчатой печи в атмосфере

газообразного азота (ГОСТ 9293–74), с содержанием азота 99,996 об. %, в диапазоне температур 700...1200 °С в течение 15, 30, 60, 120, 240 минут. Порошок засыпали в корундовые лодочки, помещали в предварительно нагретую до заданной температуры печь и выдерживали заданное время. Общее содержание азота в продуктах синтеза предварительно определяли путем взвешивания образцов до и после азотирования с точностью до ±0,005 г. Более точное содержание азота определяли с помощью химического анализа – метод Кьельдаля. Процесс азотирования в неизотермических условиях изучали с использованием синхронного термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter в диапазоне температур 20...1500 °С в среде азота (марка ОСЧ). В качестве эталона применяли оксид алюминия. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили с использованием дифрактометра ДРОН-2 (Со-излучение). При индифференцировании рентгенограмм использовали рентгеновскую базу данных JCPDS. Особенности микроструктуры, распределение элементов по образцу изучали с помощью локального рентгеноспектрального анализа (МРСА) (рентгеновский микроанализатор «САМЕВАХ MICROBEAM»).

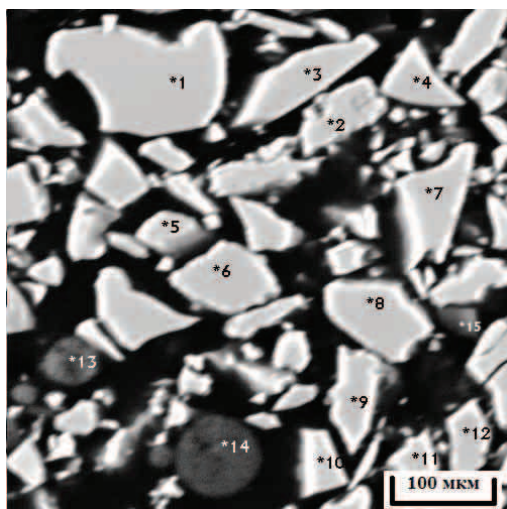


Рис. 1. Микрофотография исходного титанохромового ферросплава (увеличение в 500 раз)

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что при азотировании ФТХ в изотермических условиях (рис. 2) в интервале температур 700...900 °С с увеличением времени азотирования увеличивается содержание азота в продуктах (кривые 1–3). При температурах 1000...1200 °С основное насыщение азотом сплава происходит в первые 15...60 минут, а при более длительной выдержке содержание азота растет незначительно (кривые 4–6).

Согласно результатам рентгенофазового анализа в интервале температур 700...800 °С наблюдается образование нитридов титана (TiN) и хрома (CrN), причем с увеличением времени азотирования интенсив-

ности рефлексов обоих нитридов увеличиваются. Образование CrN происходит за счет реакционной диффузии азота в хром (1) и за счет взаимодействия твердого раствора хрома в железе (2), а TiN за счет взаимодействия с азотом титана, находящегося в сплаве в виде соединений Fe₂Ti (3) и Cr₂Ti (4).

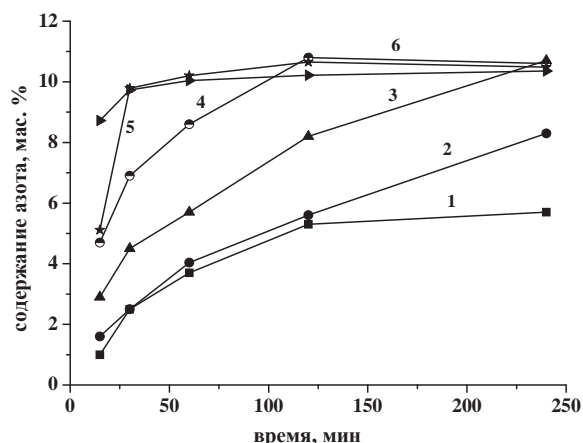
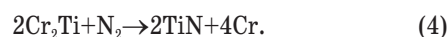
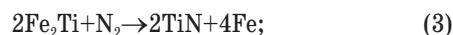


Рис. 2. Зависимость содержания азота в продуктах азотирования от времени нагрева ФТХ при различных температурах, °С: 1) 700; 2) 800; 3) 900; 4) 1000; 5) 1100; 6) 1200

Наряду с нитридами хрома и титана в продуктах азотирования остаются непрореагировавшие компоненты исходного сплава (Fe₂Ti, Cr₂Ti, (Fe,Cr), Cr). Рефлексы данных фаз по мере увеличения времени и температуры азотирования уменьшаются. При температурах азотирования 900...1000 °С происходят аналогичные процессы образования нитридов титана и хрома.

Интенсивное взаимодействие алюминия с азотом с образованием AlN осуществляется при температуре 1000 °С, начиная с выдержки 15 минут. Увеличение как времени азотирования при температуре 1000 °С, так и температуры азотирования до 1200 °С способствует дальнейшему процессу нитридообразования AlN (рис. 3).

Образование Si₃N₄ в процессе азотирования сплава начинается при температуре 1100 °С при выдержке 15 минут. При дальнейшем увеличении времени и температуры интенсивность рефлексов Si₃N₄ растет незначительно (рис. 3).

Детальное исследование фазового состава продуктов азотирования изотермического синтеза показало, что начиная с температуры 1100 °С независимо от времени азотирования на рентгенограммах регистрируется смещение дифракционных максимумов, увеличение ширины и интенсивности рефлексов фазы TiN (рис. 3, б). Это может свидетельствовать об образовании твердого раствора нитрида хрома в нитриде титана, поскольку они обладают полной взаимной

растворимостью [15]. Действительно, экспериментально полученный ряд межплоскостных расстояний при сравнении с табличными значениями для нитрида титана и твердого раствора нитрида хрома в нитриде титана указывает на образование в процессе азотирования ФТХ твердого раствора замещения состава $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$ (табл. 1).

зависимости наблюдается прирост массы, обусловленный, вероятно, образованием TiN и CrN , как следует из результатов азотирования ФТХ в изотермических условиях.

Таблица. Экспериментальные межплоскостные расстояния и табличные данные картотеки JCPDS для TiN и твердого раствора замещения $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$

TiN , d (Å°) [JCPDS]	$Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$, d (Å°) [JCPDS]	Продукт азотирования ФТХ, d (Å°)
2,449	2,430	2,430
2,121	2,104	2,105
1,500	1,488	1,490
1,279	1,268	1,270
1,224	1,214	1,218

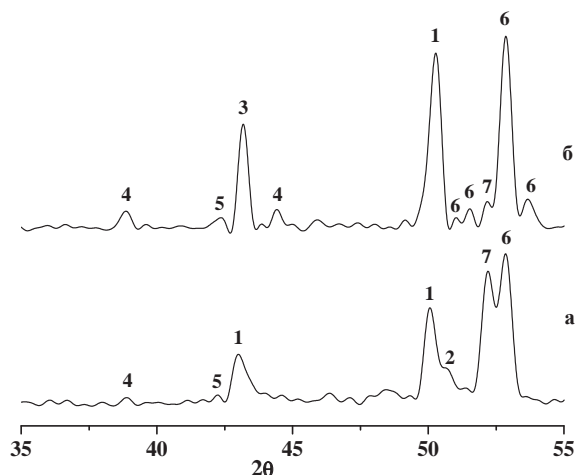


Рис. 3. Фрагменты рентгенограмм продуктов азотирования ФТХ: а) температура азотирования 1000 °С, время нагрева 60 мин.; б) 1200 °С, 240 мин.; 1) TiN ; 2) CrN ; 3) $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$; 4) AlN ; 5) Si_3N_4 ; 6) (Fe, Cr) ; 7) Cr

В интервале температур 930...1050 °С на ДСК-зависимости наблюдается эндотермический эффект с максимумом при температуре 1030 °С, обусловленный разложением моонитрида хрома по газоперитектоидной реакции [16]:



После эндотермического эффекта наблюдается незначительный подъем на ДСК-зависимости, которому соответствует прирост массы на кривой ТГ. При дальнейшем азотировании на ДСК регистрируется два эндотермических максимума при 1300 и 1430 °С. В соответствии с диаграммой состояния Fe-Ti [17] эндотермический эффект при 1300 °С соответствует эвтектическому взаимодействию соединения Fe_2Ti с α -твердым раствором (α -Fe), при температуре 1430 °С осуществляется плавление Fe_2Ti , а также плавление кремния. Это способствует активации экзотермического процесса нитридообразования, что отражает резкое изменение хода ДСК-зависимости.

Стадии взаимодействия ферросплава с азотом, установленные в условиях изотермического (700...1200 °С) и неизотермического (20...1500 °С)

Поскольку СВ-синтез характеризуется высокой скоростью превращений, изучение конкретных химических взаимодействий в процессе горения затруднительно. Поэтому исследование процесса азотирования проводили в неизотермическом режиме с использованием комплексного термического анализа. На рис. 4 представлены зависимости термогравиметрического анализа (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) порошка сплава в атмосфере азота. При температуре выше 600 °С на термогравиметрической

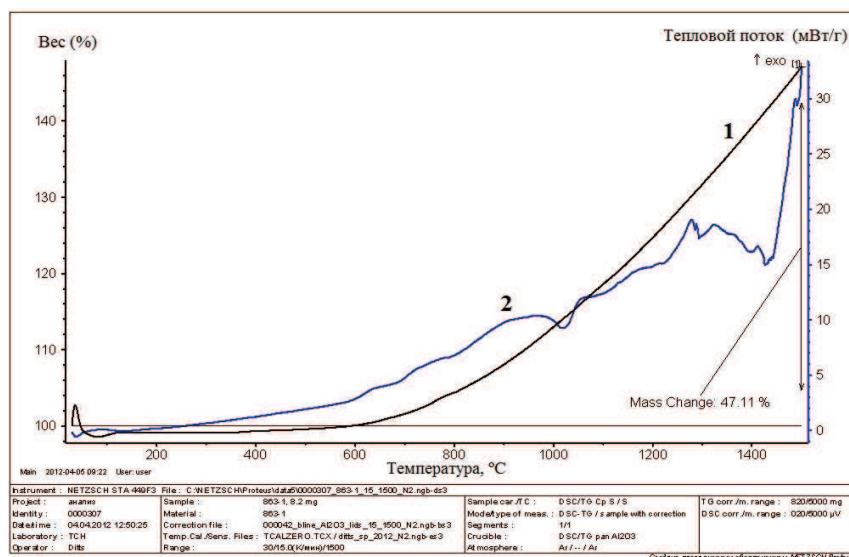


Рис. 4. Зависимости ТГ (1), ДСК (2) комплексного термического анализа порошка ФТХ в азоте

синтеза, вероятно, будут реализовываться и в условиях СВС. При распространении реакционной волны горения в зависимости от температуры синтеза вероятны следующие превращения:

- в интервале температур 600...1000 °С образование TiN и CrN по твердофазному механизму за счет реакционной диффузии азота в титан- и хромсодержащие фазы;
- при температуре 1050 °С разложение мононитрида хрома по газоперитектоидной реакции;
- при температуре 1100 °С и более взаимная растворимость нитридов титана и хрома с образованием твердого раствора замещения $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$; образование нитридов алюминия и кремния.

Согласно результатам РФА [9] в продуктах азотирования сплава методом СВС основной фазой яв-

ляется твердый раствор замещения $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$ (~40 %), нитриды алюминия и кремния образуются в незначительных количествах (~ по 5 %), а также остается исходный непрореагировавший (Fe,Cr) (~50 %). Наличие исходного компонента сплава (Fe, Cr) свидетельствует о незавершенности процесса нитридообразования.

Заключение

Установлено, что взаимодействие комплексного ФТХ с азотом осуществляется посредством реакционной диффузии азота в титан- и хромсодержащие фазы с образованием соответствующих нитридов титана и хрома, их последующей взаимной растворимостью с образованием твердого раствора замещения $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 789 с.
2. Способ получения азотированных ферросплавов: пат. Рос. Федерация. № 2184170; заявл. 04.09.2000; опубл. 27.06.2002, Бюл. № 4. – 5 с.
3. Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М. Закономерности синтеза нитрида хрома при горении феррохрома в азоте // Журнал прикладной химии. – 2009. – Т. 82. – Вып. 5. – С. 705–710.
4. Chukhlomina L.N., Ziatdinov M. Kh. Investigation and Properties of Niobium Nitrides Obtained from SHS Nitrided Ferroniobium // The International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2002. – V. 11. – № 1. – P. 55–63.
5. О механизме и закономерностях азотирования ферросилиция в режиме горения / Л.Н. Чухломина, Ю.М. Максимов, В.Д. Китлер, О.Г. Витушкина // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42. – № 3. – С. 71–77.
6. Фазовый состав и морфология продуктов горения ферросилиция в азоте / Л.Н. Чухломина, Ю.М. Максимов, О.Г. Витушкина, Н.Н. Голобоков, В.И. Верещагин // Стекло и керамика. – 2007. – № 2. – С. 28–30.
7. Чухломина Л.Н. Закономерности синтеза нитрида кремния горением сплава железо-кремний в азоте // Журнал прикладной химии. – 2007. – Т. 80. – № 11. – С. 1768–1772.
8. Чухломина Л.Н., Максимов Ю.М. Влияние содержания кремния в исходном сплаве на синтез нитрида кремния при горении ферросилиция в азоте // Стекло и керамика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.
9. Чухломина Л.Н., Витушкина О.Г., Хабас Т.А. Азотирование титанохромового ферросплава методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Известия Высших учебных заведений. Физика. – 2013. – № 7/2. – С. 22–25.
10. Способ получения азотсодержащего сплава для легирования стали и чугуна и азотсодержащий сплав для легирования стали и чугуна: пат. Рос. Федерация. № 2479659; заявл. 12.08.2011; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11. – 6 с.
11. Самсонов Г.В. Нитриды. – Киев: Наукова думка, 1969. – 378 с.
12. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. – М.: Мир, 1974. – 294 с.
13. Швейкин Г.П., Алямовский С.И., Зайнулин Ю.Г. и др. Соединения переменного состава и их твердые растворы. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. – 292 с.
14. Репкин Ю.Д., Самсонов Г.В. Получение нитрида алюминия азотированием алюминиевого порошка и пудры // Порошковая металлургия. – 1963. – № 5. – С. 68–76.
15. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов / пер. с нем. под ред. Ю.В. Левинского. – М.: Металлургия, 1988. – 319 с.
16. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т.: Т. 2 / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.
17. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / под ред. О.А. Банньих. – М.: Металлургия, 1986. – 439 с.

Поступила 08.10.2013 г.

UDC 661.571.1+66.091.3

INTERACTION OF A TITANIUM-CHROMIUM FERROALLOY WITH NITROGEN

Olga G. Kryukova,

Cand. Sc., Tomsk Scientific Center of SB RAS, Russia, 634021, Tomsk,
Akademicheskyy avenue, 10/4. E-mail: olchik4@yandex.ru

Liudmila N. Chukhlomina,

Dr. Sc., Tomsk Scientific Center of SB RAS, Russia, 634021, Tomsk,
Akademicheskyy avenue, 10/4. E-mail: liudnik@yandex.ru

The paper introduces the results of studying mechanism of interaction between a complex titanium-chromium ferroalloy and nitrogen under isothermal and non-isothermal conditions. The relevance of the research has both scientific and practical interest, as nitriding of a complex alloy containing several nitride-forming elements has not been investigated. The mechanism of nitride formation was studied under isothermal conditions in a resistance tube furnace under gaseous nitrogen in the temperature range of 700... 1200 °C for 15, 30, 60, 120 and 240 minutes. Nitriding under isothermal conditions was studied by differential scanning calorimetry using a synchronous thermal analyzer Netzsch STA 449 F3 Jupiter in the temperature range of 20...1500 °C under nitrogen. The process of nitride formation is found to be initiated due to reaction diffusion of nitrogen into chromium- and titanium-containing phases by solid phase mechanism to form nitrides of chromium (CrN) and titanium (TiN) with subsequent mutual dissolution and formation of a solid solution $Cr_{0,5}Ti_{0,5}N$.

Key words:

Titanium-chromium ferroalloy, self-propagating high-temperature synthesis, nitriding, isothermal synthesis, differential scanning calorimetry.

REFERENCES

1. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov* [Theory and technology of producing ferro alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 789 p.
2. Karev V.A., Kerdan V.I. *Sposob polucheniya azotirovannykh ferrosplavov* [The method of obtaining ferro alloys]. Patent RF, no. 2184170, 2002.
3. Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M. Zakonomernosti sinteza nitrida khroma pri gorenii ferrokroma v azote [Laws of nitride chromium synthesis at ferrochromium combustion in nitrogen]. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2009, vol. 82, Iss. 5, pp. 705–710.
4. Chukhlomina L.N., Ziatdinov M. Kh. Investigation and Properties of Niobium Nitrides Obtained from SHS Nitrided Ferroniobium. *The International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2002, vol. 11, no. 1, pp. 55–63.
5. Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M., Kitler V.D., Vitushkina O.G. O mekhanizme i zakonomernostyakh azotirovaniya ferrosilitsiya v rezhime gorenii [Mechanism and laws of ferrosilicon nitration under combustion conditions]. *Fizika goreniiya i vzryva*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 71–77.
6. Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M., Vitushkina O.G., Golobokov N.N., Vereshchagin V.I. Fazovy sostav i morfologiya produktov gorenii ferrosilitsiya v azote [Phase composition and morphology of ferrosilicon combustion products in nitrogen]. *Steklo i keramika*, 2007, no. 2, pp. 28–30.
7. Chukhlomina L.N. Zakonomernosti sinteza nitrida kremniya goreniiem splava zhelezo-kremniy v azote [Laws of synthesis of silicon nitride by combustion of iron-silicon alloy in nitrogen]. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2007, vol. 80, no. 11, pp. 1768–1772.
8. Chukhlomina L.N., Maksimov Yu.M. Vliyaniye sodержaniya kremniya v iskhodnom splave na sintez nitrida kremniya pri gorenii ferrosilitsiya v azote [Silicon content influence in initial alloy on silicon nitride synthesis when combusting ferrosilicon in nitrogen]. *Steklo i keramika*, 2008, no. 4, pp. 22–24.
9. Chukhlomina L.N., Vitushkina O.G., Khabas T.A. Azotirovanie titanokhromovogo ferrosplava metodom samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza [Nitration of titanium-chromium ferro alloy by self-propagating high-temperature synthesis]. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2013, no. 7/2, pp. 22–25.
10. Chukhlomina L.N., Kolba A.V., Vitushkina O.G., Bolgaru K.A., Maksimov Yu.M., Zelyansky A.V., Rylov A.N., Trubachev M.V., Selivanov S.N., Zagorodnyy A.A. Sposob polucheniya azotso-dержashchego splava dlya legirovaniya stali i chuguna i azotso-dержashchiy splav dlya legirovaniya stali i chuguna [Method for obtaining nitrogen-containing alloy for alloying of steel and cast iron, and nitrogen-containing alloy for steel and cast iron alloying]. Patent RF no. 2479659, 2013.
11. Samsonov G.V. *Nitridy* [Nitrides]. Kiev, Naukova dumka, 1969. 378 p.
12. Tot L. Karbidy i nitridy perekhodnykh metallov [Carbides and nitrides of transition metals]. Moscow, Mir Publ., 1974. 294 p.
13. Shveykin G.P., Alyamovsky S.I., Zaynulin Yu.G. *Soedineniya perennogo sostava i ikh tverdye rastvory* [Compounds of variable composition and their solid solutions]. Sverdlovsk, UNC AN SSSR Publ., 1984. 292 p.
14. Repkin Yu.D., Samsonov G.V. Poluchenie nitrida alyuminiya azotirovaniem alyuminievogo poroshka i pudry [Preparation of aluminum nitride by aluminum powder nitration]. *Poroshkovaya metallurgiya*, 1963, no. 5, pp. 68–76.
15. Khollek Kh. *Dvoynye i troynye karbidnye i nitridnye sistemy perekhodnykh metallov* [Double and triple carbide and nitride systems of transition metals]. Translated from German by Yu.V. Levinsky. Moscow, Metallurgiya publ., 1988. 319 p.
16. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem: Spravochnik [Structural diagrams of double metal systems. Manual]. Ed. by N.P. Lyakishev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. Vol. 2, 1024 p.
17. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza* [Structural diagrams of double and multi-component iron-based systems]. Ed. by O.A. Bannykh. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 439 p.