

УДК 536.74,621.762.2

ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ В СИСТЕМЕ 2Co—Ti—Al: ГОРЕНИЕ, ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА

М. Л. Бусурина, А. Е. Сычёв, И. Д. Ковалёв, А. В. Карпов, Н. В. Сачкова

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова РАН, 142432
Черноголовка, busurina@ism.ac.ru

Исследованы особенности горения, структуро- и фазообразования в системе 2Co—Ti—Al в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме теплового взрыва. Установлено, что в данной системе возможно получение однофазного продукта — соединения Гейслера Co₂TiAl. Изучены морфология, микроструктура, физические и магнитные свойства продуктов горения системы.

Ключевые слова: интерметаллиды, тепловой взрыв, фаза Гейслера Co₂TiAl.

DOI 10.15372/FGV20200308

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, помимо практически значимых для создания конструкционных материалов бинарных систем Ni—Al и Ti—Al [1, 2], активно исследуются и соединения на основе тройных интерметаллидных систем, относящиеся к типу так называемых полуметаллических ферромагнетиков [3]. Такие соединения представляют интерес ввиду их уникальных физических свойств, таких как гигантское магнетосопротивление, эффект Холла, ферро-, антиферро- и ферримагнетизм, полупроводниковые свойства и др. Изучение свойств таких материалов и их функциональной зависимости от химического состава и структуры соответствующего соединения является перспективной задачей для современной электроники. Одними из таких материалов являются сплавы Гейслера — тройные интерметаллические соединения общей формулы X₂YZ, где X, Y — переходные металлы, Z — элементы III–IV групп [4]. Сплавы Гейслера проявляют свойства памяти формы [5], сверхупругости, магнитооптические [6] и магнитокалорические свойства [7], имеется также возможность управления этими эффектами с помощью магнитного поля. Одним из перспективных соединений на основе тройной интерметаллидной системы Co—Ti—Al является сплав Гейслера Co₂TiAl [8]. Система Al—Co—Ti впервые была исследована в работе [9], где сплавы получали плавлением йодистого титана, кобальта и алюминия в среде гелия в ду-

говой печи с вольфрамовым электродом с использованием медной формы с водяным охлаждением.

Соединения тройной системы Co—Ti—Al получают различными способами: дуговой плавкой [8–12], ударно-волновым синтезом [13], искровым плазменным спеканием [14]. В подавляющем большинстве работ объемные поликристаллические образцы Co₂TiAl получали методом дуговой плавки.

В практике создания интерметаллидных материалов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) довольно широко изучен вопрос получения интерметаллидов как бинарных, так и тройных систем [15–18].

Цель настоящей работы — исследование особенностей формирования интерметаллидного материала на основе фазы Гейслера в системе 2Co—Ti—Al, синтезируемого методом СВС в режиме теплового взрыва.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использовались порошки кобальта Co (размер частиц ≈20 мкм), титана Ti (ПТМ, ≈11 мкм) и алюминия Al (АСД-4, ≈6 мкм). Исходные порошки смешивали до получения однородной смеси состава 2Co + Ti + Al, из которой прессовали образцы прямоугольного сечения размером 15 × 10 × 3 мм, массой 2 г. Спрессованные образцы помещали в печь вакуумного универсального поста (ВУП-5) и нагревали со скоростью ≈100 °C/мин до начала иницииро-

вания СВС-реакции. Температура регистрировалась вольфрам-рениевой термопарой ВР 5/20 (максимальная погрешность измерения не превышала ± 10 °С), расположенной в углублении на нижней поверхности образца. После иницирования СВС-реакции нагрев печи отключался. Синтез проходил как в вакууме при давлении $13.3 \cdot 10^{-2}$ Па, так и в аргоне при $\approx 10^5$ Па.

Исследование динамики фазовых превращений в процессе СВС проводилось на специальной установке методом времяразрешающей динамической рентгенографии [19]. Использовалось монохроматизированное излучение Fe K_{α} , в качестве монохроматора применялся пиролитический графит. Образец прямоугольной формы размером $13 \times 15 \times 5$ мм помещали в печь сопротивления с окнами для прохождения рентгеновского излучения, смонтированную в реакционной камере. Первичный пучок направлялся на поверхность образца в его центральной части под углом $\approx 20^\circ$ и облучал площадь размером 2×10 мм. Угловой интервал регистрации составлял $2\theta = 35 \div 78^\circ$. Регистрировали несколько последовательных серий, каждая из которых содержала 64 рентгенограммы и характеризовала эволюцию материала в течение нагрева и охлаждения образца. Температуру измеряли термопарой типа ВР 5/20, спай которой касался поверхности образца в его центральной части. Эксперименты проводили в среде гелия (давление $\approx 0.2 \cdot 10^5$ Па). Скорость нагрева составляла $80 \div 100$ °С/мин. После воспламенения образца нагрев внешним источником отключался.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных образцов выполняли на дифрактометре ДРОН-3М, излучение Fe K_{α} . Регистрация дифрактограмм велась в режиме пошагового сканирования в интервале углов $2\theta = 30 \div 90^\circ$ с шагом съемки 0.02° и временем набора 2 с. Уточнение атомной структуры и количественный анализ проводились методом полнопрофильного анализа в программном пакете PDWin НПП «Буревестник».

Для регистрации масс-спектров и послонных распределений вторичных ионов синтезированного материала использовался времяпролетный масс-спектрометр TOF.SIMS-5.

Дифференциальный термический анализ (ТГ/ДТА) проводили на термоанализаторе Pyris Diamond (TG/DTA6300). Магнитные характеристики измеряли на порошковых образцах с помощью вибрационного магнитомет-

ра М4500 (EG&G PARC, США) в магнитных полях до 0.8 МА/м при комнатной температуре. Электросопротивление синтезированных образцов измеряли по стандартной четырехконтактной методике.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Результаты экспериментов показали, что синтез образцов в системе 2Co—Ti—Al происходит в режиме теплового взрыва. Реакция одновременно протекает во всем объеме образца, при этом максимальная скорость подъема температуры достигала 3500 °С/с. Температура начала СВС-реакции в вакууме (рис. 1) составляет $T_{ign} = 565$ °С, что почти на 100 °С ниже температуры плавления алюминия Al и может свидетельствовать о начале твердофазного протекания реакции [20]. Максимальная температура образца в условиях теплового взрыва в вакууме составляет 1470 °С.

При горении в аргоне ($\approx 10^5$ Па) температура иницирования реакции выше, чем в вакууме, — 690 °С. Скорость охлаждения образцов в среде аргона также выше, что объясняется более высоким теплоотводом. Максимальная температура горения в среде аргона — 1476 °С, что близко к температуре плавления кобальта (1494 °С).

Рентгенофазовый анализ материала (рис. 2), синтезированного в вакууме, показал наличие фазы Co_2AlTi (card PDF № 030-65-4682) — фазы Гейслера, массовое содержание которой составило 99 %. Общее

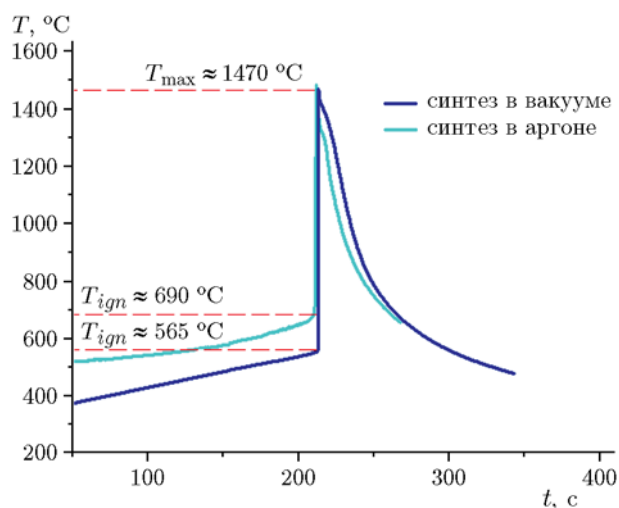


Рис. 1. Термограммы процесса горения образцов состава 2Co + Ti + Al в вакууме и аргоне

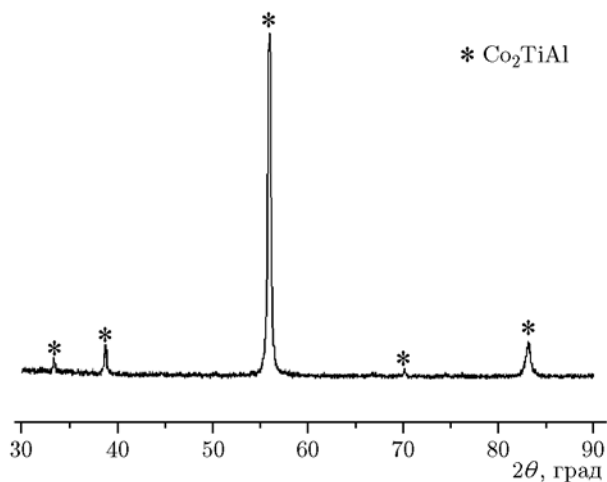


Рис. 2. Дифрактограмма продуктов горения системы 2Co—Ti—Al

содержание примесных фаз Co_3Ti , Co_2Ti не превышало 1 %.

Параметр элементарной ячейки Co_2TiAl составил $a = 5.8433 \pm 0.0002 \text{ \AA}$. Из литературы известны следующие значения этого параметра: 5.870 [21], 5.850 [22], 5.8378 [8], 5.847 \AA [23]. Соединение имеет гранецентрированную кубическую решетку ($Fm\bar{3}m$), структурный прототип AlCu_2Mn .

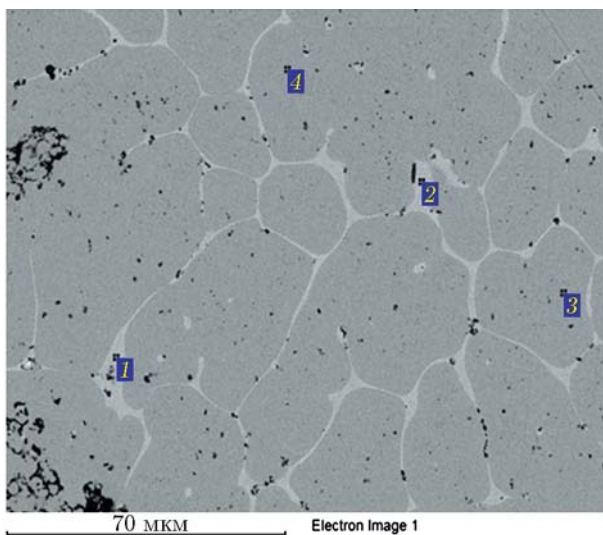
Для синтезированного материала характерна однородная микроструктура (рис. 3), состоящая из округлых зерен тройной фазы Co_2TiAl со средним размером зерна 20 мкм. Результаты энергодисперсионного анализа под-

твердили химический состав основной фазы Co_2TiAl . Однако имеются участки, где зёрна тройной фазы Co_2AlTi разделены прослойкой на основе интерметаллида переменного состава TiCo_x толщиной до 10 мкм. Выделение вторичных интерметаллидов TiCo_x на стадии охлаждения, возможно, связано со скоротечностью процесса горения и быстрого остывания, что влияет на полноту взаимодействия исходных реагентов и образование тройной интерметаллидной фазы Co_2TiAl .

На рис. 4,б представлены профили концентраций элементов в переходной зоне зерно — межзеренная прослойка — зерно. Зёрна Co_2AlTi имеют постоянный химический состав по Co, Ti и Al вдоль всей линии сканирования (рис. 4,а). Профиль концентрации элементов в межзеренном пространстве показывает резкое падение практически до нуля концентрации атомов Al и небольшое повышение содержания атомов Co и Ti.

На фотографии излома синтезированного образца различимы зёрна фазы Co_2TiAl (рис. 5). Поверхность разрушения образца имеет характерный вид хрупкого разрушения с рыхлым изломом. Плотность материала составила 5.9 г/см^3 , что ниже теоретической плотности 6.4 г/см^3 и обусловлено пористостью образца. Размер пор достигает $50 \div 100 \text{ мкм}$.

Результаты, полученные по методике времязазревающей динамической рентгенографии, показали, что фазообразование проходит



Спектр	Al	Ti	Co
1	2.32	18.00	73.88
2	1.54	24.58	73.88
3	15.86	22.74	61.40
4	15.23	23.63	61.13

Рис. 3. SEM-изображение поверхности шлифа образца продуктов горения смеси 2Co—Ti—Al и ЭДА (ат. %)

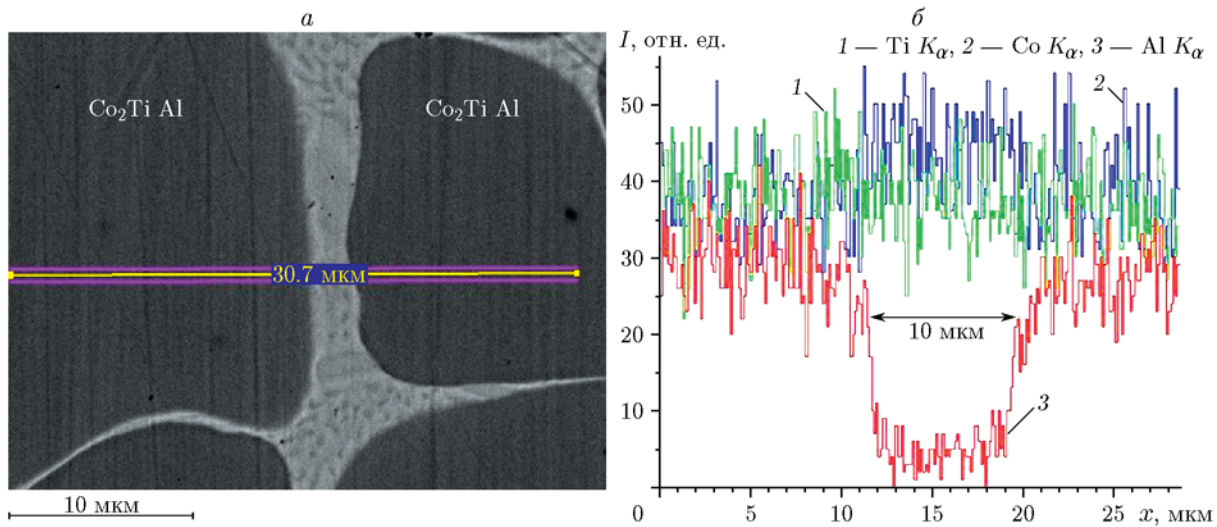


Рис. 4. Микроструктура (а) и распределение концентраций элементов зерно — межзеренная прослойка — зерно (б) вдоль линии сканирования (см. рис. 4, а)

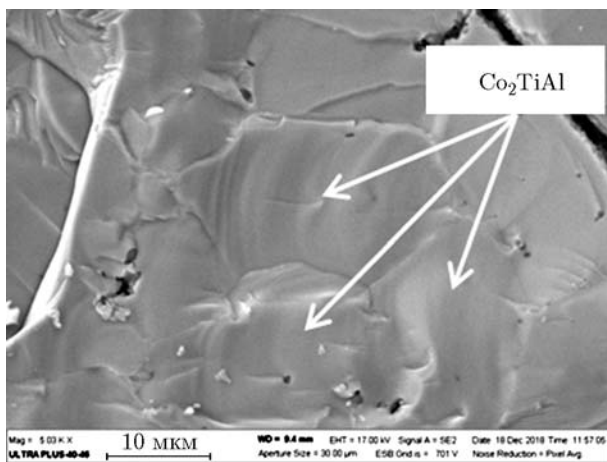


Рис. 5. Излом синтезированного образца системы 2Co-Ti-Al

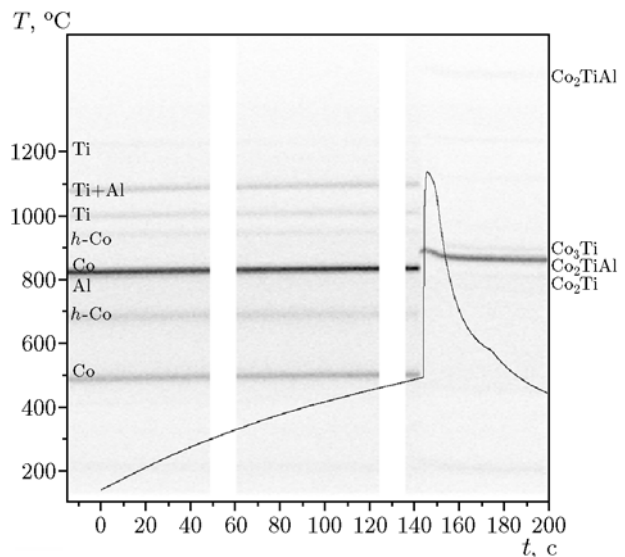


Рис. 6. Дифракционная картина фазовых превращений при синтезе в режиме теплового взрыва в системе 2Co-Ti-Al

несколько последовательных стадий. На дифракционном поле при нагреве от комнатной температуры до температуры воспламенения наблюдаются только линии исходных реагентов Ti, Al и Co кубической и гексагональной модификации (рис. 6). При экзотермической реакции, которая инициировалась при температуре, близкой к температуре плавления Al, линии исходных реагентов исчезают за время не больше 1 с. После исчезновения этих линий на дифракционном поле возникают линии 200 и 220 фазы Co_2TiAl . Далее наблюдается резкое их смещение в область больших углов вследствие охлаждения образца после протекания реакции за счет интенсивного теплоотвода в среде гелия

в отсутствие внешнего подвода тепла. Через 9 с после воспламенения на дифракционном поле появляются слабые дифракционные линии, идентифицируемые как линии 111 и 114 интерметаллидов Co_3Ti и Co_2Ti соответственно (см. рис. 6).

Кинетика изменения интенсивности основных дифракционных линий исходных компонентов и образующихся фаз при нагревании, тепловом взрыве и последующем охлаждении образца представлена на рис. 7. Появление и

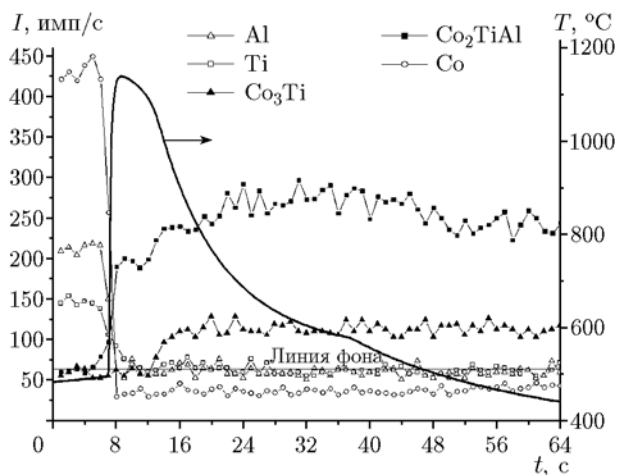


Рис. 7. Кинетика фазового превращения при синтезе Co_2TiAl в режиме теплового взрыва в среде гелия

рост интенсивности линии, соответствующей фазе Co_2TiAl в момент теплового взрыва, показывают, что основное тепловыделение при синтезе связано с образованием фазы Гейслера.

РФА поверхности продукта, синтезированного в результате экспериментов времяразрешающей динамической рентгенографии, показал, что основной является фаза Co_2TiAl , массовое содержание которой составило 72 %. Содержание вторичных фаз — интерметаллидов Co_3Ti , Co_2Ti и Al_2O_3 соответствует 2, 10 и 16 %. Высокое содержание Al_2O_3 в продуктах синтеза по результатам динамической рентгенографии можно объяснить тем, что РФА проводился с боковой поверхности образца, которая контактировала с окружающей средой, где примеси кислорода присутствуют как из-за недостаточной чистоты гелия, так и из-за его низкого давления — 0.02 МПа. Методика времяразрешающей динамической рентгенографии не позволяет проводить эксперимент в полностью бескислородной среде, а высокая скорость охлаждения, особенно поверхностных слоев, формирует концентрационную неоднородность состава. В результате на стадии охлаждения наблюдается выделение вторичных интерметаллидных фаз Co_3Ti и Co_2Ti , которые расположены в межзеренных областях основной фазы (см. рис. 3, 4).

Необходимо отметить, что после проведения СВС на установке ВУП в среде аргона продукты горения измельчались до порошкового состояния, поэтому методом РФА определялось объемное содержание фаз. В этом случае

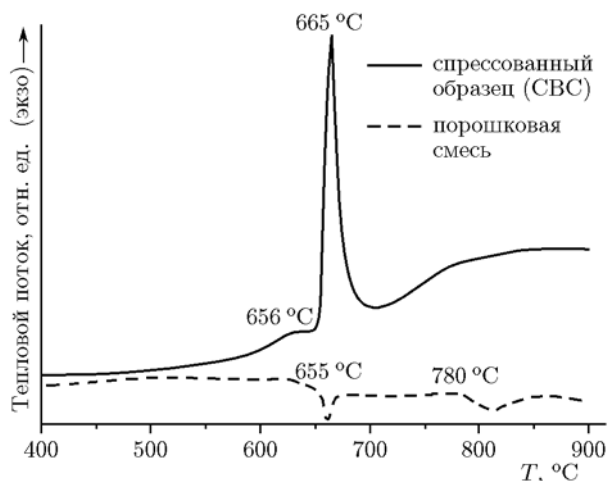


Рис. 8. Дифференциальный термический анализ спрессованного образца и порошковой навески состава $2\text{Co} + \text{Ti} + \text{Al}$

оксидных фаз не наблюдалось, а содержание вторичных интерметаллидов, как уже упоминалось выше, не превышало 1 %.

Спектральный анализ синтезированных образцов показал достаточно однородное распределение вторичных ионов Al^+ , Ti^+ , Co^+ на поверхности образца, однако можно отметить вероятные границы зерен, где концентрация ионов алюминия Al^+ падает. Эти данные коррелируют с результатами энергодисперсионного анализа элементов в области зерно — межзеренная прослойка — зерно (см. рис. 4).

Травление образца ионами кислорода в течение часа выявило постоянство концентрации вторичных ионов Al^+ , Ti^+ , Co^+ , AlCo^+ , TiCo^+ и TiAl^+ по глубине травления. В процессе травления также наблюдалось локальное падение количества ионов алюминия Al^+ , что может быть связано как с попаданием ионного пучка на межзеренную границу, так и, возможно, с сильным рассеянием вторичных ионов на границе зерно — пора.

Для определения возможных фазовых переходов и оценки тепловых эффектов был проведен дифференциально-термический анализ в диапазоне температуры $20 \div 900$ °C порошковой реакционной смеси и смеси, спрессованной в таблетку диаметром 3 мм и высотой 2 мм (рис. 8).

Анализ ДТА порошковой реакционной смеси (штриховая линия на рис. 8) показал, что инициирование СВС-реакции не происходило. На кривой ДТА присутствуют два эндотерми-

ческих эффекта. Первый в районе $655\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует плавлению алюминия Al, а второй в районе $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ — полиморфному превращению титана $\alpha\text{-Ti} \rightarrow \beta\text{-Ti}$. Более низкая температура перехода по сравнению с чистым титаном ($885\text{ }^{\circ}\text{C}$) связана, по-видимому, с образованием твердого раствора кобальта в титане. Известно, что температура перехода $\alpha \rightarrow \beta$ твердого раствора Ti[Co] снижается с увеличением содержания Co и при 14.5 ат. % Co составляет $685\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24].

При проведении ДТА спрессованной таблетки (сплошная линия на рис. 8) наблюдалось горение смеси в режиме теплового взрыва. На температурной кривой ДТА присутствует ярко выраженный экзотермический пик при температуре $665\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует температуре плавления алюминия Al, сопровождающегося появлением расплава. Отсутствие поглощения тепла в системе связано с тем, что эндотермический эффект плавления перекрывается значительно более мощным экзотермическим эффектом в результате СВС-реакции. Аналогичный результат был получен в смеси состава Ti + Al [25], где при малых скоростях нагрева экзотермический пик реакции взаимодействия Ti с Al следует сразу за эндотермическим пиком плавления Al и они практически накладываются друг на друга.

Результаты магнитных измерений при комнатной температуре показали наличие слабого ферромагнетизма у синтезированного материала (петли гистерезиса). На рис. 9 представлена зависимость намагниченности σ от напряженности приложенного магнитного поля H . Максимальная удельная намагниченность насыщения при комнатной температуре составила $1.64\text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Такой результат может быть объяснен присутствием свободного кобальта в синтезированном продукте (приблизительно чуть менее 1 %).

Результаты проведенного нами измерения электросопротивления при комнатной температуре показывают высокую воспроизводимость и корреляцию с результатами других авторов: $1.35\text{ мкОм}\cdot\text{м}$ в настоящей работе, $0.98\text{ мкОм}\cdot\text{м}$ в [11], $1.5\text{ мкОм}\cdot\text{м}$ в [10].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты позволяют сделать выводы о механизме горения в исследуемой системе. Данные времяразрешающей рентгеновской дифракции и характер термограмм

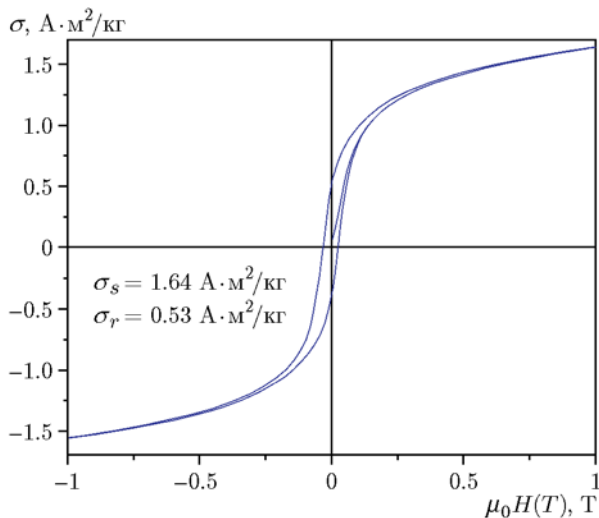


Рис. 9. Зависимость намагниченности от напряженности приложенного магнитного поля для Co_2TiAl :

σ_s — намагниченность насыщения, σ_r — остаточная намагниченность, μ_0 — магнитная постоянная, $H(T)$ — напряженность магнитного поля

процесса свидетельствуют о том, что образование фазы Co_2AlTi при тепловом взрыве протекает в течение 1 с. Максимальная температура достигает $1476\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. близка к температуре плавления Co ($1495\text{ }^{\circ}\text{C}$). Согласно [26] тройное соединение Co_2AlTi образуется плавлением в электродуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на медном водоохлаждаемом поддоне в среде аргона при $1640\text{ }^{\circ}\text{C}$ в области концентраций $22 \div 27$ ат. % Al. Известно также [19], что максимальная температура теплового взрыва в системе Ti + Al составляет $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Можно сделать вывод, что ведущей реакцией при взаимодействии в системе 2Co-Ti-Al является реакция $\text{Ti} + \text{Al}$.

Наиболее вероятным механизмом, реализующимся на первом этапе взаимодействия, является плавление Al при температуре $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и зарождение зерен интерметаллида TiAl путем диффузии атомов Al из расплава в решетку частиц Ti. Принимая во внимание, что коэффициент диффузии Al в $\alpha\text{-Ti}$ составляет примерно $5 \cdot 10^{-18}\text{ м}^2/\text{с}$, а в $\beta\text{-Ti}$ — $3 \cdot 10^{-14}\text{ м}^2/\text{с}$ [27], а также учитывая результаты анализа диффузионных пар [28], можно сделать вывод о ведущем механизме СВС-реакции за счет диффузии Al в $\beta\text{-Ti}$. Введение в реакционный состав кобальта приводит к понижению температуры перехода $\alpha \rightarrow \beta$ титана с 885 до

758 ÷ 806 °С. При этом растворимость Co в Al при эвтектической температуре не превышает 0.009 ат. %. Растворимость Al в ϵ -Co также практически равна нулю. Растворимость Co в интерметаллидах $AlTi_x$ достаточно высокая — 2.3 ÷ 9.6 ат. %. Растворимость Al в интерметаллидах $TiCo_x$, а также в Co и Ti составляет 6.8 ÷ 13.7 ат. %. Растворимость Co в Ti равна 10.3 ат. %, а Ti в Co — 8.5 ат. % [23]. Поэтому можно предположить, что образование Co_2AlTi протекает за счет растворения атомов Co в расплаве Ti—Al. Это коррелирует с результатами [19] по образованию интерметаллических соединений в Ti—Al, которое происходит за 1 ÷ 2 с во время основного тепловыделения, причем независимо от стехиометрии смесей первой появляется фаза эквимольного состава.

ВЫВОДЫ

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме теплового взрыва впервые получена фаза Гейслера Co_2TiAl . Показано, что массовое содержание Co_2TiAl в синтезированном материале составляет 99 %. Основными примесными фазами, располагающимися в межзеренных прослойках, являются интерметаллиды Co_3Ti и Co_2Ti . Синтезированный продукт при комнатной температуре показал наличие петель ферромагнитного гистерезиса, удельная намагниченность насыщения составила 1.64 А · м²/кг, электросопротивление — 1.35 мкОм · м.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z.** Applications of Ni_3Al based intermetallic alloys: current stage and potential perceptivities // *Materials*. — 2015. — V. 8, N 5. — P. 2537–2568.
2. **Leyens C., Peters M.** Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications / Ch. Leyens, M. Peters (Eds). — 1st ed. — Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
3. **De Groot R., Mueller F., Engen P., Buschow K.** New class of materials: Half-metallic ferromagnets // *Phys. Rev. Lett.* — 1983. — V. 50, N 25. — P. 2024–2027.
4. **Graf T., Felser C., Parkin S.** Simple rules for understanding of Heusler compounds // *Prog. Solid State Chem.* — 2011. — V. 39. — P. 1–50.
5. **Васильев А. Н., Бучельников В. Д., Такаги Т. и др.** Ферромагнетики с памятью формы // *Успехи физ. наук*. — 2003. — Т. 173, № 6. — С. 577–608.
6. **Van Engen P. G., Bushow K. H. J., Jongebreur R., Erman M.** PtMnSb, a material with very high magneto-optical Kerr effect // *Appl. Phys. Lett.* — 1983. — V. 42. — P. 202–204.
7. **Zimm C., Jastrab A., Sternberg A., et al.** Description and performance of a near-room-temperature magnetic refrigerator // *Adv. Cryogenic Eng.* — 1998. — V. 43. — P. 1759–1766.
8. **Graf T., Fecher G., Barth J., Winterlink J., Felser C.** Electronic structure and transport properties of the Heusler compound Co_2TiAl // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2009. — V. 42. — ID 084003.
9. **Маркив В. Я., Теслюк М. Ю.** Кристаллическая структура тройных соединений $TiCo_2Al$, $MgNi_2Zn$, $TiNi_2Zn$ и $TiCu_2Zn$ // *Докл. АН УССР*. — 1962. — № 12. — С. 1607–1609.
10. **Перевозчикова Ю. А., Коуров Н. И., Емельянова С. М. и др.** Электрические свойства полуметаллических ферромагнитных сплавов Гейслера Co_2YZ ($Y = Cr, Ti, V$; $Z = Al, Ga$) // *Международ. журн. прикл. и фундамент. исслед.* — 2016. — Т. 3. — С. 539–542.
11. **Fadila B., Ameri M., Bensaid D., Nouredine M., Ameri I., Mesbah S., Al-Douri Y.** Structural, magnetic, electronic and mechanical properties of full-Heuslere alloys Co_2YAl ($Y = Fe, Al$): First principles calculations with different exchange-correlation potentials // *J. Magnetism and Magnetic Mater.* — 2018. — V. 448. — P. 208–220.
12. **Zang W., Zhao L., Qian Q., et al.** Magnetic properties of the Heusler alloy Co_2TiAl synthesized by melt-spinning technique // *J. Alloys Compounds*. — 2007. — V. 431. — P. 65–67.
13. **Акопов Ф. Х., Чхартишвили И. В., Галусташвили М. В., Дриаев Д. Г., Габуния В. М., Цакадзе С. Дж.** Влияние изохронного отжига на магнитные и механические свойства композитов Ti—Al—Co и Ti—Al // *Физика металлов и металловедение*. — 2010. — Т. 109, № 4. — С. 444–448.
14. **Koller M., et al.** Mechanical and magnetic properties of semi-Heusler/light-metal composites consolidated by spark plasma sintering // *Mater. Design*. — 2017. — V. 126. — P. 351–357.
15. **Итин В. И., Найбороденко Ю. С.** Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989.
16. **Бусурина М. Л., Умаров Л. М., Ковалев И. Д., Сачкова Н. В., Бусурин С. М., Вадченко С. Г., Сычев А. Е.** Особенности структуро- и фазообразования в системе Ti—Al—Nb в режиме теплового взрыва // *Физика горения и взрыва*. — 2016. — Т. 52, № 6. — P. 44–50.
17. **Shchukin A. S., Vrel D., Sytschev A. E.** Interaction of NiAl Intermetallic during SHS synthesis with Ta Substrate // *Adv. Eng. Mater.* — 2018. — 1701077.

18. **Sanin V. N., Yukhvid V. I., Sytshev A. E., Andreev D. E.** Combustion synthesis of cast Ti—Al—Nb alloys in a centrifugal machine // Kovove Mater. [Metal. Mater.]. — 2006. — V. 44, N 1. — P. 49–54.
19. **Пономарев В. И., Ковалев Д. Ю.** Времяразрешающая рентгеновская дифракция для диагностики СВС // Технологическое горение / под ред. С. М. Алдошина, М. И. Альмова. — М.: РАН, 2018. — С. 558–580.
20. **Мержанов А. Г., Письменная Е. Б., Пономарев В. И., Рогачев А. С.** Динамическая рентгенография фазовых превращений при синтезе интерметаллидов в режиме теплового взрыва // Докл. АН. — 1998. — Т. 363, № 2. — С. 203–207.
21. **Carbonari A. W., Saxena R. N., Pendl W., Jr., Mestnik Filho J., Attili R. N., Olzon-Dionysio M., de Souza S. D.** Magnetic hyperfine field in the Heusler alloys Co₂YZ (Y = V, Nb, Ta, Cr; Z = Al, Ga) // Magn. Magn. Mater. — 1996. — V. 163. — P. 313–321.
22. **Hofer G., Stadelmaier H. H.** Cobalt-, nickel- and copper-phases of the ternary MnCu₂Al type (in German) // Monatsch. Chem. — 1967. — V. 98, N 2. — P. 408–411. — <https://doi.org/10.1007/BF00899958>.
23. **Yin M., Chen S., Nash P.** Enthalpies of formation of selected Co₂YZ Heusler compounds // J. Alloys Compd. — 2013. — V. 577. — P. 46–56.
24. **Лякишев Н. П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. — М.: Машиностроение, 1996. — Т. 3(1).
25. **Adeli M., Seyedein S. H., Aboutalebi M. R., Kobashi M., Kanetake N.** Implementation of DSC analysis in reaction kinetics during heating of Ti — 50 at. % Al powder mixture // J. Therm. Anal. Calorim. — 2017. — V. 128, iss. 2. — P. 867–874. — <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5982-9>.
26. **Буханько Н. Г., Казакова Е. Ф., Соколовская Е. М.** Взаимодействие алюминия с кобальтом и титаном // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. 2. Химия. — 2002. — Т. 43, № 1. — С. 51.
27. **Mishin Y., Herzig Chr.** Diffusion in the Ti—Al system // Acta Mater. — 2000. — V. 48. — P. 589–623.
28. **Chen Y., Li J., Tang B., et al.** Interdiffusion in FCC Co—Al—Ti ternary alloys // J. Phase Equilib. Diffus. — 2015. — V. 36. — P. 127–135. — <https://doi.org/10.1007/s11669-015-0367-5>.

Поступила в редакцию 18.03.2019.

После доработки 17.04.2019.

Принята к публикации 28.08.2019.