

УДК 669.018.298

О КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАРБИДА ТИТАНА ИЗ РАСПЛАВОВ ТРИАДЫ ЖЕЛЕЗА

©2023 г. П.Г. Овчаренко^{1*}, К.Э. Чекмышев^{2*}, М.И. Мокрушина^{1*}, В.И. Ладьянов^{1*}

^{1*}Научный центр металлургической физики и материаловедения ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН» (НЦ МФМ УдмФИЦ УрО РАН), Ижевск
E-mail: ovcp@yandex.ru

^{2*}Институт механики ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН (ИМ УдмФИЦ УрО РАН), Ижевск

Поступила в редакцию 25 августа 2022 г.

После доработки 4 октября 2022 г. принята к публикации 19 октября 2022 г.

Приведены результаты термодинамической оценки вероятности кристаллизации карбида титана из железоуглеродистых расплавов. В качестве критерия кристаллизации выбрана энергия Гиббса соответствующей химической реакции. Определено влияние состава расплава и его температуры на процесс формирования частиц карбида титана. Легирование отливок из сплавов на основе металлов группы железа карбидом титана, образующимся в расплаве в результате реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза между компонентами лигатуры (титан, сажа), позволяет получить дисперсные частицы TiC размером 4—8 мкм, что приводит к увеличению микротвердости материалов на 20—30 %.

Ключевые слова: кристаллизация; карбид титана; энергия Гиббса; железоуглеродистые сплавы; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; структура; термодинамическая оценка.

Для улучшения физико-механических характеристик отливок широкое распространение получили методы модифицирования, микролегирования, суспензионной разливки, которые, в частности, приводят к формированию в расплаве дисперсных частиц, выступающих в качестве зародышей центров кристаллизации [1, 2]. Один из технологических способов формирования тугоплавких соединений в расплаве наряду с приемом по введению порошкообразных частиц в литейные формы и в поток металла на стадии заливки — применение лигатур, компоненты которых взаимодействуют между собой по механизму самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [3—7].

В настоящее время значительное число исследовательских работ связано с получением алюмоматричных композитов с упрочняющими керамическими фазами, образующимися в процессе синтеза между компонентами порошковых смесей, помещенными в расплав алюминиевых сплавов [8]. В исследованиях [9—11] приводится описание способа получения TiC и влияния карбида ти-

тана на структуру алюминиевых композитов, а в работе [12] показано, что синтез боридов и карбида титана в расплаве алюминия позволяет уменьшить размер зерна и повысить твердость литого сплава.

Карбид титана применяется также и для получения композиционных материалов на основе железоуглеродистых систем. Для этой цели наряду с методами порошковой металлургии [13] используют введение частиц готового карбида титана в расплав с последующими формообразованием слитка [14] и СВС (возможные варианты: введение реакционных смесей в расплав; сочетание процесса СВС карбида титана с алюмини- и карботермическим восстановлением железа [15]).

Литые железоуглеродистые сплавы, в частности легированные чугуны, широко применяются в разных отраслях машиностроения в качестве коррозионно-, жаро- и износостойких материалов [16, 17]. Из литейных сплавов никеля и кобальта, дополнительно легированных хромом, вольфрамом, молибденом и другими компонентами, методами точ-

ного литья изготавливают детали, работающие при высоких температурах [18]. Наряду с высокими служебными характеристиками для этой группы сплавов актуально повышение их физико-механических свойств посредством синтеза в расплаве дисперсных частиц карбида титана и выделения последних при кристаллизации.

Исследование особенностей кристаллизации карбида титана в зависимости от состава и температуры расплава пополнит базу данных, способствующих более эффективно-му модифицированию и легированию металлических сплавов. В настоящей работе выполнена термодинамическая оценка процесса кристаллизации карбида титана из железоуглеродистых расплавов (стали, чугуны), а также исследовано влияние карбида титана на структуру композиционных отливок, в которых карбид титана образовался в расплаве в результате СВС между компонентами порошкообразных лигатур (титан и сажа).

Материалы и методика эксперимента. Сплавы выплавляли в корундовом тигле в печи Таммана. В качестве исходных материалов для них использовали армко-железо, электролитические никель и кобальт, а также молибден МК. В работе применяли сплавы следующих составов: Fe-10 мас. % Ni (железо, легированное никелем), Ni-9 мас. % Mo (никель с добавкой молибдена) и чистый кобальт.

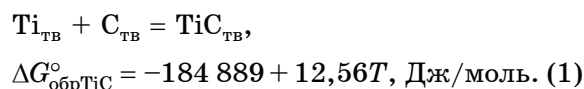
Для получения карбида титана методом СВС использовали реакционную смесь порошкообразных титана и сажи. Количественное соотношение этих компонентов соответствовало стехиометрии образования карбида титана. Подготовленные навески, рассчитанные на получение в отливках 10% TiC, помещали в алюминиевую фольгу, запечатывали и вводили в расплав. Выбор в качестве материала фольги алюминия обусловлен его хорошей раскислительной способностью в отношении рассматриваемых расплавов [19], а его незначительное количество не приводит к заметным изменениям состава сплавов. После введения в расплав компоненты реакционной смеси взаимодействуют между собой по механизму СВС с образованием целевого продукта—карбида титана. Взаимодействие при высокой температуре расплава протекает со значительным тепловыделением, т.е. приводит к дополнительному ра-

зогреву расплава. По окончании реакции расплав перемешивали, удаляли шлак и заливали в металлическую изложницу.

Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре Дрон-6 с CoK_α -излучением. Микротвердость $HV_{0,05}$ измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Для анализа микроструктуры образцов использован металлографический микроскоп Neophot 21 и растровый электронный микроскоп (РЭМ) FEI Quanta S с приставкой для рентгеновского микроанализа.

Методика проведения расчетов. Для сплавов на основе железа в отличие от никелевых и кобальтовых в литературе имеются необходимые термодинамические характеристики [20—22], с использованием которых в настоящей работе проведена оценка вероятности кристаллизации TiC из железоуглеродистых расплавов в зависимости от их составов и температуры. В качестве критерия этого процесса рассматривается энергия Гиббса (ΔG), отрицательное значение которой указывает на кристаллизацию карбида титана из жидкой фазы.

Реакция образования TiC имеет вид [20]:



Для термодинамической оценки кристаллизации карбида титана из металлических расплавов на основе железа выбрали стандартные состояния «жидкий титан» и «жидкий переохлажденный графит». Для перехода к выбранным стандартным состояниям учитывали ΔG° плавления титана и графита [20, 21]:

$$\text{Ti}_{\text{ТВ}} = \text{Ti}_{\text{Ж}}, \quad \Delta G_{\text{пл.Ti}}^{\circ} = \Delta H_{\text{пл.Ti}}^{\circ} - \frac{\Delta H_{\text{пл.Ti}}^{\circ}}{T_{\text{пл.Ti}}}T =$$

$$= 15\,500 - 7,99T, \text{ Дж/моль, (2)}$$

$$\text{C}_{\text{ТВ}} = \text{C}_{\text{Ж}}, \quad \Delta G_{\text{пл.C}}^{\circ} = \Delta H_{\text{пл.C}}^{\circ} - \frac{\Delta H_{\text{пл.C}}^{\circ}}{T_{\text{пл.C}}}T =$$

$$= 104\,700 - 25,71T, \text{ Дж/моль. (3)}$$

Комбинируя реакции (1)—(3), получим для кристаллизации карбида титана:

$$\text{Ti}_{\text{Ж}} + \text{C}_{\text{Ж}} = \text{TiC}_{\text{ТВ}},$$

$$\Delta G_{\text{крист.TiC}}^{\circ} = \Delta G_{\text{обр.TiC}}^{\circ} - \Delta G_{\text{пл.Ti}}^{\circ} - \Delta G_{\text{пл.C}}^{\circ} =$$

$$= -305\,089 + 46,26T, \text{ Дж/моль. (4)}$$

Для вычисления коэффициентов активности компонентов в металлическом расплаве применяли уравнение Вагнера [20]:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^\circ + \sum_{j=1}^n \varepsilon_i^j x_j + \sum_{j=1}^n \rho_i^j x_j^2,$$

где x_j — мольная доля компонента j . В расчетах мольных параметров взаимодействия, для которых неизвестна температурная зависимость, последнюю оценивали по теории квазирегулярных растворов [21]:

$$\varepsilon_{i,T}^j = \left(\frac{2557}{T} - 0,365 \right) \varepsilon_{i,1873}^j.$$

Значения атомных параметров взаимодействия ε_i^j , используемые в расчетах, представлены в табл. 1.

Тогда

$$\ln \gamma_{\text{Ti}}^\circ = \frac{\Delta G_{\text{ж. Ti}}^\circ}{RT} = - \frac{5610,3}{T} + 0,0048.$$

По аналогичной методике в работе [24] получено выражение для коэффициента активности углерода γ_{C}° в бесконечно разбавленном растворе:

$$\ln \gamma_{\text{C}}^\circ = \frac{\Delta G_{\text{ж. C}}^\circ}{RT} = - \frac{9871}{T} + 1,078.$$

Таким образом, уравнение энергии Гиббса кристаллизации карбида титана из железоуглеродистых расплавов примет вид:

$$\Delta G_{\text{крист. TiC}} = \Delta G_{\text{крист. TiC}}^\circ - RT[\ln(x_{\text{Ti}}\gamma_{\text{Ti}}) + \ln(x_{\text{C}}\gamma_{\text{C}})]. \quad (5)$$

Таблица 1

Атомные параметры взаимодействия первого порядка ε_i^j при 1600 °C [22]

Компонент i	Компонент j					
	C	Si	Mn	Cr	Ti	Ni
C	11,00	9,72	-2,70	-5,10	-27,0 [23]	2,86
Ti	-27,0 [23]	-5,0 [23]	1,30 [23]	11,85	2,7	-6,71 [23]
Cr	-5,10	-0,0003	0,40 [23]	0	11,85	-0,0027
Ni	2,86	1,156	-0,68 [23]	-0,0027	-6,71 [23]	0,167

Выражение коэффициента активности титана в бесконечно разбавленном растворе γ_{Ti}° в работе [22] представлено для случая растворения твердого титана в расплаве железа. Согласно реакции (4) для выбранных стандартных состояний твердый карбид TiC образуется при взаимодействии жидких титана и углерода, поэтому для согласования γ_{Ti}° для выбранных стандартных состояний используем значения теплоты и температуры плавления титана. Выражение для свободной энергии реакции перехода титана из твердого состояния в бесконечно разбавленный раствор на основе железа имеет вид [22]:

$$\text{Ti}_{\text{ТВ}} = [\text{Ti}]_{x_{\text{Fe}} \rightarrow 1},$$

$$\Delta G_{\text{р. Ti}}^\circ = -31\,144 - 7,95T, \text{ Дж/моль.}$$

Комбинируя данную реакцию с реакцией (2), получим:

$$\begin{aligned} \text{Ti}_{\text{ж}} &= [\text{Ti}]_{x_{\text{Fe}} \rightarrow 1}, \quad \Delta G_{\text{ж. Ti}}^\circ = \Delta G_{\text{р. Ti}}^\circ - \Delta G_{\text{пл. Ti}}^\circ = \\ &= -46\,644 + 0,047T, \text{ Дж/моль.} \end{aligned}$$

Используя уравнение (5), можно рассчитать энергию Гиббса кристаллизации карбида титана ($\Delta G_{\text{крист. TiC}}$) в зависимости от состава сплава.

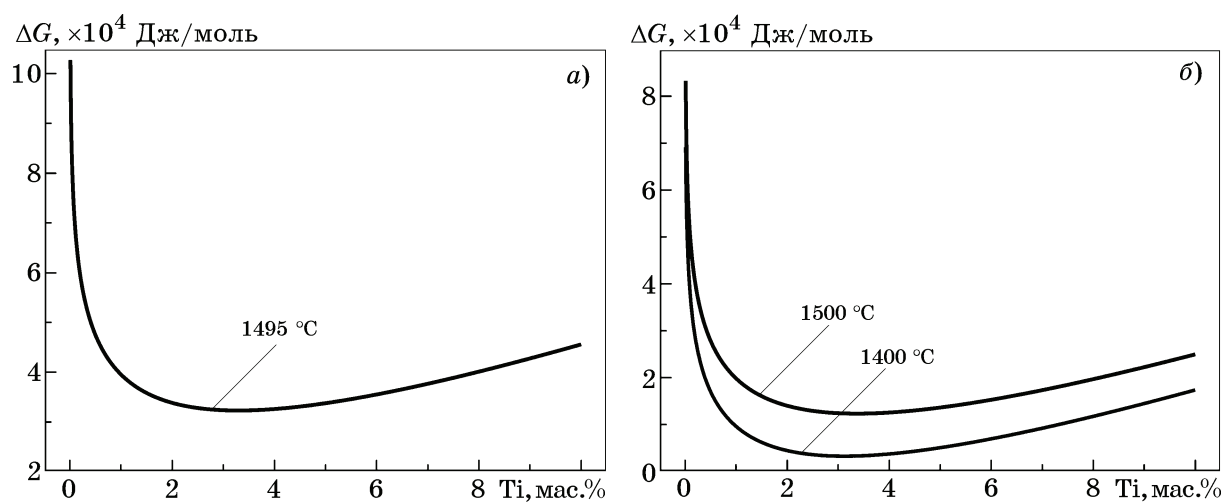
Результаты исследований и их обсуждение. Для оценки процесса кристаллизации карбида титана из железоуглеродистых расплавов в качестве сплавов на основе металлов группы железа выбраны нелегированные стали с разным содержанием углерода (стали 10, 60 и У10) и чугуны (серый СЧ15, хромистый ЧХ32, никелевый ЧН19ХЗШ, табл. 2). В процессе численного эксперимента в состав рассматриваемых сплавов вводили титан, заменяя им железо в количестве от 0,01 до 10 мас.%. Нижний предел температуры в расчетах соответствует температуре солидуса рассматриваемого сплава.

По результатам расчетов кристаллизация карбида титана не происходит из расплавов сталей 10 и 60 в интервале температур от 1700 °C до температуры солидуса соответствующего сплава при содержании титана в них от 0,01 до 10 мас.% (фиг. 1). Тер-

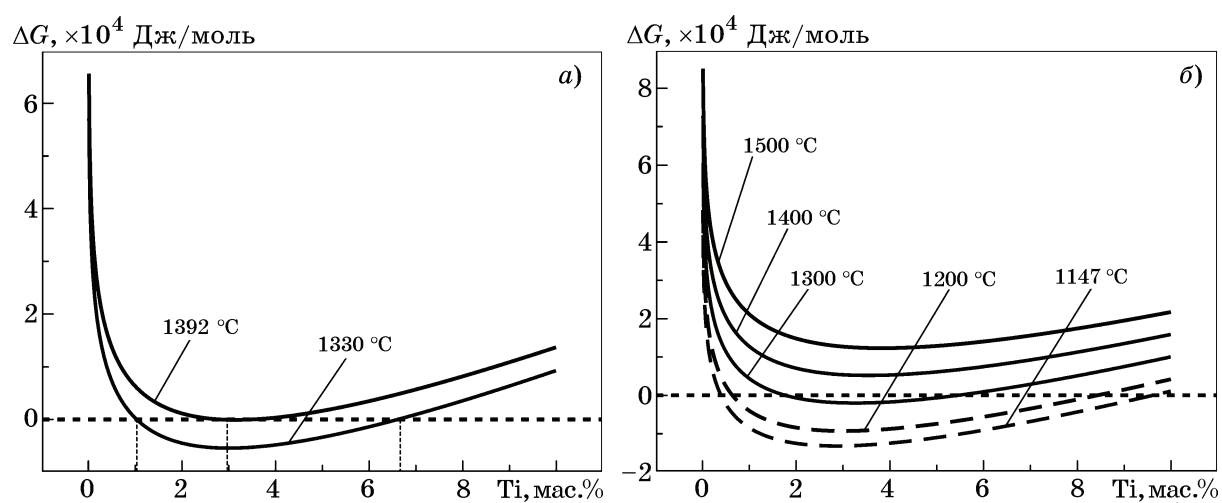
Таблица 2

**Химический состав [16, 25] и температура солидуса [26]
железоуглеродистых сплавов**

Сплав	Содержание элемента, мас. %						$t_{\text{sol}}, ^\circ\text{C}$
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	
Сталь 10	0,1	0,25	0,50	0	0	99,15	1495
Сталь 60	0,6	0,25	0,65	0	0	98,50	1400
Сталь У10	1,0	0,25	0,22	0	0	98,53	1330
Чугун СЧ15	3,6	2,20	0,65	0	0	93,55	1147
Чугун ЧХ32	2,5	2,00	1,0	32,0	0	62,50	1507
Чугун ЧН19ХЗП	2,6	2,00	1,3	2,0	19	73,10	1460



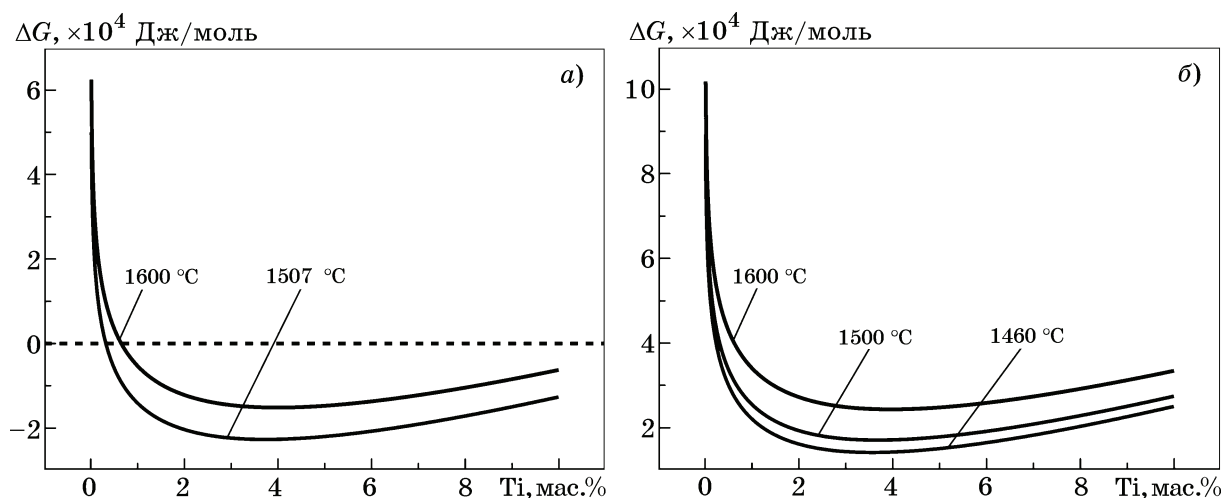
Фиг. 1. Энергия Гиббса процесса кристаллизации карбида титана из расплавов сталей 10 (а) и 60 (б)



Фиг. 2. Энергия Гиббса процесса кристаллизации карбида титана из расплавов стали У10 (а) и серого чугуна СЧ15 (б) при разных температурах

модинамические предпосылки к кристаллизации TiC наблюдаются в случае расплава стали У10 при содержании титана 2,9 мас.%. (фиг. 2, а). Понижение температуры расплава стали У10 до 1330 °С обеспечивает возможность кристаллизации TiC из расплава при содержании титана в нем в количестве от 1,04 до 6,65 мас. %.

Для чугуна СЧ15 кристаллизация карбида титана возможна в интервале температур от 1300 °С и ниже при содержании титана в сплаве от 1,8 до 5,3 мас.% (фиг. 2, б), а для чугуна ЧХ32 — в интервале от 1600 °С и ниже при содержании титана >0,65 мас.% (фиг. 3, а). В случае никельсодержащего чугуна ЧН19Х3Ш выделение твердого TiC из жидкой фазы невозможно во всем рассматриваемом интервале содержания титана (0,01—10 мас.%) вплоть до температуры кристаллизации расплава 1460 °С (фиг. 3, б.).



Фиг. 3. Энергия Гиббса процесса кристаллизации карбида титана из расплавов легированных чугунов ЧХ32 (а) и ЧН19Х3Ш (б)

Полученные результаты расчетов показывают, что в общем случае для нелегированных железоуглеродистых сплавов повышение содержания в них углерода и снижение температуры способствуют выделению твердого TiC из расплавов. При этом чем ниже температура расплава и выше содержание углерода, тем меньшее содержание титана необходимо для кристаллизации TiC. В случае рассмотренных легированных чугунов можно отметить, что кристаллизация карбида титана возможна из хромсодержащих расплавов типа ЧХ32, а при высоком содержании в сплавах никеля (чугун ЧН19Х3Ш) твердый карбид TiC из жидкой фазы не выделяется.

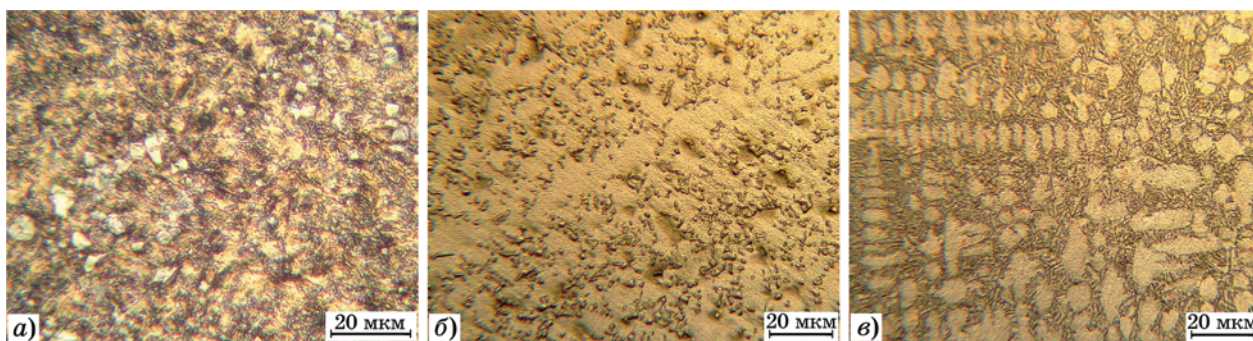
Для практической реализации процесса формирования в расплавах карбида титана методом СВС использовали сплавы на основе железа, никеля и кобальта (табл. 3). Добавка никеля к железу и молибдена к никелю при выплавке базовых сплавов обусловлена улучшением смачивания образующегося карбида титана и направлена на более значительное его усвоение в металле [13]. При введении реакционной порошковой смеси Ti+C в расплав чистого железа большая часть образующегося карбида титана переходит в шлак, что не позволяет в полной мере реализовать упрочнение материала (при введении смеси из расчета получения 10 мас.% TiC максимальное количество карбида титана в слитке железа составило ~2%). Аналогичные закономерности наблюдаются и для сплава никеля (максимальное количество TiC в слитке никеля составило ~2%), а в сплаве

Таблица 3

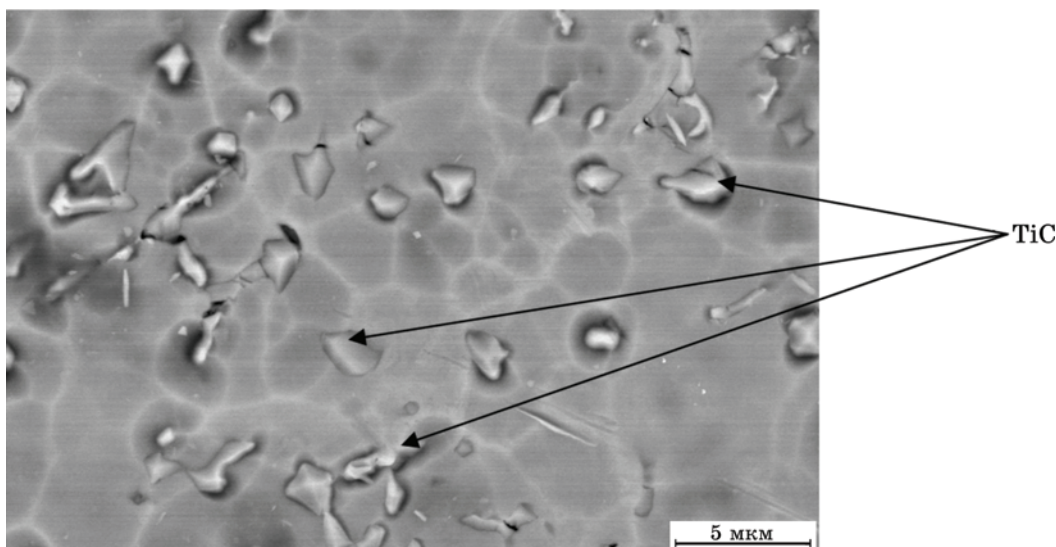
Состав и твердость образцов полученных сплавов

Образец	Состав*	TiC, мас.%	HV _{0,05} , МПа
1	Fe-10 мас.% Ni-TiC (Fe-10 мас.% Ni)	5,2	5260 (2300)
2	Ni-9 мас.% Mo-TiC (Ni-9 мас.% Mo)	9,0	3570 (2200)
3	Co-TiC (чистый Co)	6,3	3500 (2700)

*В скобках — состав и микротвердость исходного базового сплава.



Фиг. 4. Структура отливок сплавов: *a* — Fe-10мас.% Ni-TiC; *б* — Ni-9мас.% Mo-TiC; *в* — Co-TiC



Фиг. 5. Структура (РЭМ) образца сплава Ni-9мас.% Mo-TiC

с добавкой молибдена (см. табл. 3, образец 2) количество карбида титана 9 мас.%. Поскольку расплав кобальта по сравнению с железом и никелем лучше смачивает карбид титана [13], для получения отливок его использовали в чистом виде.

Структура всех полученных отливок имеет дендритное строение (фиг. 4). Согласно данным РЭМ (фиг. 5) карбид титана равномерно распределен по всему объему слитка, средний размер частиц составляет 4—8 мкм.

Наличие карбида титана способствовало увеличению микротвердости отливок по сравнению с базовым металлом в среднем на 20—30 % (см. табл. 3). Следует отметить, что в работе исследовали сплавы только в литом состоянии без термической и деформационной обработок, использование которых также может в значительной мере повлиять как на структуру, так и на механические свойства сплавов. Согласно данным [14] термическая обработка может привести к коагуляции карбидов, что вызовет изменение их

дисперсности и в конечном итоге снижение механических характеристик. Наряду с этим также отмечается, что в реальных высоколегированных сплавах обеспечивается необходимая устойчивость частиц карбида титана вследствие незначительных равновесных концентраций и подвижности титана, что препятствует его растворению в матрице при нагреве.

Приведенный способ легирования отливок карбида титана имеет недостатки: разбрызгивание расплава, дополнительный разогрев и образование шлака. Однако, несмотря на ограничения, вызванные сильным тепловыделением непосредственно в расплаве в ходе реакции СВС между порошкообразными компонентами лигатуры (титан и сажа), данный способ позволяет формировать в слитках дисперсные частицы карбида титана, приводящие к повышению микротвердости металла. Незначительный размер частиц TiC (4—8 мкм) и их равномерное распределение в объеме отливок косвенно сви-

детельствуют и о возможном повышении физико-механических характеристик литых сплавов.

Выводы. 1. Термодинамические оценки показали, что в случае железоуглеродистых сплавов, имеющих в своем составе титан, возможно формирование твердого карбида титана и его выделение из жидкой фазы. При этом повышение содержания углерода и снижение температуры расплава способствуют понижению концентрации титана, необходимой для кристаллизации TiC.

2. На примере чугунов показано влияние легирующих добавок на процесс кристаллизации карбида титана: в случае хромистого чугуна ЧХ32 формирование твердого TiC возможно в расплаве от температуры 1600 °С и ниже при содержании Ti > 0,65 мас.%, а в случае никелевого чугуна ЧН19Х3Ш кристаллизация карбида титана из расплава не протекает даже в случае значительного содержания титана (до 10 мас.%) вплоть до температуры солидуса.

3. Введение в расплав реакционной смеси из порошкообразных титана и сажи позволяет получить методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) дисперсные частицы карбида титана размером 4—8 мкм, которые, в частности, способствуют увеличению на 20—30 % микротвердости отливок из сплавов на основе железа, никеля и кобальта по сравнению с базовыми. На содержание карбидной фазы в отливках из рассматриваемых сплавов влияет смачивание их расплавом.

При выполнении исследований использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов, Е.А. Теоретические основы литейного производства. Теория формирования отливки / Е.А. Чернышов, А.И. Евстигнеев. — М. : Машиностроение, 2015. 480 с.
2. Специальные способы литья: справочник / В.А. -Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич [и др.] ; под общ. ред. В.А. Ефимова. — М. : Машиностроение, 1991. 436 с.
3. Пат. 2207218: МПК В22Д 27/18. Способ изготовления композиционных чугунных отливок / Сильман Г.И., Серпик Л.Г., Гуринов С.С., Дмитриева Н.В. Опубл. 27.06.2003.

4. Пат. 2739898: МПК С22С 1/02, С22С 32/00, В22Ф 3/23. Способ получения композиционного металлического сплава, содержащего карбид титана / Якушев О.С., Ладьянов В.И., Кузьминых Е.В., Таныгин С.В., Овчаренко П.Г., Таныгин И.В., Мокрушина М.И., Карев В.А. Опубл. 29.12.2020.
5. Haimin Ding. The influence of forming processes on the distribution and morphologies of TiC in Al-Ti-C master alloys / Haimin Ding, Xiangfa Liu, Lina Yu, Guoqun Zhao // Scripta Mater. 2007. V.57. P.575—578. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.06.028>.
6. Овчаренко, П.Г. Формирование боридов титана в поверхностном слое отливок из железоуглеродистых сплавов / П.Г. Овчаренко, А.Ю. Лещев, К.Э. Чекмышев, Т.М. Махнева // Металлы. 2017. №6. С. 88—92.
7. Gowtam, D.S. In situ TiC-reinforced austenitic steel composite by self-propagating high temperature synthesis / D.S. Gowtam, M. Ziyauddin, M. Mohape, S.S. Sontakke, V.P. Deshmukh, A.K. Shan // Intern. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2007. V.16. №2. P. 70—78. <https://doi.org/10.3103/S1061386207020033>.
8. Луц, А.Р. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов / А.Р. Луц, А.Г. Макаренко. — Самара: Самар. гос.техн. ун-т, 2008. 175 с.
9. Birol, Y. Grain refining efficiently of Al-Ti-C alloys / Y. Birol // J. Alloys and Comp. 2006. V.422. P. 128—131. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.11.059>.
10. Кандалова, Е.Г. In situ технологии получения композита Al-TiC / Е.Г. Кандалова, В.И. Никитин, А.Т. Макаренко, Ли Пыцзе // Вест. СамГТУ: технические науки. 2005. №32. С.95—101.
11. Liu Xiangfa. The relationship between microstructure and refining performance of Al-Ti-C master alloys / Liu Xiangfa, Wang Zhenqing, Zhang Zuogui, Bian Xiufang // Mater. Sci. Eng. 2002. V. 332A. P. 70—74. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01751-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01751-8).
12. Пантелеева, А.В. Модифицирование алюминия упрочняющими фазами TiB₂ и TiC методом СВС в расплаве / А.В. Пантелеева, Р.М. Никонова // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21. №1. С.65—69.
13. Кипарисов, С.С. Карбид титана: получение, свойства, применение / С.С. Кипарисов, Ю.В. Левинский, А.П. Петров. — М. : Металлургия, 1987. 216 с.
14. Бабаскин, Ю.З. Структура и свойства литой стали / Ю.З. Бабаскин. — К. : Наукова думка, 1980. 240 с.
15. Амосов, А.П. Применение процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения композиционных керамико-металлических порошков на основе карбида титана и железа / А.П. Амосов, А.Р. Самборук, И.В. Яценко, В.В. Яценко // Вест. Перм. нац. исслед. политех. ун-та. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20. №4. С. 5—14.
16. Чугун: справ. изд. / Под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. — М. : Металлургия, 1991. 576 с.
17. Гарбер, М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М.Е. Гарбер. — М. : Машиностроение, 2010. 280 с.
18. Ривлин, Ю.И. Металлы и их заменители / Ю.И. Ривлин, М.А. Коротков, В.Н. Чернобыльский. — М. : Металлургия, 1973. 440 с.
19. Куликов, И.С. Раскисление металлов / И.С. Куликов. — М. : Металлургия, 1975. 504 с.

20. *Казачков, Е.А.* Расчеты по теории металлургических процессов: Учеб. пособие для вузов / Е.А. Казачков. — М. : Металлургия, 1988. 288 с.
21. *Григориан, В.А.* Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов / В.А. Григориан, А.Я. Стомахин, А.Г. Пономоренко [и др.]. — М. : Металлургия, 1989. 288 с.
22. *Sigworth, G.K.* The thermodynamics of liquid dilute iron alloys / G.K. Sigworth, J.F. Elliot // *Metal Sci. J.* 1974. V.8. №9. P. 298—310. <https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298>.
23. *Снитко, Ю.П.* [Без назв.] / Ю.П. Снитко, Ю.Н. Суворовый, Н.П. Лякишев // *Д АН СССР*. 1983. Т. 268. №5. С. 115—117.
24. *Овчаренко, П.Г.* Термодинамическая оценка процесса кристаллизации боридов и карбидов из железометаллических расплавов / П.Г. Овчаренко, В.И. Ладьянов, К.Э. Чекмышев // *Металлы*. 2020. №6. С. 90—95. — (P.G. Ovcharenko, V.I. Lad'yanov, K.E. Chekmyshev, «Thermodynamic estimation of the solidification of borides and carbides from boron-containing iron—carbon melts». *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. №11. P.1320—1325.)
25. *Марочник сталей и сплавов* / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.] ; под общ. ред. А.С. Зубченко. — 2-е изд., доп. и испр. — М. : Машиностроение, 2003. 784 с.
26. *Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. изд.* / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова [и др.] — М. : Металлургия, 1986. 440 с.