

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКИХ СРЕД ДЛЯ БОРИРОВАНИЯ

*Докт. физ.-мат. наук ХИНА Б. Б.,  
кандидаты техн. наук ПРОТАСЕВИЧ В. Ф., КУХАРЕВА Н. Г., ПЕТРОВИЧ С. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

Среди процессов химико-термической обработки особое место занимает борирование. Повышенный интерес к данному процессу обусловлен возможностью получения в поверхностной зоне обрабатываемых изделий моно- или многофазных боридных слоев, характеризующихся уникальным комплексом физико-химических свойств и его приемлемостью для обработки широкой гаммы конструкционных и инструментальных сталей и сплавов. Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для получения порошковых насыщающих сред позволяет, не изменяя общей схемы процесса, в широких пределах варьировать исходными компонентами металлооксидной композиции и получать в результате насыщающие среды различных типов, требуемой активности и гранулометрического состава.

Рассмотренные в [1] физико-химические аспекты образования боридов железа с применением методов химической термодинамики и проведенные экспериментальные исследования показали, что ответственным фактором для получения того или иного типа боридного покрытия является главным образом вид борсодержащего вещества. Так, для получения однофазного боридного слоя на железоуглеродистых сплавах в качестве основы насыщающей среды могут использоваться бориды железа, никеля, молибдена, вольфрама (FeB, Ni<sub>2</sub>B, MoB, WB).

Настоящая работа посвящена исследованию составов синтезированных алюмотермических порошковых сред для борирования, полученных в процессе СВС многокомпонентных систем, содержащих оксид бора, оксид алюминия как инертного разбавителя, оксиды железа, хрома, никеля, циркония, молибдена, меди

и чистые металлы.

В работе использовано термодинамическое моделирование (ТМ), которое применяют при исследовании СВС-процессов и разработке на его основе методов получения различных соединений и композиционных материалов. При расчетах определены адиабатические температуры горения  $T_{ad}$  и проведена оценка равновесного состава реагирующих систем при  $T_{ad}$  и охлаждении ниже точек кристаллизации продуктов, которые имеются в жидком состоянии [2–4]. Расчеты выполнены по универсальной программе АСТРА-4, которая включает в себя базу данных неорганических соединений [5, 6]. Расчет СВС-процесса выполняли в адиабатических условиях при постоянном давлении  $p = 0,98 \cdot 10^5$  Па (одна техническая атмосфера).

Вначале расчеты СВС-процесса были проведены для простых алюмотермических сред на основе оксида бора с различным соотношением оксида бора и алюминия (табл. 1).

Основным источником тепловыделения в смесях № 1–5 являются реакции  $Al + B_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 + B$ ,  $Al + 2B \rightarrow AlB_2$  и  $Al + 12B \rightarrow AlB_{12}$ . Выделяющаяся теплота расходуется на нагрев, и возможно частичное плавление получаемой композиции.

Для смесей № 1–5 подсчитаны  $T_{ad}$ . Установлено, что в этих системах возможно протекание реакций в режиме СВС. Определены равновесные составы продуктов взаимодействия при  $T_{ad}$  и последующем охлаждении. На основании проведенных расчетов установлено, что в результате СВС-процесса в синтезированных смесях № 1–5 образуются соединения  $AlB_{12}$  и  $AlB_2$ , которые могут быть источниками атомов бора. В синтезированных средах данной группы была проведена термодиффузионная обработка образцов из стали У8 при температуре 950 °С в течение 4 ч. Толщина образова-

ных диффузионных слоев и их фазовый состав

представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты термодинамического расчета равновесного состояния сред на основе оксида бора

№ смеси	Массовая доля компонентов смеси, %	$T_{ad}$ , К	Равновесное содержание конденсированных фаз при охлаждении после СВС, % мас.	Фазовый состав и толщина слоя, мкм		
				Общая	FeB	Fe <sub>2</sub> B
1	49B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 21Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1412 > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 66,26Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 23,89B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>9,18AlB<sub>12(s)</sub></b> + 0,23BN <sub>(s)</sub>	110	–	110
2	42B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 28Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1826 > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 78,4Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 8,64B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>12,30AlB<sub>12(s)</sub></b> + 0,23BN <sub>(s)</sub>	210	80	130
3	39B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1952 > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 82,70Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 3,31B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>13,32AlB<sub>12(s)</sub></b> + 0,23BN <sub>(s)</sub>	230	100	130
4	35B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 35Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2017 > $T_m$ (AlB <sub>2</sub> )	$T = 723$ К 80,86Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>11,34AlB<sub>2(s)</sub></b> + <b>6,97AlB<sub>12(s)</sub></b> + 0,38AlN <sub>(s)</sub>	150	–	–
5	28B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 42Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1781 > $T_m$ (AlB <sub>2</sub> ) > $T_m$ (Al)	$T = 723$ К 70,65Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 9,06Al <sub>(s)</sub> + <b>19,45AlB<sub>2(s)</sub></b> + 0,38AlN <sub>(s)</sub>	200	–	–
6	36B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 29Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 5Fe	1980 > $T_m$ (FeB) > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 80,49Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>11,67AlB<sub>12(s)</sub></b> + <b>5,94FeB<sub>(s)</sub></b> + 24B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 0,23BN <sub>(s)</sub>	200	140	60
7	30B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 25Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15Fe	1976 > $T_m$ (FeB)	$T = 1253$ К 73,57Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>7,63AlB<sub>12(s)</sub></b> + <b>17,81FeB<sub>(s)</sub></b> + 0,38AlN <sub>(s)</sub> + <b>0,14AlB<sub>2(s)</sub></b>	225	125	100
8	25B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 19Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 25Fe	1859 > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 65,17Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>2,96AlB<sub>12(s)</sub></b> + <b>29,99FeB<sub>(s)</sub></b> + 1,2B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 0,23BN <sub>(s)</sub>	200	75	125
9	22B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 17Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 31Fe	1852 > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 61,48Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>0,75AlB<sub>12(s)</sub></b> + <b>36,82FeB<sub>(s)</sub></b> + 0,29B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 0,23BN <sub>(s)</sub>	150	–	150
10	19B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 6Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 35Fe	974 > $T_m$ (FeCl <sub>2</sub> ) > $T_m$ (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$T = 723$ К 45,67Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>28,84Fe<sub>2</sub>B<sub>(s)</sub></b> + 12,1Fe + 12,44B <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 0,26BN <sub>(s)</sub> + 0,64FeCl <sub>2(m)</sub>	75	–	75
11	14B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 11Al + 30Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 45Fe	1466	$T = 723$ К 50,25Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + <b>48,18Fe<sub>2</sub>B<sub>(s)</sub></b> + 0,85Fe <sub>(s)</sub> + 0,17BN <sub>(s)</sub> + 0,1AlN <sub>(s)</sub>	20	–	20

**Примечание:** При обработке из смесей № 4, 5 формируются диффузионные алитированные слои. Жирным шрифтом отмечены соединения, которые являются источниками атомов бора. Нижние индексы: *s* – твердая фаза; *m* – расплав.

Уменьшение количества AlB<sub>12</sub> в синтезированной смеси сдвигает процесс насыщения в сторону однофазного борирования (смесь № 1), а при формировании в порошковой среде соединения AlB<sub>2</sub> идет процесс алитирования (смеси № 4, 5).

С целью подтверждения термодинамических расчетов и возможности получения двухфазного боридного слоя из соединения AlB<sub>12</sub> была проведена обработка стали У8 в смеси следующего состава: 80 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 20 % AlB<sub>12</sub>. Борид алюминия AlB<sub>12</sub> был получен методом спекания порошков бора и алюминия в термитном заряде. Установлено, что в результате насыщения из смеси на основе AlB<sub>12</sub> формируется двухфазный боридный слой толщиной 200 мкм с толщиной фазы FeB до 100 мкм.

На следующем этапе исследований прове-

дены расчеты для борлирующих сред, содержащих железо (табл. 1, смеси № 6–11). Основным источником тепловыделения в смесях № 6–11 являются реакции Al + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + B, Al + 2B → AlB<sub>2</sub>, Al + 12B → AlB<sub>12</sub>, Fe + B → FeB, Fe + 2B → Fe<sub>2</sub>B.

Исходя из приведенных расчетов ТМ СВС-процессов в смесях на основе оксида бора с добавками железа источниками атомов бора могут быть AlB<sub>12</sub>, AlB<sub>2</sub>, FeB и Fe<sub>2</sub>B. Обработка в этих смесях стали У8 при температуре 950 °С и выдержке 4 ч приводит к формированию одно- и двухфазных боридных слоев (табл. 1). В двухфазном слое максимальная по толщине зона FeB формируется при самом высоком содержании AlB<sub>12</sub> – 11,67 % (смесь № 6). В смеси № 9 уменьшение количества AlB<sub>12</sub> до 0,75 % при

одновременном увеличении содержания FeB до 36,82 % приводит к переходу слоя от двух-к однофазному. Увеличение в смесях № 10, 11 количества железа приводит к образованию в синтезированной смеси соединения Fe<sub>2</sub>B, что вызывает резкое снижение толщины однофазного боридного слоя.

В работе моделировали СВС-процессы алюмотермического восстановления многокомпонентных систем, содержащих кроме оксидов бора, хрома, циркония в качестве основных компонентов добавки оксидов никеля, железа, молибдена, меди и металлов – железо и никель (табл. 2).

Расчеты подтвердили возможность прохождения алюмотермических реакций в режиме СВС. Адиабатическая температура для этих порошковых сред поднимается до 2215–2327 К. Результаты термодинамических расчетов и металлографических исследований приведены в табл. 2.

Термодинамическое моделирование синтеза

порошковых сред (№ 12–18) позволило выявить вещества, которые при последующем проведении ХТО являются источниками атомов бора. Установлено, что такими соединениями в исследуемых порошковых средах могут быть: AlB<sub>12</sub>, CrB<sub>2</sub>, CrB, ZrO<sub>2</sub>, Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub>, FeB. Фазовый состав, структура слоя, его толщина находятся в зависимости от состава синтезированной порошковой среды, а именно от вида вводимого металла или оксида. Результаты термодинамического расчета равновесного состояния реагирующих систем при СВС (табл. 2) свидетельствуют об обязательном наличии в системах соединения AlB<sub>12</sub> при формировании из них двухфазных боридных покрытий (составы № 12–16). В боридующих смесях с добавками железа (составы № 17, 18) источниками атомов бора являются CrB, Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub>, FeB. Отсутствие AlB<sub>12</sub> в смеси приводит к формированию однофазного боридного слоя Fe<sub>2</sub>B.

Таблица 2

Результаты термодинамического расчета равновесного состояния сред на основе оксидов бора, хрома и циркония

№ смеси	Исходный состав, % мас.	T <sub>ad</sub> , К	Равновесное содержание конденсированных фаз при охлаждении после СВС, % мас.	Фазовый состав и толщина слоя, мкм		
				Общая	FeB	Fe <sub>2</sub> B
12	21Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 26B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 28Al + 6NiO + 3ZrO <sub>2</sub>	T <sub>ad</sub> = 2316 > T <sub>m</sub> (Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub> ) = 1400 > T <sub>m</sub> (Al) = 933 > T <sub>m</sub> (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 723	T <sub>m</sub> (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 723 К 73Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 14,5CrB <sub>2(s)</sub> + 5,37Ni <sub>4</sub> B <sub>3(s)</sub> + 3,02AlB <sub>12(s)</sub> + 2,75ZrB <sub>2(s)</sub> + 0,34B <sub>2</sub> O <sub>3(m)</sub>	320	240	80
13	24Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 25B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 27Al + 5Ni + 3ZrO <sub>2</sub>	T <sub>ad</sub> = 2216 > T <sub>m</sub> (Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> ) = 1406 > T <sub>m</sub> (Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub> ) = 1400 > T <sub>m</sub> (Al) = 933 > T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 > T <sub>m</sub> (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 723	T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 К 72,3Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 14,53CrB <sub>2(s)</sub> + 4,38Ni <sub>4</sub> B <sub>3(s)</sub> + 3,0AlB <sub>12(s)</sub> + 2,75ZrB <sub>2(s)</sub> + 1,95Ni <sub>2</sub> Al <sub>3(s)</sub> + 0,5AlF <sub>3(m)</sub>	300	220	80
14	24Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 25B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 28Al + 5WO <sub>3</sub> + 3ZrO <sub>2</sub>	T <sub>ad</sub> = 2291 > T <sub>m</sub> (AlB <sub>2</sub> ) = 1253 > T <sub>m</sub> (Al) = 933 > T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 > T <sub>m</sub> (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 723	T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 К 73,8Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 12,27CrB <sub>(s)</sub> + 5,73AlB <sub>12(s)</sub> + 4,16WB <sub>(s)</sub> + 2,72ZrB <sub>2(s)</sub> + 0,49AlF <sub>3(m)</sub> + 0,27AlB <sub>2(s)</sub>	240	40	200
15	24Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 25B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 28Al + 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3ZrO <sub>2</sub>	T <sub>ad</sub> = 2304 > T <sub>m</sub> (FeB) = 1923 > T <sub>m</sub> (Al) = 933 > T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 > T <sub>m</sub> (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 723	T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 К 74,77Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 9,93CrB <sub>2(s)</sub> + 4,13FeB <sub>(s)</sub> + 3,8CrB <sub>(s)</sub> + 3,58AlB <sub>12(s)</sub> + 2,72ZrB <sub>2(s)</sub> + 0,49AlF <sub>3(m)</sub>	280	100	180
16	22Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 15Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 26B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 6CuO + 28Al + 3ZrO <sub>2</sub>	T <sub>ad</sub> = 2215 > T <sub>m</sub> (Cu) = 1358 > T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728	T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 К 71,08Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 6,06AlB <sub>12(s)</sub> + 0,86AlB <sub>2(s)</sub> + 12,27CrB <sub>(s)</sub> + 2,72ZrB <sub>2(s)</sub> + 5,94Cu <sub>(s)</sub> + 0,49AlF <sub>3(m)</sub>	380	220	160
17	8Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 8Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 23B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 22Al + 10Ni + 25Fe + 3ZrO <sub>2</sub>	T <sub>ad</sub> = 2285 > T <sub>m</sub> (FeB) = 1923 > T <sub>m</sub> (NiAl) = 1911 > T <sub>m</sub> (Fe) = 1809 > T <sub>m</sub> (Ni <sub>3</sub> Al) = 1668 > T <sub>m</sub> (Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> ) = 1406 > T <sub>m</sub> (Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub> ) = 1400 > T <sub>m</sub> (Al) = 933 > T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 > T <sub>m</sub> (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) = 723	T <sub>m</sub> (AlF <sub>3</sub> ) = 728 К 48,94Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> + 26,24FeB <sub>(s)</sub> + 10,3Ni <sub>4</sub> B <sub>3(s)</sub> + 6,64CrB <sub>(s)</sub> + 3,14Fe <sub>(s)</sub> + 2,76ZrB <sub>2(s)</sub> + 1,45NiAl <sub>(s)</sub> + 0,50AlF <sub>3(m)</sub>	130	0	130

18	$11\text{Al}_2\text{O}_3 + 9\text{Cr}_2\text{O}_3 + 23\text{B}_2\text{O}_3 + 22\text{Al} + 6\text{CuO} + 25\text{Fe} + 3\text{ZrO}_2$	$T_{ad} = 2327 > T_m(\text{FeB}) = 1923 > T_m(\text{Fe}) = 1809 > T_m(\text{Cu}) = 1358 > T_m(\text{Al}) = 933 > T_m(\text{AlF}_3) = 728 > T_m(\text{B}_2\text{O}_3) = 723$	$T_m(\text{AlF}_3) = 728 \text{ K}$ $53,6\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} + 29,69\text{FeB}_{(s)} + 7,4\text{CrB}_{(s)} + 4,77\text{Cu}_{(s)} + 2,71\text{ZrB}_{2(s)} + 0,02\text{ZrO}_{2(s)} + 1,3\text{B}_2\text{O}_{3(m)}$	150	0	150
----	---	---	--	-----	---	-----

Двухфазные боридные слои, образованные в смесях, содержащих чистые металлы и их оксиды (составы № 12–16), в 1,2–1,8 раза превосходят по толщине слои, полученные в традиционных алюмотермических смесях без добавок (табл. 1 смеси № 2, 3). Микрорентгеноспектральные исследования, проведенные на сканирующем электронном микроскопе Vega II LMU, показали, что двухфазные боридные слои легированы хромом (0,47 %) и цирконием (0,2 %) по границе формирующихся фаз FeB и Fe<sub>2</sub>B.

### ВЫВОД

Таким образом, в результате термодинамического моделирования с использованием программы АСТРА-4 определены адиабатические температуры СВС для систем, содержащих В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в качестве восстанавливаемого оксида, алюминий – в качестве восстановителя, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – в качестве инертного разбавителя и оксиды металлов либо чистые металлы для получения тугоплавких боридов.

Рассчитаны равновесные составы смесей при синтезе и последующем остывании после прохождения волны СВС. Это позволило оценить механизмы взаимодействия в волне СВС в данных многокомпонентных многофазных системах и определить вещества, которые являются источниками атомов бора при последующем проведении ХТО в синтезированных порошковых смесях.

Сопоставление результатов ТМ и металлографических исследований боридных диффузионных слоев показало, что образование в результате СВС процесса в порошковой среде соединения AlB<sub>12</sub> способствует формированию двухфазных боридных слоев.

Введение в порошковую среду чистых металлов и их оксидов для получения тугоплавких соединений дает возможность варьировать толщину диффузионного слоя, его химический состав и соотношение боридных фаз.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Получение** и исследование свойств однофазных диффузионных покрытий / Б. С. Кухарев [и др.]; Бел. гос. политехн. акад. – Минск, 1999. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ 14.01.00. № 49-В00 // Указатель деп. рукописей 03.49В00.277.
2. **Мержанов, А. Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А. Г. Мержанов // Физическая химия: современные проблемы / под ред. Я. М. Колотыркина – М.: Химия, 1983. – С. 6–45.
3. **Мержанов, А. Г.** Научные основы, достижения и перспективы развития процессов твердопламенного горения / А. Г. Мержанов // Известия Акад. наук. Сер. химич. – 1997. – № 1. – С. 8–32.
4. **Munir, Z. A.** Self-propagating exothermic reactions: the synthesis of high-temperature materials by combustion / Z. A. Munir, U. Anselmi-Tamburini // Materials Science Reports, 1989. – Vol. 3, N 7/8. – P. 277–365.
5. **Применение ЭВМ** для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г. Б. Синярев [и др.]. – М.: Наука, 1982.
6. **Ватолин, Н. А.** Термодинамическое моделирование металлургических процессов / Н. А. Ватолин, Г. К. Моисеев, Б. Г. Трусов. – М.: Metallurgy, 1994.
7. **Кубашевски, О.** Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: справ. / О. Кубашевски; пер. с англ. – М.: Metallurgy, 1985.
8. **Диаграммы** состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. / под ред. О. А. Баных, М. Е. Дрица. – М.: Metallurgy, 1986.
9. **Хансен, М.** Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – М.: Metallurgizdat, 1962. – Т. 1, 2.
10. **Эллиот, Р. П.** Структуры двойных сплавов / Р. П. Эллиот. – М.: Metallurgy, 1968. – Т. 1, 2.
11. **Шанк, Ф. А.** Структуры двойных сплавов / Ф. А. Шанк. – М.: Metallurgy, 1973.
12. **Binary Alloy Phase Diagrams** / Т. В. Massalski [et al.] // ASM International, Metals Park, OH. – 1990. – Vol. 1, 2.

Поступила 19.06.2009