

УДК 669.536.7

А. А. ГАНЕЕВ, А. Р. ХАЛИКОВ, Р. Р. КАБИРОВ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ

Рассматривается одна из проблем прогноза диаграмм состояния — определение состава и температуры многокомпонентных эвтектических диаграмм состояния. Предлагаемый научный подход позволяет определять химический состав многокомпонентной эвтектической системы и находить эвтектическую температуру. Определены уравнения для нахождения эвтектических концентраций и температур. Проведена проверка полученных уравнений с экспериментальными данными. *Синтез сплавов; многокомпонентные эвтектические системы; эвтектическая температура; эвтектическая концентрация; прогноз диаграмм состояния*

Необходимость в материалах, способных длительное время нести высокие механические и тепловые нагрузки, остро ощущается практически во всех областях современной техники. Обычные материалы уже не удовлетворяют требованиям новой техники, и перспективы прогресса в машиностроении связываются с разработкой композиционных материалов (КМ).

Наиболее вероятным потребителем КМ в ближайшее время явится нефтяная техника [1]. Экономичность бурения зависит от стойкости буровых коронок. Буровые коронки изготавливают методом порошковой металлургии, они состоят из карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC), соединенных кобальтовой связкой [2, 3].

К материалам, применяемым для армирования буровых долот, предъявляют ряд требований [4, 5]:

- способность нести нагрузку без проявления текучести или ползучести в температурном интервале работы;
- возможность эксплуатации в агрессивных средах;
- стойкость к абразивному износу.

Повышение экономичности бурения при ударно-поворотном и ударно-вращательном бурении шпуров крепких горных пород зависит от износостойкости буровых коронок, изготавливаемых из твердых сплавов ВК12КС, ВК15 (ГОСТ 3882-74) или зарубежных СТ50, ВТ20. Возникает необходимость увеличения глубины скважин для получения природ-

ных ресурсов, находящихся в более глубоких слоях земной коры, а стойкость материалов к износу при увеличении глубины остается на прежнем уровне, так как плотность и твердость слоев увеличивается, следовательно, повышение износостойкости долот связано с заменой кобальтовой связки. У кобальта нельзя повысить механические свойства, его необходимо заменить на новый сплав, значительно превосходящий кобальт по прочностим и твердости с пластичностью в пределах 5–7%.

Альтернативной заменой кобальта должен явиться сплав с узким интервалом кристаллизации, поскольку в сплавах с широким интервалом кристаллизации в КМ образуются поры до 100 мкм, что резко снижает механические характеристики КМ.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБРАЗУЮЩИХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Для получения КМ с заданными свойствами необходим обоснованный выбор сплава инфильтрата и упрочняющей фазы. В качестве упрочняющей фазы могут выступать различные виды элементов, соединений, карбиды, бориды, нитриды или оксиды, в качестве сплава инфильтрата — сплав эвтектического типа.

Эвтектические сплавы кристаллизуются в узком интервале температур и не образуют большой (обширной) разветвленной ден-

дريدной структуры, следовательно, площадь поверхностного соприкосновения на границе сплав–инфильтрат будет больше, а пустот меньше, чем у сплавов с широким интервалом кристаллизации. Данные эвтектических превращений различных металлических систем, особенно многокомпонентных, мало изучены и плохо структурированы, а их экспериментальное определение трудоемко. Знание только типа компонентов эвтектики и использование различных гипотез о структуре жидких эвтектик не позволяют сделать заключений о местоположении эвтектики в многокомпонентной системе. Нахождение уравнений для расчета эвтектических концентраций (C_E) и эвтектических температур (T_E) двух- и многокомпонентных систем позволит значительно сократить время создания сплавов.

Для расчета положения эвтектической точки и линий ликвидуса одним из первых использовалось уравнение Шредера–Ле-Шателье [6, 7]:

$$\ln X = Q(T - T_A) : RT_A, \quad (1)$$

где X — атомная концентрация растворенного вещества;

Q — теплота растворения;

R — газовая постоянная;

T_A — абсолютная температура плавления растворителя.

Из эмпирических соотношений наиболее известна формула Э. Кордеса [12]

$$\frac{X_A}{X_B} = \frac{T_B - T_E}{T_B} \div \frac{T_A - T_E}{T_A}, \quad (2)$$

где T_A, T_B, T_E — абсолютные температуры плавления компонентов и эвтектики;

X_A, X_B — атомные (молярные) доли компонентов A и B в эвтектике.

Имеются противоречивые сведения о возможности использования уравнения Кордеса для расчета эвтектической концентрации и температуры. Кордес считает, что оно пригодно для систем, не образующих широкой области твердых растворов [6, 7]. А. Л. Сейфер и З. М. Остроухова [6, 12] произвели детальную численную проверку уравнения Кордеса для металлических и солевых систем и пришли к выводу, что оно может быть использовано только как основа весьма грубого статистического прогноза.

Б. Б. Гуляев [6, 7] предложил для расчета эвтектической температуры или концентрации простое эмпирическое соотношение:

$$(T_O - T_E) : T_O = AC_E, \quad (3)$$

где T_O, T_E — температуры металла-основы и эвтектики (или другого неинвариантного равновесия в бинарной системе); C_E — эвтектическая концентрация;

A — коэффициент пропорциональности, равный примерно 0,01.

Как отмечает автор, эти уравнения тем точнее, чем меньше концентрация C_E неинвариантной точки. При величинах $C_E > 1\%$ ошибки становятся весьма большими и уравнением пользоваться нельзя.

В работе Л. Б. Мединского [6, 7] положение эвтектической точки было определено на основе следующих соображений: вероятность зарождения и формирования кристаллов фазы тем больше, чем больше переохлаждение компонента и чем больше атомов, формирующих фазу, имеется в системе. В момент кристаллизации эвтектики вероятность образования фаз одинакова. Предложено уравнение:

$$\frac{C_A}{C_B} = \frac{T_B - T_E}{(T_A - T_E)(M_A : M_B)}, \quad (4)$$

где C_A и C_B — эвтектические концентрации компонентов [% (по массе)];

T_A, T_B, T_E — абсолютные температуры плавления компонентов и эвтектики; M_A и M_B — атомные массы компонентов. Расчеты показали [6], что уравнение (4) дает хорошие результаты для простых эвтектических систем, но ошибки резко возрастают, если в сплавах имеются химические соединения или фазовые превращения в твердом состоянии, т. е. применимо в наиболее общем случае только для бинарных систем.

М. В. Васильев получил соотношение [6, 7]:

$$\frac{C'_A}{C'_B} = \frac{C_{PB}(T_B - T_A)}{C_{PA}(T_A - T_E)}, \quad (5)$$

где C_A и C_B — эвтектические концентрации компонентов A и B соответственно в атомных долях;

T_A, T_B, T_E — температуры плавления компонентов и эвтектики;

C_{PA} и C_{PB} — атомные теплоемкости компонентов.

Автор отмечает, что различие в атомных теплоемкостях металлических компонентов невелико и их отношением можно пренебречь. Поэтому для практических расчетов предлагается упрощенная формула [6, 7]:

$$\frac{C'_A}{C'_B} = \frac{(T_B - T_A)}{(T_A - T_E)}, \quad (6)$$

Базовыми данными методики расчета М. Г. Круковича [8, 9] являются температуры плавления компонентов, входящих в состав эвтектики. Компонентами эвтектик могут быть чистые элементы, химические соединения или твердые растворы предельной растворимости. Для твердого раствора предельной растворимости при расчетах используется температура ликвидус этого раствора.

Эта взаимосвязь, названная температурным правилом эвтектической реакции, имеет следующий вид [8]:

$$T_E = k_E (T_A + T_B) . \quad (7)$$

Расчет концентрации в работе приведен следующим образом

$$C_E = [(T_B - T_E) / (T_A + T_B - 2T_E)] 100\% . \quad (8)$$

В работе автора [8] расчет проводился для ограниченного числа эвтектик. Авторами статьи были проверены уравнения М. Г. Круковича для всех бинарных диаграмм состояния эвтектического типа и выяснилось, что уравнение пригодно лишь для ограниченного числа эвтектических систем.

Необходимо подчеркнуть, что все приведенные выше методы получены для простых эвтектических систем и не решают вопроса определения эвтектик многокомпонентных систем. Важным является также метод определения элементов, образующих эвтектические системы. Существующие рекомендации и расчетные формулы позволяют провести оценку положения эвтектики только для некоторых систем. В целом, для большинства двухкомпонентных и многокомпонентных систем эти подходы являются малопримемлемыми [8].

Для прогноза диаграмм состояния эвтектического типа необходимо определить элементы, которые образуют многокомпонентную эвтектическую систему [9].

Необходим метод нахождения всех возможных комбинаций многокомпонентных эвтектических систем.

Из рассмотрения диаграмм состояния [9, 10, 16] следует, что для нахождения элементов новой многокомпонентной эвтектической системы необходима база данных (БД) всех изученных эвтектических превращений бинарных систем. Следовательно, подбирая различные эвтектические системы между собой для разных элементов по принципу диаграмм состояния систем с двойным

конгруэнтно плавящимся соединением, можно найти все возможные комбинации многокомпонентных эвтектических систем при условии, что каждый элемент новой многокомпонентной эвтектической системы будет образовывать эвтектики со всеми остальными элементами, образующими сплав эвтектического типа.

Для решения задачи была разработана база данных (БД) [11], «База данных по эвтектическим сплавам двухкомпонентных систем» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2008620302).

В базу данных вошли все элементы Периодической системы Д. И. Менделеева, образующие двойные диаграммы эвтектического типа (более 700 систем). Для каждой системы указаны эвтектическая концентрация легирующих элементов, температура образования эвтектических точек и температура плавления элементов, образующих эвтектику [9, 12].

На основе БД построена матрица (рис. 1) взаимодействия элементов друг с другом. По горизонтали и вертикали матрицы расположены элементы. При пересечении элементов по горизонтали и вертикали расположены цифры (0) или (1), единица означает, что между двумя данными элементами существует эвтектика, цифра (0) означает отсутствие между элементами эвтектического взаимодействия.

Нахождение комбинаций элементов между собой с образованием эвтектического типа (по цифрам (1) на рис. 1) трудоемко, поэтому для нахождения элементов многокомпонентных систем предложен метод рекурсивного алгоритма и разработана программа ЭВМ «Программа генерирования элементов эвтектических сплавов» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613834).

Программа рассчитывает составы от трех до восьмикомпонентных эвтектических систем. На рис. 1 матрица взаимодействия элементов систем Cr-Al-B-Be-Co и $\text{La-Au-Bi-Ca-Cd-Ga-In}$ показана в виде темных прямоугольников и окружностей с цифрой 1 в центре.

Разработанная программа позволяет рассчитывать все возможные комбинации элементов от трех- до восьмикомпонентных эвтектических систем. Результатом программы является определение более 20000 многокомпонентных эвтектических систем. Пример результата расчета рекурсивного алгоритма для определения элементов новых многокомпо-

Горизонтальный ряд элементов

	AG	AL	AU	B	BA	BE	BI	CA	C	CD	CO	CR	CS	CU	FE	GA	GE	HF	IN	IR	K	LA	LI
Вертикальный ряд элементов	AG																						
	AL	1																					
	AU	1	1																				
	B	1	1	1																			
	BA	1	1	0	0																		
	BE	1	1	1	1	1																	
	BI	1	1	1	0	1	0																
	CA	1	1	1	0	0	0	1															
	C	0	0	0	1	0	0	0	0														
	CD	0	1	1	0	0	0	1	1	0													
	CO	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0												
	CR	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1											
	CS	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0										
	CU	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0									
	FE	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0								
	GA	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0							
	GE	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0						
	HF	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1					
	IN	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0				
	IR	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0			
	K	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0		
	LA	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0		
	LI	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0

Рис. 1. Матрица взаимодействия элементов (представлена часть матрицы)

Таблица 1

Элементы многокомпонентных эвтектических систем

6-компонентные системы	7-компонентные системы	8-компонентные системы
SI - SC - NI - CR - B - AL	ZR - SI - CO - BE - B - AU - AL	ZN - LA - IN - GA - CD - CA - BI - AU
SI - SC - NI - MO - B - AL	ZR - SI - CR - CO - BE - B - AL	ZN - MG - LA - GA - CA - BI - AU - AL
SI - SC - NI - NB - B - AL	ZR - SI - CU - BE - B - AL - AG	ZN - MG - LI - GA - CA - BI - AU - AL
SI - SC - NI - NB - CR - AL	ZR - SI - CU - CR - BE - B - AL	ZN - NI - MG - LA - GA - CA - BI - AL
SI - SC - NI - NB - CR - B	ZR - SI - FE - BE - B - AU - AL	ZN - NI - MG - LI - GA - CA - BI - AL
SI - SC - PD - CR - B - AL	ZR - SI - NI - CR - BE - B - AL	ZN - PD - MG - LI - GA - BI - BA - AL
SI - SC - PD - MO - B - AL	ZR - SI - PD - CR - BE - B - AL	ZN - PD - MG - LI - GA - CA - BI - AL
SI - SC - PD - NB - B - AL	ZR - TI - SI - PD - PB - MN - B	ZN - SB - MG - LA - GA - CA - AU - AL

нентных эвтектических систем приведен в табл. 1.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР

Нахождения эвтектических концентраций и температур рассматриваются из смешения идеальных растворов компонентов, взятых в одинаковом агрегатном состоянии в любых соотношениях. Тепловой эффект и объем не меняются, а изменение энтропии равно изменению энтропии при смешении идеальных газов:

$$\Delta H = 0, \quad \Delta V = 0, \quad \Delta S = \Delta S_{id} = -\chi_1 R \ln \chi_1 - \chi_2 R \ln \chi_2. \quad (9)$$

При расчетах массовых долей растворенного вещества в идеальных растворах применяют правило смешения, диагональную модель «конверта Пирсона» или, что то же самое, правило креста [13]. Поскольку при смешении растворов меняются массовые доли

растворенного вещества и растворителя, то меняется и их внутренняя энергия, тогда:

$$(U_3 - U_2) U_2 = (U_1 - U_3) U_1, \quad (10)$$

где U_1 — внутренняя энергия первого компонента, U_2 — внутренняя энергия второго компонента, U_3 — общая внутренняя энергия при смешении.

Для U вводится характеристическая температура Дебая [14] $T_D = h\nu_{max}/k$ (где h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана) и рассматриваются два случая. Для высоких температур $T \geq T_D$ и для низких $T \leq T_D$. Эвтектические превращения происходят при высоких температурах Дебая, тогда внутренняя энергия кристалла будет равна:

$$U = \frac{12\pi V}{v^3} kT \int_0^{\nu_{max}} \nu^2 d\nu = \frac{12\pi V kT}{v^3} \frac{\nu_{max}^3}{3} = 3NkT. \quad (11)$$

Чтобы установить зависимость равновесных свойств растворов от состава и свойств компонентов, пользуются парциальными молярными величинами [15].

Парциальной молярной величиной i -го компонента раствора называется изменение данного экстенсивного свойства раствора при добавлении одного моля i -го компонента к большому количеству раствора при постоянстве давления и температуры. Большое количество вещества указывается для того, чтобы добавление одного моля i -го компонента практически не изменяло состава раствора. Температуре раствора соответствует парциальная молярная температура \overline{T}_{χ_n} .

После упрощения найдем парциальную молярную температуру \overline{T}_{χ_n} :

$$\overline{T}_{\chi_n} = \frac{(\chi_1 T_1)^2 + ((1 - \chi_1) T_2)^2}{\chi_1 T_1 + (1 - \chi_1) T_2}. \quad (12)$$

Отклонение свойства раствора от аддитивности называется изменением свойства раствора и выражается уравнением:

$$\Delta X = \chi_1 \Delta \overline{X}_1 + \chi_2 \Delta \overline{X}_2, \quad (13)$$

где ΔX — изменение свойства раствора, $\Delta \overline{X}_1$ — изменение парциального молярного свойства растворителя, $\Delta \overline{X}_2$ — изменение парциального молярного свойства растворенного вещества.

Тогда используя уравнения (12) и (13), изменение свойства раствора определим уравнением:

$$\Delta X = (1 - \chi_1) T_2 + \chi_1 \left[\frac{(\chi_1 T_1)^2 + ((1 - \chi_1) T_2)^2}{\chi_1 T_1 + (1 - \chi_1) T_2} \right], \quad (14)$$

где T_1 — температура плавления первого компонента эвтектики, T_2 — температура плавления второго компонента эвтектики ($T_2 \geq T_1$).

Используя уравнение (14), определим эффективные молярные доли компонентов в точке бинарной эвтектики, отвечающие минимуму температуры для системы Al-Si при изменении молярных долей χ_1 и χ_2 ($\chi_2 = 1 - \chi_1$) от 0 до 1.

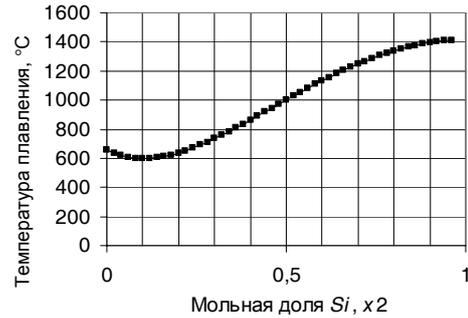


Рис. 2. Зависимость температуры плавления бинарной системы Al-Si от молярной доли второго компонента

На рис. 2 изображен график, построенный по уравнению (14), видно, что минимум температуры $T_E = 597,67^\circ\text{C}$ приходится на эвтектическую концентрацию $C_E = 10\%$ Si. По данному методу разработана программа ЭВМ «Расчет эвтектических концентраций и температур» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613833).

Сопоставление точности расчетов проводили для бинарных диаграмм состояния металлических систем. Элементы диаграмм состояния выбирали с различным расположением в Периодической таблице Д. И. Менделеева. Например, элементы разных групп и периодов, а также элементы одного периода и одной группы.

В настоящее время ведется разработка метода расчета C_E и T_E с использованием колебательной теории плавления, согласно которой по мере повышения температуры амплитуды колебаний атомов увеличиваются, а эвтектическая концентрация бинарной системы рассматривается как резонанс колебаний атомов фаз.

Данные проверочных расчетов показывают, что абсолютная погрешность при расчетах T_E , C_E не превышает ± 5 .

3. РАСЧЕТ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Расчет многокомпонентных эвтектических систем проводят с целью получения T_E , т. е. температуры кристаллизации расплава, а также для определения концентраций элементов, образующих эвтектику.

Отбор компонентов эвтектического сплава проводился по сочетанию высоких прочностных, пластичных свойств, удовлетворительной смачиваемости армирующей фазы (WC), удовлетворительной технологичности и высокой коррозионной стойкости элементов. По выбранным элементам был произведен поиск

Таблица 2

Результат расчета эвтектических концентраций и температур

Элементы, образующие эвтектическую систему	C_E первого элемента, ат. %	C_E второго элемента, ат. %	C_E третьего элемента, ат. %	C_E четвертого элемента, ат. %	$T_E, ^\circ\text{C}$
CR-CO-C-B	6,98	8,03	28,9	56,1	1035
NI-CR-C-B	4,4	5,6	30,6	59,4	1025
NB-CO-C-B	7,32	4,68	29,9	58,1	1026
NI-MO-BE-B	7,78	4,22	78,3	9,68	1032
ZR-NI-CR-C	7,92	82,1	8,55	1,45	1102

по программе ЭВМ «Программа генерирования элементов эвтектических сплавов» и найдены сочетания элементов, образующие эвтектические сплавы (табл. 2).

Приближенная оценка эвтектических концентраций в многокомпонентных системах проводится последовательным способом (поэтапно). На первом этапе определяются эвтектические концентрации в сочетании элементов, разбитых попарно с учетом снижения температуры плавления. На следующем этапе оценивают концентрации при взаимодействии полученных эвтектик между собой. Эти эвтектики рассматриваются как компоненты новой эвтектической системы [8]. При расчете эвтектической концентрации с помощью данного метода вид линий ликвидус не имеет значения. Результат расчета C_E и T_E многокомпонентных эвтектических систем конгруэнтного типа представлен в табл. 2.

Метод расчета T_E и C_E , разработанный в УГАТУ, применим для расчета многокомпонентных эвтектических систем в диаграммах состояния конгруэнтного и инконгруэнтного типа.

ВЫВОДЫ

1. Разработана база данных бинарных эвтектических систем, на основании которой рекурсивным алгоритмом найдены элементы, образующие многокомпонентные эвтектические системы для последующего расчета T_E и C_E .

2. Рассчитана парциальная молярная температура, на основании которой получены уравнения для нахождения T_E и C_E в бинарных эвтектических системах.

3. Проведена проверка полученных уравнений с экспериментальными данными. Расчеты показывают, что результаты по предложенным уравнениям имеют абсолютную погрешность расчета ± 5 .

4. На основе полученных уравнений произведен расчет T_E и C_E многокомпонентных эвтектических систем для получения КМ с ориентированной структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баженов, М. Ф.** Твердые сплавы : справ. / М. Ф. Баженов, С. Г. Байчман, Д. Г. Карпачев. М. : Металлургия, 1978. 184 с.
2. **Самсонов, Г. В.** Твердые соединения тугоплавких металлов / Г. В. Самсонов. М. : Металлург-издат, 1957. 389 с.
3. **ГОСТ 3882-74.** (ИСО 513-75). Сплавы твердые спеченные. Марки.
4. **Марукович, Е. И.** Износостойкие сплавы / Е. И. Марукович, М. И. Карпенко. М. : Машиностроение, 2005. 428 с.
5. **Киффер, Р.** Твердые сплавы / Р. Киффер, Ф. Бенезовский. М. : Металлургия, 1971. 392 с.
6. **Воздвиженский, В. М.** Прогноз двойных диаграмм состояния по статистическим критериям / В. М. Воздвиженский. М. : Металлургия, 1975. 223 с.
7. **Сомов, А. И.** Эвтектические композиции / А. И. Сомов. М. : Металлургия, 1975. 303 с.
8. **Крукович, М. Г.** Расчет эвтектических концентраций и температуры в двух- и многокомпонентных системах / М. Г. Крукович // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2005. № 10. С. 9–17.
9. **Ганеев, А. А.** Расчет температур и концентраций упрочняющей фазы для получения композиционных материалов методом инфильтрации / А. А. Ганеев, Р. Р. Кабиров, А. Р. Халиков // Инновационные технологии в машиностроении. 2007. С. 291–297.
10. **Захаров, А. М.** Диаграммы состояния двойных и тройных систем : учеб. пособие для металлург. и машиностроит. спец. вузов / А. М. Захаров. М. : Металлургия, 1990. 239 с.
11. **Ганеев, А. А.** Базы данных для создания композиционных материалов / А. А. Ганеев, А. Р. Халиков // Ползуновский альманах. 2006. № 3. С. 157–160.

12. **Ганеев, А. А.** Выбор элементов для инфильтрантов композиционных сплавов шаровых пробок и уплотнительных колец / А. А. Ганеев, С. Н. Бухта, А. Р. Халиков // Литейные процессы : межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск : МГТУ, 2006. Вып. 6. С. 186–192.
13. **Суворов, А. В.** Общая химия : учеб. пособие для вузов / А. В. Суворов, А. Б. Никольский. СПб. : Химия, 1995. 624 с.
14. **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. М. : Высш. шк., 2000. 718 с.
15. **Стромберг, А. Г.** Физическая химия : Учеб. для вузов / А. Г. Стромберг, Д. П. Семченко. М. : Высш. школа, 2003. 527 с.
16. **Диаграммы состояния** двойных металлических систем : Справочник в 3 т. / под ред. Н. П. Лякишева. М. : Машиностроение, Т. 1. 1996. 992 с.



ОБ АВТОРАХ

Ганеев Альмир Амирович, проф., зав. каф. машин и технол. литейн. производства. Дипл. инж. по металлургии цветн. металлов (УПИ, 1963). Д-р техн. наук по металлвед. и литейн. произв. (защ. в УрГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2000). Иссл. в обл. металлвед. и синтеза жаропрочн. сплавов.



Халиков Альберт Рашитович, асп., асс. каф. теоретических основ электротехники. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2005). Готовит дис. по синтезу эвтектических сплавов для получения композиционных материалов методом инфильтрации.



Кабиров Ринат Рафаилович, науч. сотр. ИПСМ РАН. Дипл. инженер по материаловедению и термообработке (УГАТУ, 1979). Канд. техн. наук по материаловедению в машиностроении (ИПСМ РАН, 1999). Иссл. в обл. материаловедения, металлов и сплавов.