



УДК 669.017.15

DOI 10.17073/0368-0797-2025-1-69-75



Оригинальная статья

Original article

ПОСТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЛИКВИДУС ПЯТИКОМПОНЕНТНОЙ СХЕМЫ ДИАГРАММЫ Fe – B – Mn – C – Cr

Г. А. Казакевич[✉], А. Ю. Попов

Российский университет транспорта (Москва, 127994, ул. Образцова, 9, стр. 9)

✉ KazakevichG@mail.ru

Аннотация. Для построения поверхности ликвидус пятикомпонентной системы Fe–B–Mn–C–Cr применялась методика построения в традиционных координатах «температура – концентрация» схем многокомпонентных диаграмм ($n > 3$), основанием которых являются n -угольники с дивергентной координатной сеткой при $n > 4$. Выбор системы обусловлен необходимостью упрочнения поверхностей деталей, изготовленных из большого количества низколегированных сталей борированием. Критическими точками поверхности ликвидус являлись температуры плавления химических элементов сплава, боридов и эвтектик двойных диаграмм состояния, которые являются сторонами пятигранной призмы. Принимались во внимание также отдельные экспериментальные температуры плавления сталей и рассчитанные температуры плавления новых эвтектик, образующихся при взаимодействии эвтектик двойных диаграмм состояния. Последние определялись по правилу эвтектической реакции, предусматривающему использование при расчете только температур плавления исходных эвтектик. Одновременно определялся и фазовый состав многокомпонентных боридных эвтектик системы. Полученная поверхность ликвидус показывает температуру начала кристаллизации и фазовый состав слоя при проведении борирования из обмазок литейных форм для поверхностного упрочнения отливок. Рассчитанные температуры плавления эвтектик образуют поверхности солидус системы. В соответствии с концентрационными значениями элементов, и особенно бора, в системе образуются пять поверхностей солидус при 1571, 1451, 1394, 1105 и 978 °C. Данные температуры плавления эвтектик являются границами между диффузионным и диффузионно-кристаллизационным механизмами формирования борированных слоев в твердом и затвердевающем состояниях обрабатываемых поверхностей. Следовательно, они определяют механизм формирования борированных слоев, их фазовый состав, структурную морфологию и свойства.

Ключевые слова: поверхность ликвидус, пятикомпонентная система, расчет эвтектических температур, дивергентная сетка, диаграммы состояния, стали, борирование

Для цитирования: Казакевич Г.А., Попов А.Ю. Построение поверхности ликвидус пятикомпонентной схемы диаграммы Fe–B–Mn–C–Cr. Известия вузов. Черная металлургия. 2025;68(1):69–75. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-69-75>

CONSTRUCTION OF LIQUIDUS SURFACE OF Fe – B – Mn – C – Cr FIVE-COMPONENT DIAGRAM

G. A. Kazakevich[✉], A. Yu. Popov

Russian University of Transport (9, bld. 9 Obraztsova Str., Moscow 127994, Russian Federation)

✉ KazakevichG@mail.ru

Abstract. The authors used the technique of constructing the schemes of multicomponent diagrams ($n > 3$) in traditional coordinates “temperature – concentration”, the basis of which are n – angles with a divergent coordinate grid at $n > 4$, to construct the liquidus surface of the Fe–B–Mn–C–Cr five-component system. Choice of the system was determined by the need to harden the surfaces of parts made from a large number of low-alloy steels by boriding. The critical points of the liquidus surface were melting points of the alloy chemical elements, melting points of borides and melting temperatures of eutectics of the phase diagrams, which are the sides of a pentahedral prism. Individual experimental melting temperatures of the steels and calculated melting temperatures of new eutectics during the interaction of eutectics of double phase diagrams were also taken into account. The latter were determined according to the eutectic reaction rule, which provides for the use of only melting temperatures of the initial eutectics in the calculation. At the same time, phase composition of the multicomponent boride eutectics of the system was determined. The resulting liquidus surface shows the temperature at which crystallization begins and the phase composition of the layer during boriding of casting mold coatings for surface hardening of castings. The calculated melting temperatures of eutectics form the solidus surfaces of the system. In accordance with the concentration values of the elements, especially boron, five solidus surfaces are formed in the system at 1571, 1451, 1394, 1105 and 978 °C. These melting temperatures of eutectics are the boundaries between the diffusion and diffusion-crystallization mechanisms of formation of borated

layers in solid and solidifying states of treated surfaces, therefore, they determine the mechanism of formation of borated layers, their phase composition, structural morphology and properties.

Keywords: liquidus surface, five-component system, calculation of eutectic temperatures, divergent grid, phase diagram, steel, boriding

For citation: Kazakevich G.A., Popov A.Yu. Construction of liquidus surface of Fe–B–Mn–C–Cr five-component diagram. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(1):69–75. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-1-69-75>

ВВЕДЕНИЕ

Диаграммы состояния сплавов являются технологическим чертежом для теоретиков и практиков в области металлургии, металловедения, обработки металлов давлением, литейного производства, различных областей машиностроения и эксплуатации технических средств.

Принимая во внимание, что большинство используемых сталей и сплавов являются многокомпонентными ($n > 3$), во многих случаях возникают определенные сложности при определении условий выполнения технологических процессов, фазового состава и свойств сплавов, так как не имеется построенных диаграмм состояния в традиционных координатах температура – концентрация элементов [1 – 3]. Как правило, для описания процессов используют двух- и трехкомпонентные диаграммы, их изотермические сечения, тетраэдры для определенной температуры и/или результаты практических исследований [4 – 6].

В частности, для описания процесса борирования и свойств получаемых слоев нашли применение двух- и трехкомпонентные диаграммы [7 – 9], в которых уточняются концентрации соединений и твердых растворов, температуры превращений, обнаруживаются новые соединения. Определенное значение имеет установленный факт существования борокарбида железа [8; 9]. Он отвечает формуле $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$. В других сложных карбидах, встречающихся в сталях, легирующий элемент обычно замещает железо.

Установлено, что при 1000 °С до 80 % углерода в цементите может быть заменено бором и формула принимает вид $\text{Fe}_3\text{C}_{0,2}\text{B}_{0,8}$. В этом случае изменяется период кристаллической решетки: происходит сжатие по осям a и c и расширение вдоль оси b орторомбической решетки. При этом замечено, что с увеличением содержания бора происходит увеличение магнитного момента насыщения и температуры точки Кюри. Этот факт важен при объяснении свойств борированных деталей, в которых под слоем боридов образуются борокарбидные включения [10; 11].

В работе [8] установлено, что борокарбид $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ изоморфен с кубическим карбидом хрома Cr_{23}C_6 (тип структур – $d84$). При переходе от обогащенного углеродом соединения к обогащенному бором период решетки a изменяется от 1,0594 до 1,0628 нм, а при нагреве от 800 °С $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ плавится конгруэнтно. Из работы, в которой приведены изотермические сечения при температурах 700, 800, 900 и 1000 °С видно, что фаза $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ имеет состав, соответствующий

формуле $\text{Fe}_{23}(\text{C}_{0,73}\text{B}_{0,27})_6$ и она находится в равновесии с бороцементитом $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ и Fe_α . Фаза $\text{Fe}_{23}(\text{C}_{0,44}\text{B}_{0,56})_6$ находится в равновесии с Fe_2B и $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$. Из анализа сечения при 800 °С следует, что фаза $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ присутствует в большем диапазоне содержания углерода и бора: между $\text{Fe}_{23}(\text{C}_{0,38}\text{B}_{0,62})_6$ и $\text{Fe}_{23}(\text{C}_{0,77}\text{B}_{0,23})_6$ и находится в равновесии с фазами Fe_γ и $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$. Установлено, что борокарбид $\text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ устойчив до температуры 965 ± 5 °С [12 – 14]. Полученные результаты уточняют фазовый состав областей диаграмм и свойства получаемых борированных слоев, так как борокарбидные включения обладают высокой твердостью [15 – 17].

В области поиска решений построения многокомпонентных диаграмм ($n > 3$) следует отметить термодинамический метод, учитывающий особенности бинарных диаграмм состояния [18]. В частности, построена диаграмма фазового строения четырехкомпонентной системы Fe–Mn–Si–C путем расчета термодинамических констант при температуре фазовых превращений соединений с последующей триангуляцией системы и подсистем. В результате получена диаграмма фазового строения в виде тетраэдра, состоящая из 16 элементарных тетраэдров, содержащих конгруэнтно и инконгруэнтно плавящиеся соединения [19].

Предложенный ранее метод Букке-Шоута [20] приводит к получению тетрады, изображающей состав или состояние системы на плоскости, хотя и исходит из четырехмерной фигуры. Рассмотренные в работах [21; 22] системы создают геометрическое изображение составов многокомпонентных систем на плоскости и мало приемлемы для практического использования. Пути совершенствования общего подхода, рассмотренные в работах [23; 24], способствуют получению не самих рабочих диаграмм, а системы плоских проекций после двойного проектирования, которые также затруднительно использовать в качестве рабочего чертежа при разработке технологических процессов.

При определении температур эвтектических реакций и составов эвтектических сплавов обычно применяли дифференциальную сканирующую калориметрию [25; 26], металлографические исследования [27; 28] и рентгеновскую дифракцию [29]. Эти методы достаточно трудоемки, поэтому в последнее время для предиктивного расчета рассматриваемых характеристик нашли применение аналитические и статистические подходы.

В частности, предложена статистическая методика расчета эвтектических температур и концентраций для

металлических многокомпонентных систем ($n > 3$), исходными данными которой являются только температуры плавления компонентов, входящих в эвтектику или рассчитанные температуры плавления эвтектик при их взаимодействии. При этом в работе сформулировано температурное правило эвтектической реакции [30; 32].

Методика, предложенная в работе [32] на основе разработанного банка данных, включающая программы расчета и рекурсивного алгоритма, применима для простых систем, так как не учитывает возможность образования химических соединений в многокомпонентных системах, образования нескольких эвтектик в бинарных системах и образования твердых растворов. Этими же недостатками обладает и достаточно прогрессивная методика, учитывающая электрические заряды атомов и их взаимодействие [33]. В то же время, она значительно усложняет теоретическое обоснование и сам расчет.

Находит применение также метод расчета температур эвтектических и перитектических точек и составов двухкомпонентных систем с использованием аппроксимации зависимостей между этими характеристиками. Расчет производится с помощью дробно-линейных и степенных функций с учетом только температуры плавления компонентов [34] или путем применения линейной геометрии для расчета эвтектического состава бинарной системы при известных температурах плавления компонентов и эвтектики [35].

Одним из направлений построения схем многокомпонентных ($n > 3$) диаграмм состояний сплавов в традиционных координатах «температура – концентрация» является методика, предложенная в работах [36 – 38]. Она предусматривает использование «дивергентной координатной сетки Круковича» для расчета распределения элементов сплава по площади основания диаграммы – концентрационного n -угольника, количество вершин которого равно количеству химических элементов в сплаве. Сторонами многогранной призмы являются двухкомпонентные диаграммы состояний. Подобные диаграммы состояний названы «схемами диаграмм», так как на площади концентрационного многогранника отсутствует ряд сочетаний элементов сплава. В частности, нет сплавов с равным количеством трех элементов для четырехкомпонентной системы, четырех элементов для пятикомпонентной системы и т. д. Тем не менее, такие схемы весьма наглядны для использования в качестве технологического чертежа при анализе состояний сплава.

Таким образом, целью данной работы является построение поверхности ликвидус для многокомпонентной системы Fe–B–Mn–C–Cr с использованием рекомендаций [36 – 38] для определения температур насыщения и объяснения структурообразования при борировании в различном агрегатном состоянии обрабатываемых поверхностей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процессу борирования подвергают множество марок стали и сплавов, такие, как сталь 20, 40Х, 5ХНБ, 7Х3, Х12, 10Х13, 30ХГСА, У10 и др., для повышения их износостойкости. Для большого количества конструкционных сталей характерно сочетание элементов Fe–Mn–C–Cr. Детали из этих сталей подвергают борированию как в твердом агрегатном состоянии, так и из литейных форм в жидком состоянии, а также при частичном оплавлении упрочняемых поверхностей (при наличии жидкой и твердой фаз) при использовании концентрированных источников нагрева. В этих случаях важным является знание температур плавления с участием бора, тогда система принимает вид: Fe–Cr–Mn–C–B. Последовательность элементов выбирается произвольно.

Построение поверхности ликвидус схемы пятикомпонентной диаграммы системы Fe–B–Mn–C–Cr с выбранной последовательностью элементов проводилось путем анализа структурообразования двойных диаграмм состояний сплавов. При этом использовались экспериментальные критические точки ряда сплавов системы, а также рассчитанные температуры и концентрации эвтектических взаимодействий. В частности, при определении условий борирования легированных сталей и сплавов анализу подвергались как двойные и тройные диаграммы состояния, содержащие железо, так и двойные диаграммы, содержащие только легирующие элементы и бор. При этом для прогнозирования вида боридов и степени их легированности учитывались изоморфность кристаллических решеток боридов и растворимость боридов между собой. Следует предположить, что образование того или иного базового борида при насыщении сплавов бором будет зависеть от степени сродства элементов к бору и количества этого базового элемента в сплаве. Поэтому вид поверхности ликвидус в данном случае будет определяться концентрационным распределением бора.

Система Fe – Cr – B: при нагреве до 1000 °C в равновесии с γ -Fe находятся фазы α -Fe и Fe_2B ; в равновесии с α -фазой находятся γ -Fe, Fe_2B , Cr_2B , и Cr_4B . Фазы Fe_2B и особенно Cr_2B образуют широкие области твердых растворов [36]. Установлено, что в интервале температур борирования 700 – 1250 °C тройных фаз в этой системе не образуется.

Система Cr – Mn – B: при 800 °C установлено существование неограниченного ряда твердых растворов $(\text{Cr}, \text{Mn})\text{B}_2$, $(\text{Cr}, \text{Mn})_3\text{B}_4$ и между боридами Cr_2B и Mn_4B [36]. Степень взаимной растворимости боридов следующая: Cr_5B_3 растворяет 0,08 массовых долей борида Mn_5B_3 , а CrB – 0,20 массовых долей MnB ; MnB растворяет 0,4 массовых долей CrB .

При иной трактовке двойной диаграммы состояния системы Mn–B показано существование неограниченного ряда твердых растворов $(\text{Cr}, \text{Mn})_2\text{B}$ вместо

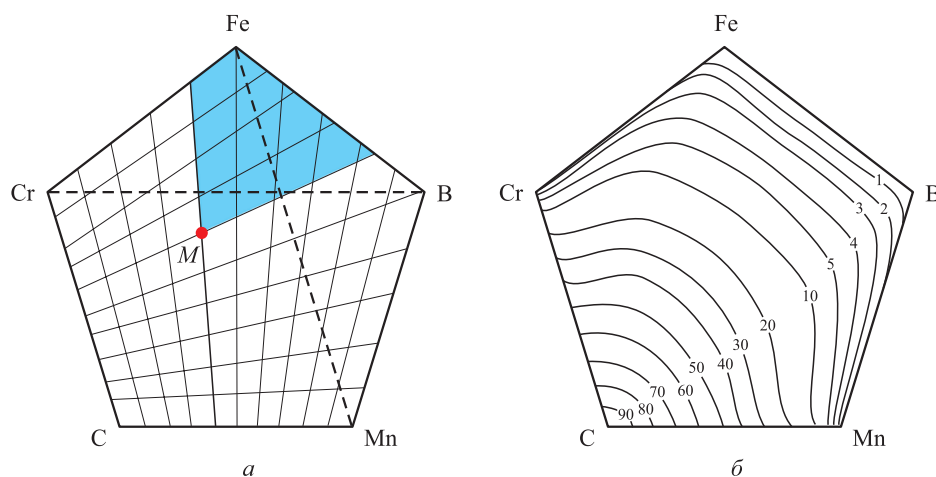


Рис. 1. Основание схемы пятикомпонентной диаграммы состояний с дивергентной сеткой координат (а) и концентрационное распределение углерода, мас. % (б) (трафарет распределения для любого элемента)

Fig. 1. Basis of the five-component phase diagram with a divergent coordinate grid (а) and concentration distribution of carbon in wt. % (б) (distribution stencil for any element)

$\text{Cr}_2\text{B}-\text{Mn}_4\text{B}$ при 1025°C . В исследовании [39] определены составы твердых растворов моноборидов хрома и марганца: $\text{Cr}_{0,46}\text{Mn}_{0,54}\text{B}$ и $\text{Mn}_{0,60}\text{Cr}_{0,40}\text{B}$. Область между твердыми растворами на основе CrB и MnB представляет собой борид $\text{Cr}_x\text{Mn}_{1-x}\text{B}$.

Следует учитывать также, что изоморфные бориды Fe и Mn (FeB и MnB , Fe_2B и Mn_2B) неограниченно растворимы друг в друге.

В соответствии с выбранной методикой построения схемы диаграммы каждый элемент рассматриваемой системы распределяется по объему пятигранной призмы от двух граней, а по площади основания (пятиугольника) от двух сторон. Например, углерод распределяется от сторон $\text{C}-\text{Cr}$ и $\text{C}-\text{Mn}$ (рис. 1). Концентрационное распределение любого элемента по площади пятиугольника, рассчитанное в соответствии с «дивергентной сеткой координат Круковича», оказывается неравномерным по его площади. Угол расхождения каждой координатной линии определялся по формуле

$$\alpha = \left(1 - \frac{4}{n}\right) \frac{180}{c},$$

где n – число компонентов в системе (сторон многоугольника); c – количество делений равномерной концентрационной шкалы.

В рассматриваемом случае угол расхождения каждой координатной линии от предыдущей составил $3,6^\circ$ при $c = 10$. Затемненная площадь, ограниченная координатными линиями (рис. 1), показывает содержание углерода в точке M , выраженное в процентах к площади пятиугольника. Эта площадь определялась геометрическим путем. Рассчитанное таким образом содержание в множестве точек позволяет провести изоконцентрационные линии по площади пятигранника,

которые в совокупности образуют трафарет распределения любого элемента.

Для определения содержания другого элемента в точке M (например, бора) трафарет поворачивают до совмещения 100 % с вершиной B (бора). Пересечение точки M с соответствующей изоконцентрационной линией и показывает его содержание (рис. 2). В соответствии с изоконцентрационной линией оно составляет 10 мас. %.

Поверхность ликвидус при выбранном расположении элементов образуется совокупностью критических точек: начала кристаллизации химических элементов и твердых растворов, температурами конгруэнтно плавящихся фаз, температурами плавления двойных эвтектик диаграмм состояния сплавов и их взаимодействия с образованием новых многокомпонентных эвтектик. Наблюдаемые два пика соответствуют образованию при этих концентрациях бора и хрома легированных бори-

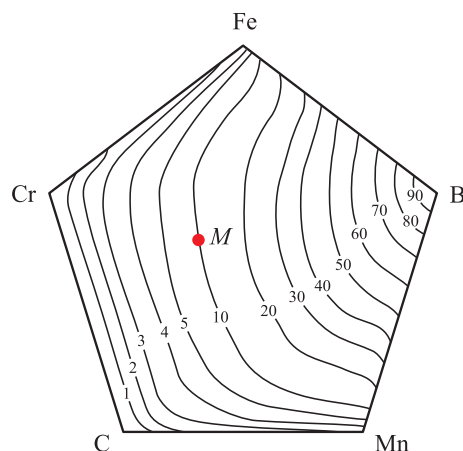


Рис. 2. Определение содержания бора в точке M

Fig. 2. Determination of boron content at point M

дов хрома (Cr, Fe, Mn)B (~2100 °C) и (Cr, Fe, Mn)B₂ (~2200 °C) (рис. 3).

При высоких концентрациях бора происходит взаимодействие высокотемпературных эвтектик двойных диаграмм состояний Fe–B и Mn–B с образованием новой эвтектической смеси FeB₂ + FeB₁₉ + Mn₃B₄ + MnB₂ + B(Mn) с рассчитанной температурой плавления 1571 °C. В присутствии достаточного количества хрома и концентрации бора в интервале 27,92 – 90,0 мас. % возможно образование эвтектики, содержащей (Fe, Mn)B₂ + FeB₁₉ + Mn₃B₄ + B(CrMn) + CrB₂ с рассчитанной температурой плавления 1394 °C.

В области концентраций бора, равных 16,25 – 27,92 мас. %, происходит взаимодействие эвтектик FeB + FeB₂ и Mn₂B + C с образованием эвтектической смеси (Fe, Mn)B + FeB₂ + Mn₂B с рассчитанной температурой плавления 1451 °C.

При концентрациях бора 0,01 – 10 мас. % в результате взаимодействия эвтектик γ-Fe – Fe₃B и δ-Mn + Mn₂B образуется новая эвтектическая смесь, содержащая γ-Fe + Fe₃B + δ-Mn + Mn₂B с рассчитанной температурой плавления 1105 °C, а при содержании хрома >40 мас. % возможно образование эвтектики (γ-Fe + Fe₃B + δ-Mn + Mn₂B) + Cr(B) + Cr₂B с температурой плавления 978 °C. Приведенные фазовые составы от взаимодействия эвтектик даны без учета растворимости боридов друг в друге.

Температуры существования конгруэнтно плавящихся боридов FeB, FeB₂, Mn₂B, Mn₃B₄, MnB, Mn₃B₄, MnB₂ и их взаимодействие не нанесены на поверхность ликвидус для лучшего восприятия. Температура поверхности ликвидус имеет важное значение при борировании отливок из литейных форм, на внутренние поверхности которых нанесена борированная обложка, и при предопределении фазового состава слоя.

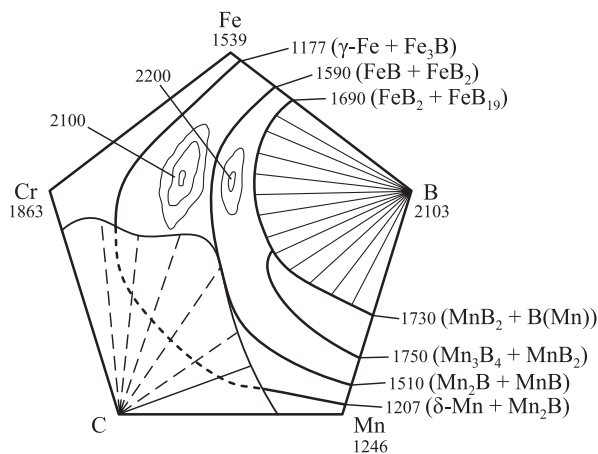


Рис. 3. Поверхность ликвидус системы Fe–B–Mn–C–Cr с обозначенными температурами, фазовым составом эвтектик и линиями их взаимодействия (вид сверху)

Fig. 3. Liquidus surface of the Fe–B–Mn–C–Cr system with indicated temperatures, phase composition of eutectics and lines of their interaction (top view)

Рассчитанные температуры плавления новых эвтектик образуют минимальные температуры начала плавления сплавов, т. е. температуры поверхности солидус. Она является границей формирования борированных слоев по диффузионному механизму в твердом агрегатном состоянии обрабатываемых поверхностей деталей и по диффузионно-кристаллизационному механизму в затвердевающем состоянии поверхностей.

Эвтектические температуры рассчитывались в соответствии с правилом эвтектических реакций Круквича [17; 30; 31; 36 – 38; 40] по формулам:

– для четного числа компонентов (2n) эвтектики

$$T_{\text{эвт}} = K_{\text{эвт}}^{n/2} \sum_{i=1}^n T_i;$$

– для нечетного числа компонентов (2n + 1)

$$T_{\text{эвт}} = K_{\text{эвт}}^{\frac{n+1}{2}} \sum_{i=1}^{n-1} T_i + K_{\text{эвт}} T_n;$$

$$K_{\text{эвт}} = 0,497 \exp(-0,2657 X);$$

$$X = \frac{\sum_{1 \leq i \leq j \leq n} |T_i - T_j|}{\left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^{0,74}},$$

где T – температуры плавления фаз, входящих в эвтектику, или температуры двойных (тройных) эвтектических взаимодействий как элементов новой эвтектики, K ; $K_{\text{эвт}}$ – коэффициент эвтектической температуры; X – масштабный температурный параметр.

В соответствии с правилом эвтектических реакций при расчете эвтектической температуры новой эвтектики применялись температуры плавления бинарных эвтектик или уже рассчитанных, компоненты которых и являлись компонентами новых эвтектических смесей.

Фазовый состав, структурная морфология и свойства получаемых борированных слоев определяются содержанием легирующих элементов в стали, температурой насыщения и насыщающей способностью среды. В частности, при борировании стали 40X, содержащей 0,36 – 0,44 % C, 0,17 – 0,27 % Si, 0,5 – 0,8 % Mn и 0,8 – 1,1 % Cr, при температуре насыщения 950 °C в борированной смеси, обеспечивающей концентрацию бора ~17 %, образуются слои на основе легированных боридов (Fe, Cr)B + (Fe, Cr, Mn)₂B. При превышении температуры плавления формируются слои с гетерогенной структурой, в которой дисперсные легированные бориды располагаются в α-твердом растворе.

Выводы

Дивергентная концентрационная сетка позволила определить распределение каждого элемента по объему

пятигранной призмы путем построения концентрационного трафарета.

Применяя правило эвтектических реакций, рассчитаны эвтектические температуры и определен фазовый состав взаимодействующих эвтектик в системе Fe–B–Mn–C–Cr.

Определение закономерностей структурообразования при борировании в жидком, кристаллизующемся или твердом состояниях обрабатываемых поверхностей рекомендуется проводить с использованием построенной поверхности ликвидус для схемы пятикомпонентной диаграммы состояний системы Fe–B–Mn–C–Cr и рассчитанных температур плавления эвтектик, образующих поверхность солидус системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для вузов. Москва: Машиностроение; 1990:528.
2. Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем: Учебное пособие для вузов. Москва: Металлургия; 1990:240.
3. Campbell F.C. Phase Diagrams – Understanding the Basics. Materials Park, Ohio: ASM International; 2012:470.
4. Воздвиженский В.М. Прогноз двойных диаграмм состояния. Москва: Металлургия; 1975:224.
5. Massalski T.B. Binary Alloy. Phase Diagrams. 2nd ed. Vol. 3. ASM International; 1990:525.
6. Baker H. Introduction to Alloy Phase Diagrams: ASM Handbook. Vol. 3. ASM International; 1992:490.
7. Busby P.E., Warga M.E., Wells C. Diffusion and solubility of boron in iron and steel. *JOM*. 1953;(5):1463–1468. <https://doi.org/10.1007/BF03397637>
8. Carroll K.G., Darken L.S., Filer E.W., Zwell L. A new iron borocarbide. *Nature*. 1954;174:978–979. <https://doi.org/10.1038/174978a0>
9. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугунах и сталях / Пер. с англ. В.А. Мчедlishvili и В.В. Ховрина; под ред. С.М. Винарова. Москва: Металлургиздат; 1961:459.
10. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С., Панич Г.Г., Протасевич Г.Ф. Структура сплавов системы Fe–B. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1970;(9):14–17. Voroshnin L.G., Lyakhovich L.S., Panich G.G., Protasevich G.F. Structure of alloys of the Fe-B system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1970;(9):14–17. (In Russ.).
11. Койфман И.С. и др. Рентгенографический анализ борцементита. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1969;(2):59–60. Koifman I.S., etc. X-ray analysis of boron cementite. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1969;(2):59–60. (In Russ.).
12. Stadelmaier H.H., Gregg R.A. Die Ternare Phase Fe₂₃C₃B₃ im Dreistoffsystem Eisen-Kohlenstoff-Bor. *Metall*. 1963; 17(5):412–414. (In Germ.).
13. Cameron T.B., Morral J.E. The solubility of carbon in iron. *Metallurgical Translations A*. 1986;17(8):1481–1483. <https://doi.org/10.1007/bf02650132>
14. Borlera Lucco M., Pradelli G. Iron-boron-carbon ratio system. *La Metallurgia Italiana*. 1967;59(11):907–916.
15. Самсонов Г.В., Уманский Л.С. Твердые соединения тугоплавких металлов. Москва: Металлургиздат; 1957:265.
16. Villars P., Prince A., Okamoto H. Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams. ASM International; 1994:1500.
17. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity of Boronized Layers. Springer Series in Materials Science. Vol. 237. Springer International Publishing Switzerland; 2016:364. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40012-9>
18. Процюк А.П., Карапет'янц М.Х. О термодинамическом исследовании процессов в многокомпонентных системах. *Журнал прикладной химии*. 1977;50(1):169–171. Protsyuk A.P., Karapet'yants M.Kh. On the thermodynamic study of processes in multicomponent systems. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 1977;50(1):169–171. (In Russ.).
19. Габдулин С.Т., Байсанов С., Толеукадыр Р.Т. Построение диаграммы состояния системы Fe – Mn – Si – C для определения фазового состава марганцевых ферросплавов. *Труды университета: Сборник трудов Карагандинского государственного университета*. Караганда; 2020;(1(78)):38–43. Gabdulín S.T., Baisanov S., Toleukadyr R.T. Constructing a phase diagram of the Fe – Mn – Si – C system to determine the phase composition of manganese ferroalloys. *Proceedings of the University: Karaganda State University*. Karaganda; 2020;(1(78)):38–43. (In Russ.).
20. Аносов В.Я., Озерова М.И., Фиалков Ю.Я. Основы физико-химического анализа. Москва: Наука; 1976:503.
21. Лодочников В.Н. Простейшие методы изображения многокомпонентных систем. *Известия института физико-химического анализа*. 1924;2(2):255–351. Lodochnikov V.N. The simplest methods for representation multicomponent systems. *Izvestiya instituta fiziko-khimicheskogo analiza*. 1924;2(2):255–351. (In Russ.).
22. Радищев В.П. Метод изображения многокомпонентных систем. *Известия сектора физико-химического анализа АН СССР*. 1936;(9):203–219. Radishchev V.P. Method for depicting multicomponent systems. *Izvestiya sektora fiziko-khimicheskogo analiza AN SSSR*. 1936;(9):203–219. (In Russ.).
23. Радищев В.П. Методы изображения многокомпонентных диаграмм. *Известия сектора физико-химического анализа АН СССР*. 1938;(11):5–20. Radishchev V.P. Methods for displaying multi-component diagrams. *Izvestiya sektora fiziko-khimicheskogo analiza AN SSSR*. 1938;(11):5–20. (In Russ.).
24. Петров Д.А. Диаграмма состояния пятикомпонентной эвтектической системы в координатах трехмерной проекции пентатопы. В кн.: *Диаграммы состояния металлических систем: Сборник трудов*. Москва: Наука; 1981: 35–45.
25. Ding M.X.U.K., Jow T. Phase diagram of EC-DMC binary system and enthalpic determination of its eutectic composition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2000;61(1):177–186. <https://doi.org/10.1023/A:1010175114578>
26. Ramkumer K.L., Saxena M.K., Deb S.B. Experimental evaluation of procedures for heat capacity measurements by differential scanning calorimetry. *Journal of Thermal Analysis*

- and Calorimetry. 2001;66(2):387–397.
<https://doi.org/10.1023/A:1013126414406>
27. Li S.-P., Zhao S.-X., Pan M.-X., Zhao D.-Q., Chen X.-C., Barabash O.M. Eutectic reaction and microstructural characteristics of Al(Li)–Mg2Si alloys. *Journal of Materials Science*. 2001;36(6):1569–1575.
<https://doi.org/10.1023/A:1017525520066>
 28. Lewis D., Allen S., Notis M., Scotch A. Determination of the eutectic structure in the Al–Cu–Sn system. *Journal of Electronic Material*. 2002;31(2):161–167.
<https://doi.org/10.1007/s11664-002-0163-y>
 29. Luo Ch.H., Martin M. Investigation of the phase diagram end the defect structure of non stoichiometric Li – Mn – O spiral. In: *Proceedings of the European Material Research Society Spring Meeting, May 24 – 28. Strasbourg*. 2004:28–32.
 30. Крукович М.Г. Расчет эвтектической температуры и концентрации в многокомпонентных системах. Московский государственный университет путей сообщения. Депонирована в Всероссийском институте научной и технической информации, 15.12.93, № 3078 – В95. Москва; 1993:10.
 31. Крукович М.Г. Расчет эвтектических концентраций и температуры в двух- и многокомпонентных системах. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005;(10):9–17.
Krukovich M.G. Calculation of eutectic temperature and concentration in multicomponent systems. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2005;(10):9–17. (In Russ.).
 32. Ганиев А.А., Халиков А.Р., Кабиров Р.Р. Разработка методики расчета эвтектических концентраций и температур диаграмм состояния. *Машиностроение. Металловедение и термическая обработка металлов. Вестник Уфимского государственного авиационного университета*. 2008;11(2):116–122.
Ganiev A.A., Khalikov A.R., Kabirov R.R. The development of calculation methods of concentrations and state diagram temperatures. *Mashinostroyeniye. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. Vestnik Ufmskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo universiteta*. 2008;11(2):116–122. (In Russ.).
 33. Халиков А.Р. Моделирование эвтектических концентраций многокомпонентных диаграмм состояния. *Машиностроение. Вестник Уфимского государственного авиационного университета*. 2010;14(2):188–194.
Khalikov A.R. Modelling of eutectic concentrations of multicomponent constitution diagrams. *Mashinostroyeniye. Vestnik Ufmskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo universiteta*. 2010;14(2):188–194. (In Russ.).
 34. Егорова Г.Ф., Афанасьева О.С., Кайдалова Л.В. Расчет состава и температур перитектик двухкомпонентных систем по известным температурам плавления. В кн.: *Математическое моделирование и краевые задачи. Материалы XI Всероссийской научной конференции (27–30 мая 2019 г., Самара, РФ). Т. 1*. Самара: СамГТУ; 2019:264–270.
 35. Amuda M.O.H., Akabekwa R.O. Estimating the eutectic composition of simple binary alloy system using linear geometry. *Leonardo Journal of Sciences*. 2008;12:232–242.
 36. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. Москва: ФИЗМАТЛИТ; 2010:384.
 37. Krukovich M.G. Technology to improve the performance properties of heterogeneous boronized layers. *Materials Performance and Characterization*. 2020;9(3):329–338.
<https://doi.org/10.1520/MPC20190091>
 38. Крукович М.Г., Бадерко Е.А., Казакевич Г.А. Моделирование закономерностей роста борированных слоев при нагреве ТВЧ. *Новые материалы и технологии в машиностроении: Сборник трудов*. 2023;38:41–45.
Krukovich M.G., Baderko E.A., Kazakevich G.A. Modeling the patterns of growth of borated layers when heated by high-frequency current. In: *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering: Proceedings*. 2023;38:41–45. (In Russ.).
 39. Pradelli G., Gianoglio C. Equilibri allo stato solido nel sistema cromo-manganese-boro. *La Metallurgia Italiana*. 1976;68(4):191–194. (In It.).
 40. Krukovich M.G. Computation of eutectic concentrations and temperature in two-component and multicomponent systems. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005;47:447–454.
<https://doi.org/10.1007/s11041-006-0009-y>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Григорий Алексеевич Казакевич, аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», Российский университет транспорта

ORCID: 0009-0007-1542-979X

E-mail: KazakevichG@mail.ru

Алексей Юрьевич Попов, к.т.н., доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», Российский университет транспорта

ORCID: 0000-0002-3397-9484

E-mail: madrat@inbox.ru

Grigorii A. Kazakevich, Postgraduate of the Chair “Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock”, Russian University of Transport

ORCID: 0009-0007-1542-979X

E-mail: KazakevichG@mail.ru

Aleksei Yu. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock”, Russian University of Transport

ORCID: 0000-0002-3397-9484

E-mail: madrat@inbox.ru

Поступила в редакцию 09.07.2024

После доработки 02.09.2024

Принята к публикации 29.10.2024

Received 09.07.2024

Revised 02.09.2024

Accepted 29.10.2024