

ISSN 2091-5527  
№ 4/2025

O'zbekiston

# **K**ompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Узбекский научно-технический и производственный журнал  
**Композиционные материалы**

УДК. 621.74; 621.785

## КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ БОРИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ОТЛИВКИ

Бекмурзаев Н.Х.

*Ташкентский государственный транспортный университет*

**Аннотация.** В статье на основе существующих научных источников и экспериментальных данных предложена новая модель кинетики формирования борированного покрытия на поверхности стальных отливок. Исследование механизма формирования борированного слоя на рабочей поверхности отливки выполнено с учётом теплофизических закономерностей и диффузионных процессов. Раскрыт поэтапный механизм образования фаз в борированном покрытии: твёрдый раствор бора в  $\gamma$ -Fe и в  $\alpha$ -Fe, формирование боридной эвтектики, а также боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B.

**Ключевые слова:** температура, газовая фаза, диффузия, температурный градиент, химический потенциал, твёрдый раствор, бориды, боридная эвтектика, кристаллизация, твёрдая корка, борированное покрытие.

**Введение.** Борированные покрытия отличаются высокой твёрдостью, износостойкостью (особенно в абразивной среде), коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Поэтому они широко применяются для упрочнения рабочих поверхностей деталей в различных отраслях промышленности — машиностроении, нефтяной промышленности, горнодобывающей отрасли, автомобилестроении, сельском хозяйстве и дорожном машиностроении. Создание борированных покрытий на поверхности деталей позволяет увеличить срок их службы в несколько раз [1-3].

Помимо метода химико-термической обработки, в настоящее время разработан ряд способов создания борированных покрытий на поверхности деталей, таких как плазменный, лазерный, электронно-лучевой, термоциклический и легирование в процессе литья [3-5].

Среди перечисленных методов борирование поверхности детали непосредственно в процессе литья обладает рядом преимуществ. В частности, данный метод является энергосберегающим, формируемое покрытие отличается значительной толщиной, низкой долей хрупких фаз и минимальными внутренними напряжениями и пластичностью [2,6,7]. Борсодержащая легирующая смесь наносится на поверхность формы различными способами: в порошковой среде, распылением легирующей смеси, окунанием, а также методом «пасты». Среди них наиболее перспективным считается нанесение пасты из легирующей смеси на рабочую поверхность модели из газифицируемого пенополистирола, поскольку данный метод обеспечивает локальное борирование рабочих поверхностей отливки и отличается экономичностью.

**Объект исследования.** Исследование кинетики формирования борированного покрытия на поверхности стальной отливки.

**Методы исследования.** Работа основана на анализе и обобщении литературных источников, данных проведённых экспериментов, а также на сравнении известных теоретических моделей.

**Результаты исследования и их анализ.** При заливке жидкого металла в форму на поверхности отливки, покрытой пастой, формируется легированное борированное покрытие за счёт тепла, выделяющегося при кристаллизации металла.

Физико-механические свойства сформированного на поверхности отливки борированного покрытия напрямую зависят от механизма его образования. Поэтому изучение и анализ механизма формирования борированного слоя, возникающего в процессе получения отливки, имеют важное значение для прогнозирования толщины легированного покрытия, управления его качеством, оптимизации процесса и достижения высокой эффективности в производстве.

С целью объяснения кинетики формирования борированного покрытия на поверхности отливки выдвигается следующая теоретическая модель. Залитый в форму жидкий металл вступает в непосредственный контакт с борсодержащей легирующей пастой, находящейся при комнатной температуре. При соприкосновении высокотемпературного жидкого металла с пастой, имеющей температуру окружающей среды, между ними возникает значительный температурный градиент. В течение короткого времени температура поверхности отливки резко снижается, а температура легирующей пасты - возрастает. В результате на поверхности отливки начинается кристаллизация и образуется твёрдая оболочка (рис. 1, а).

Под воздействием тепла, выделяющегося при кристаллизации расплава, температура борсодержащей легирующей пасты на поверхности отливки резко повышается, в результате чего в её составе происходит диссоциация карбида бора ( $B_4C$ ) на атомы бора и углерода:  $B_4C \rightarrow 4B + C$ , что соответствует первой стадии процесса борирования.

На второй стадии активные атомы бора из реакционной газовой фазы при высокой температуре и значительном химическом потенциале интенсивно адсорбируются (поглощаются) поверхностью отливки, в результате чего формируется сложная система  $Fe-B-C$ . Процесс массопереноса атомов из реакционной газовой среды на поверхность отливки протекает тем интенсивнее, чем выше температура и чем больше разность химического потенциала.

Массоперенос насыщающих компонентов из реакционной среды на поверхность детали осуществляется не только за счёт диффузии, но и посредством конвекции. Кроме того, процесс химико-термической обработки может быть интенсифицирован путём создания принудительной циркуляции в специальной установке для химико-термической обработки [7-10].

На третьем этапе адсорбированные на поверхности отливки атомы бора инициируют процесс диффузионного проникновения вглубь металлической матрицы. В результате в приповерхностном субмолекулярном слое отливки концентрация атомов бора резко возрастает. Скорость и глубина проникновения бора зависят от температуры диффузии, химического потенциала и продолжительность процесса. Чем выше температура диффузии, чем толще отливки и чем значительнее химический потенциал газовой фазы, образующейся на поверхности отливки, тем интенсивнее протекает процесс внедрения атомов бора в поверхность металла.

Как известно, что бор растворяется в различных модификациях железа в разном количестве. Растворимость бора  $\delta$ -Fe при температуре 1381 °C составляет 0,15 %, в  $\gamma$ -Fe при 906 °C — 0,008 %, а при 1149 °C — 0,021 %. Растворимость бора  $\alpha$ -Fe при температуре 710 °C составляет всего 0,0002 % [1, 2].

При высокотемпературном аустенитном состоянии, когда концентрация бора в приповерхностном субслое достигает 0,021 %, в  $\gamma$ -Fe образуется твёрдый раствор внедрения бора

(рис. 1, а). В то же время диффузионное поступление бора из высокотемпературной реакционной газовой фазы на поверхность отливки непрерывно растёт. В результате избыточные атомы бора в субслое вступают в химическое взаимодействие с железом, инициируя образование боридов железа. Повышения концентрации бора в микрообъеме приводит к образованию боридных кристаллов. Когда в микрообъеме приповерхностной зоны отливки концентрации бора достигает до 3,8 % в данном микрообъеме формируются пластинчатый диборид  $Fe_2B$  и твёрдый раствор бора в  $\gamma$ -Fe, которые совместно формируют доэвтектический боридный слой ( $\gamma$ -Fe +  $Fe_2B$ ) (рис. 1, б).

Поскольку диффузия бора в сформированный доэвтектический слой продолжается, он дополнительно насыщается извне бором и со временем трансформируется в полужидкую эвтектическую смесь  $Fe_2B + \gamma$ -Fe. При достижении в отдельных микрообъемах эвтектического слоя концентрации бора 8,34 % начинают выделяться кристаллиты диборида  $Fe_2B$ . По мере дальнейшего поступления бора к образовавшимся кристаллитам они начинают расти, причём рост кристаллов в виде дендритов будет направлен вглубь отливки, тогда как междендритное пространство будет заполняться боридной эвтектикой например,  $Fe_2B + Fe_3(B,C)$  или  $Fe_2B + Fe_3C$ .

Активные атомы бора, поступающие из газовой фазы под воздействием высокой температуры и химического потенциала, насыщают кристаллы диборида  $Fe_2B$ . При достижении концентрации бора 16,25 %, соответствующей бориду железа, диборид  $Fe_2B$  превращается в кристаллы моноборида  $FeB$  (рис. 1, в).

Под слоями моноборида  $FeB$  формируются слои диборида  $Fe_2B$  (рис. 1, в). В то же время под воздействием высокой температуры и химического потенциала боридные фазы железа ( $FeB$  и  $Fe_2B$ ) продолжают насыщаться атомами бора, часть которых одновременно начинает покидать их кристаллическую решётку. Высвобождающиеся атомы бора диффундируют вглубь отливки, способствуя расширению области эвтектики  $Fe_2B + \gamma$ -Fe. Кроме того, вследствие активной диффузии бора в эвтектическом слое последовательно формируются новые фазы диборида  $Fe_2B$ , а под ними — слои типа  $Fe_2B +$  боридная эвтектика, боридная эвтектика +  $Fe_2B$ , а также  $\gamma$ -Fe +  $Fe_2B$  (доэвтектический слой).

а)	В результате диссоциации карбида бора на поверхности отливки образуется боронасыщенная газовая фаза. В наиболее приповерхностном субслое твёрдой оболочки формируется твёрдый раствор внедрения бора в $\gamma$ -Fe.	<p>Песчаная форма   Леггирующая паста   Газовая фаза   Твёрдый раствор В в <math>\gamma</math>-Fe   Твёрдая корка   Расплав</p>
б)	На поверхности отливки формируются доэвтектический боридной слою $\gamma$ -Fe + Fe <sub>2</sub> B и полужидкий эвтектический слой Fe <sub>2</sub> B + $\gamma$ -Fe, а также твёрдый раствор бора в $\gamma$ -Fe.	<p>Песчаная форма   Леггирующая паста   Газовая фаза   Fe<sub>2</sub>B + <math>\gamma</math>-Fe (эвтектика)   <math>\gamma</math>-Fe + Fe<sub>2</sub>B (до эвтектики)   Твёрдый раствор В в <math>\gamma</math>-Fe   Металлическая матрица</p>
в)	Формирование на поверхности отливки боридов FeB и Fe <sub>2</sub> B, эвтектики Fe <sub>2</sub> B + $\gamma$ -Fe и доэвтектических Fe <sub>2</sub> B + $\gamma$ -Fe слоев, а также твёрдый раствор бора в $\gamma$ -Fe.	<p>Песчаная форма   Леггирующая паста   Газовая фаза   FeB + эвтектика   (FeB + Fe<sub>2</sub>B) + эвтектика   Fe<sub>2</sub>B + эвтектика   Fe<sub>2</sub>B + <math>\gamma</math>-Fe (эвтектика)   <math>\gamma</math>-Fe + Fe<sub>2</sub>B (до эвтектики)   Твёрдый раствор В в <math>\gamma</math>-Fe   Металлическая матрица</p>
г)	Формирование боридных и бороцементитных фаз, а также перлитной зоны на поверхности отливки.	<p>Песчаная форма   Леггирующая паста   Газовая фаза   FeB + эвтектика   (Fe<sub>2</sub>B + FeB) + эвтектика   Fe<sub>2</sub>B + эвтектика   Fe<sub>2</sub>B + боридное эвтектика + Fe<sub>3</sub>(B,C)   Боридное эвтектика + Fe<sub>2</sub>B + Fe<sub>3</sub>(B,C)   Твёрдый раствор В в <math>\gamma</math>-Fe   Перлитный слой   Металлическая матрица</p>

Рис. 2. Кинетическая схема формирования борированного покрытия на поверхности стальной отливки

При описании кинетики формирования борированного покрытия на поверхности отливки важно отметить следующее. Формирование борированного слоя осуществляется в виде эстафетной последовательности, передаваемой матрице отливки: сначала образуется твёрдый раствор внедрения бора в  $\gamma$ -Fe, затем слой  $\gamma$ -Fe + Fe<sub>2</sub>B доэвтектического типа, далее эвтектическая смесь Fe<sub>2</sub>B +  $\gamma$ -Fe, после чего формируются кристаллы диборида Fe<sub>2</sub>B, затем соединения типа Fe<sub>2</sub>B + FeB и, наконец, химические соединения FeB (рис. 1, а, б, в). Атомы бора, покидающие высококонцентрированные кристаллы боридов Fe<sub>2</sub>B и FeB под воздействием высокой температуры, продолжают диффузионно насыщать нижележащие слои покрытия, способствуя формированию последующих фаз и расширяя область борирования.

При этом, активные атомы бора, диффузионно проникая вглубь борированного покрытия, вытесняют встречающиеся на пути атомы углерода в более глубокие слои отливки. В результате в нижележащих слоях покрытия

формируется сложная, углеродонасыщенная гетерогенная система Fe–B–C, которая приводит к образованию бороцементитов типа Fe<sub>2</sub>B + боридная эвтектика + Fe<sub>3</sub>(B,C), а также боридная эвтектика + Fe<sub>2</sub>B + Fe<sub>3</sub>(B,C) (рис. 1, г).

Как известно, что формирование борированного слоя на поверхности деталей в процессе химико-термической обработки начинается при температурах от 900 °С. Учитывая это, процесс диффузионного насыщения поверхности отливки атомами бора продолжается до тех пор, пока температура отливки не снизится до 900 °С. По мере снижения температуры все физико-химические процессы, характерные для трёх стадий борирования — диссоциация, адсорбция, диффузионное насыщение, а также кинетическая энергия и активность атомов бора — последовательно замедляются. При охлаждении отливки до 900 °С процесс диффузии бора в её поверхность полностью прекращается.

В стальной отливке, медленно остывающей внутри формы, при любой температуре выше 900 °С диффузионная зона обладает

аустенитной структурой, в которой концентрация бора находится в резко изменяющемся состоянии. В приповерхностных слоях содержание бора высоко за счёт фаз боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B, тогда как по мере продвижения внутрь покрытия оно резко снижается — в зонах боридной эвтектики и доэвтектических областях. В нижних слоях покрытия, особенно в за переходной зоны, концентрация бора будет минимальной.

При медленном охлаждении стальной отливки фазовые превращения, происходящие в её борированной поверхности, протекают в соответствии с диаграммой состояния Fe–B.

Согласно диаграмме состояния Fe–B, при содержании бора в пределах 0–3,8 % линия ликвидуса постепенно понижается от 1539 °C (0 % B) до эвтектической точки 1177 °C (3,8 % B). Выше линии ликвидуса сплав находится в жидком состоянии, а в области между линиями ликвидуса и эвтектики — в состоянии жидкая фаза + твёрдый раствор внедрения бора в  $\gamma$ -Fe. При содержании бора 3,8 % протекает эвтектическая реакция, в результате которой формируется эвтектическая структура, состоящая из твёрдого раствора внедрения бора в  $\gamma$ -Fe и боридов Fe<sub>2</sub>B.

При содержании бора 3,8–8,34 % в системе преимущественно присутствуют фазы Fe<sub>2</sub>B и  $\gamma$ -Fe, при этом при снижении температуры ниже 1387 °C из жидкой фазы непосредственно выделяется Fe<sub>2</sub>B. В интервале концентраций бора 8,43–16,25 % формируется интерметаллид моноборида FeB. При температуре 1407 °C в результате перитектической реакции из жидкой фазы и диборида выделяется моноборид:  $L + Fe_2B \rightarrow FeB$ .

При понижении температуры ниже 900 °C происходит полиморфное превращение  $\gamma$ -Fe  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe, и структура поверхности отливки, охлаждённой до комнатной температуры, состоит из  $\alpha$ -Fe и Fe<sub>2</sub>B. В процессе полиморфного превращения  $\gamma$ -Fe  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe выделившийся из  $\gamma$ -Fe избыточный бор дополнительно обогащает бориды и эвтектику бором.

**Выводы.** Борированное покрытие, сформировавшееся в процессе получения отливки, преимущественно состоит из боридной

эвтектики (Fe<sub>2</sub>B +  $\gamma$ -Fe и  $\gamma$ -Fe + Fe<sub>2</sub>B), боридов железа Fe<sub>2</sub>B и FeB, а также из сложных соединений — бороцементита Fe<sub>3</sub>(B,C). При этом бориды железа имеют дендритное строение, ориентированное от поверхности отливки в её глубину, а междендритное пространство заполняется боридной эвтектической смесью. Под слоями боридов располагается боридная эвтектика.

Механизм формирования борированного покрытия реализуется поэтапно, в виде эстафетной последовательности. На начальном этапе под действием высокой температуры заливаемого расплава карбид бора (B<sub>4</sub>C), входящий в состав боросодержащей смеси, диссоциирует на атомы бора и углерода, образуя на поверхности отливки боронасыщенную газовую фазу. Активные атомы бора из газовой фазы адсорбируются на поверхности металла.

Затем адсорбированные атомы бора под воздействием высокой температуры и значительного химического потенциала интенсивно диффундируют в металлическую матрицу. В результате на поверхности отливки формируется сначала мономолекулярный слой, представляющий собой твёрдый раствор внедрения бора в  $\gamma$ -Fe, затем доэвтектический слой ( $\gamma$ -Fe + Fe<sub>2</sub>B), а позднее эвтектический слой (Fe<sub>2</sub>B +  $\gamma$ -Fe). Продолжение процесса приводит к образованию кристаллов диборида Fe<sub>2</sub>B и их последующему дендритному росту. По мере протекания диффузионной реакции формируется двухфазная структура Fe<sub>2</sub>B + FeB, а при накоплении достаточного количества бора на поверхности образуются кристаллы моноборида FeB.

Процесс борирования на поверхности отливки активно продолжается до тех пор, пока её температура не снизится до 900 °C. При этом активные атомы бора, диффундируя в матрицу отливки, вытесняют атомы углерода в глубь металла. В результате в нижних, переходных слоях покрытия формируются сложные бороцементиты типа Fe<sub>2</sub>B + Fe<sub>3</sub>(B, C), а под покрытием может возникать углеродонасыщенный перлитный слой. Всё это в совокупности способствует увеличению толщины и повышению износостойкости борированного покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин, Л. Г. Теория и технология химико-термической обработки / Л. Г. Ворошнин, О. Л. Менделеева, В. А. Сметкин. - Москва: Новое знание, 2010. - 304 с.
2. Крукович, М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. - Москва: Физматлит, 2010. - 384 с.
3. Домбровский, Ю. М. Новые возможности поверхностного легирования стали в порошковых средах / Ю. М. Домбровский, М. С. Степанов // Вестник машиностроения. - 2015. - № 8. - С. 79–81.
4. Степанов, М. С. Теплофизический анализ и кинетика микродугового нагрева стали / М. С. Степанов, Ю. М. Домбровский, Л. В. Давидян // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2017. Т. 13, № 11 (155). — С. 511–516.

## СОДЕРЖАНИЕ

## 1. Химия и физикохимия композиционных материалов и нанокomпозитов

<b>Хурсанов А.Х., Негматов Ж.Н., Курбонов У.М., Негматова К.С., Негматов С.С., Абед Н.С., Икрамова М.Э., Рахимов Х.Ю.</b> Исследование и разработка эффективных составов композиционных химических флотореагентов-вспенивателей на основе органо-неорганических ингредиентов для применения в процессе флотации цветных и благородных руд .....	3
<b>Абед Ф.Ж.</b> Разработка методов качественного и количественного анализа действующих веществ фотоплёнок на основе жидкого экстракта Алоэ и метилурацила .....	9
<b>Самандаров Х.О., Вапаев М.Д., Собиров Ж.С., Ибадуллаев А.С., Тешабаева Э.У.</b> Эластомерная композиция наполненных кизилгия Ангрнского месторождения для машиностроения .....	13
<b>Алиева М.Т., Ихтиярова Г.А., Ганибекова М.Ф.</b> Органобентониты на основе хитозана <i>Apis Mellifera</i> для сорбции ионов переходных металлов .....	17
<b>Содикова М.А., Шомуротов Ш.А., Каримов А.</b> Полимерные композиты на основе фиброина шелка и полиальдегиддекстрана .....	21
<b>Шакарова Д.Ш.</b> Оптимальный процесс синтеза гибридного нанокomпозитного фиброин/кремнеземного адсорбента с применением золь-гель технологии .....	25
<b>Parpiyeva D.A., Doliyev G'.A., Mamajanov S.B.</b> Mahalliy xomashyolar asosida olingan surkov kompozitning fizik-kimyoviy tahlili .....	28
<b>Mardonqulov Sh.O'., Karimov K.A., Turaxodjayev N.J., Turahujayeva Sh.N.</b> Eritmadagi alyuminiy oksidi konsentratsiyasining haroratga bog'liqligini eksponensial modellashtirish .....	32
<b>Абдуллаева Г.А.</b> Синтез, структурная характеристика комплексов кадмия(II) на основе 2-меркаптобензиотиазола .....	34

## 2. Физико-механика и трибология композиционных материалов

<b>Негматов С.С., Абед Н.С., Намозов С.С., Саидкулов С.А., Жовлиев Ш.Х., Негматова К.С., Султанов С.У., Негматов Ж.Н.</b> Исследование коррозионностойкости и физико-механических свойств ненаполненных полимерных материалов и покрытий из них для применения в машинах, механизмах и оборудовании скважин нефтегазовой и металлургической промышленности .....	39
<b>Мардонакулов Ш.У., Каримов К.А., Турахужаева Ш.Н., Махмудов Ф.М., Носирходжаев И.А., Тураходжаев Н.Д.</b> Флюсы, применяемые для снижения окисления при плавке алюминиевых сплавов ....	42
<b>Mirzaraximov A.A., Komilov Q.O'., Kurbanova A.Dj., Muxamedov G'.I.</b> Modifikatsiyalangan karbamido-formaldegid oligomeri va fosfogips asosidagi kompozitsion materiallarning fizik-kimyoviy, mexanik va ekspluatatsion xossalari .....	44
<b>Негматов С.С., Холматов Э.А., Абед Н.С., Негматов Ж.Н., Косимов Ш.Б., Халимжанов Т.С.</b> Исследование физико-механических свойств физически модифицированных композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе .....	47
<b>Мухамедов А.А., Гузашвили К.В., Инагамов У.Ш.</b> Практические возможности получения термодиффузионных слоев хрома .....	51
<b>Turakhujaeva Sh.N., Sharipov K.A., Mardonakulov Sh.U., Karimov K.A., Turakhujaeva A.N.</b> The effect of modifiers on the melt during the smelting of aluminum alloys in gas furnaces .....	54
<b>Хасанов С.М., Ўнгбоев А.М.</b> Окисление конструкционных обрабатываемых материалов при их намагничивании .....	55
<b>Бекмурзаев Н.Х.</b> Кинетика формирования борированного покрытия на поверхности стальной отливки ...	58
<b>Казаков А.С., Исмадова Р.А., Амонов М.Р., Полатов Б.Б.</b> Изучение физико-механических показателей хлопчатобумажной пряжи, ошлихтованной полимерными композициями .....	62
<b>Каршиев М., Файзиев М.М.</b> Исследование объёмного износа деталей почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, полученных газопламенным напылением с последующим оплавлением ...	65