

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ ЗАЩИТНОЙ ПЛЕНКИ В ОБМАЗКАХ ДЛЯ ДИФфуЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ

С. Г. Иванов¹, А. М. Гурьев^{1, 2}, Т. Г. Иванова¹

¹ Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

В настоящей работе предпринята попытка оценить степень соответствия теоретических расчетов и практических результатов толщины боридного покрытия и коэффициента диффузии бора при химико-термической обработке низкоуглеродистой стали Ст3.

Ключевые слова: бор, упрочнение, диффузия, покрытие, сталь

PHYSIC-CHEMICAL PROCESSES IN THE GENERATION OF PROTECTIVE FILM OF DAUBING FOR DIFFUSION BORIDING STEELS

S. G. Ivanov¹, A. M. Guriev^{1, 2}, T. G. Ivanova¹

¹ Altai state technical university, Barnaul, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

In this paper we attempt to assess the degree of compliance with the theoretical calculations and practical results of the thickness of boride coatings and boron diffusivity during thermochemical treatment of low carbon steel St3.

Keywords: boron, hardening, diffusion, coating steel

Химико-термическая обработка (ХТО) является одним из распространенных способов повышения эксплуатационных показателей сталей, так как помимо структурных изменений, при ХТО изменяется и химический состав поверхностного слоя. Кроме того, в большинстве случаев возможно совмещение химико-термической и термической обработки.

Параметры процессов насыщения и составы насыщающих сред для процессов борирования в большинстве своем носят полуэмпирический характер, так как на настоящий момент недостаточно изучены как физические процессы захвата активированных атомов бора стальной поверхностью и последующей диффузии в ней, а также химико-физические процессы в насыщающей среде, приводящие к образованию активированных атомов бора. Кроме того, зачастую не определены оптимальные критерии процесса генерации активированных атомов бора в зависимости от технологических параметров и

химического состава упрочняемой стали, приводящие к формированию покрытий с заданным комплексом эксплуатационных свойств [1–4].

В настоящей работе приняты следующие допущения:

– процесс борирования протекает по диффузионному механизму;

– углерод стали не влияет на диффузию бора в силу относительно малого содержания его в стали;

– восходящая диффузия железа отсутствует.

При чисто диффузионном контроле процесса массопереноса бора к фронту реакции с учетом того, что весь поступающий бор расходуется на реакции, т. е. накопления свободного бора не происходит, можно записать следующее выражение [5, 6]:

$$\frac{dh}{d\tau} = k_d \cdot \frac{c_0}{h}, \quad (1)$$

где h – толщина диффузионного слоя;

τ – время процесса насыщения;
 k_d – коэффициент диффузии бора в диффузионном слое;

c_0 – концентрация атомарного бора на наружной поверхности слоя.

Формула для определения толщины диффузионного слоя при известном коэффициенте диффузии:

$$h = \sqrt{2k_d\tau} \quad (2)$$

Экспериментальные значения толщины слоя получены при следующих условиях: изотермическое насыщение из обмазки на основе карбида бора в камерной печи типа СНОЛ, оснащенной ПИД-контроллером «ТЕРМОДАТ 16Е-3. Состав насыщающей обмазки – карбид бора, фторид натрия, балластная добавка, температура и время насыщения – 950 °С, 2,5 ч (150 мин) [7–11]. Измерение прироста массы производили на лабораторных аналитических весах ВЛР-200 с погрешностью $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ г. Измерение толщины диффузионного

слоя выполняли на поперечных шлифах с помощью оптического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m». Измерения производили каждые 30 минут выдержки в интервале от 0 до 180 минут. Максимальное время насыщения, равное 180 минутам было выбрано, исходя из тех соображений, что после 150 минут (2,5 ч) высокотемпературной выдержки в борировующей смеси толщина слоя изменяется незначительно, в то время как на поверхности боридного слоя, состоящего из гемиборида железа Fe_2B , начинает формироваться нежелательная фаза моноборида железа FeB , обладающая низкими эксплуатационными свойствами. В каждой серии использовалось по 3 образца. Взвешивание каждого образца производили не менее 5 раз, затем считалось среднее значение, которое и принималось.

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные по диффузионному борированию стали Ст3

Номер серии	Время, мин	Исходный вес образца, г	Конечный вес образца, г	Изменение массы, г	Толщина слоя, мкм
1	0	13,5233	13,5233	0	0
2	30	13,9667	13,9734	0,0067	5
3	60	15,9312	15,9587	0,0275	20
4	90	14,6807	14,7149	0,0342	45
5	120	16,5063	16,5512	0,0449	80
6	150	16,143	16,1956	0,0526	110
7	180	18,2263	18,2891	0,0628	125

Известен также коэффициент диффузии бора в бориде железа при температуре 950 °С: $k_d = 1,82 \cdot 10^{-8}$ см²/с, в переходной зоне $1,53 \cdot 10^{-7}$ см²/с [12], исходя из которого по формуле (2) можно рассчитать толщину формирующегося диффузионного слоя. Данное значение коэффициента диффузии было получено при условии, что бор диффундирует по монокристаллу борида железа. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Толщина диффузионного слоя, измеренная экспериментально в среднем в 1,27 раза превышает расчетную величину, рассчитанную исходя из табличного значения коэффициента диффузии. Данное расхождение можно объяснить тем, что реальные стали имеют поликристаллическое строение, а, как извест-

но, диффузия по межкристаллитным границам значительно превышает диффузию по телу кристалла. Кроме того, сталь представляет железо со значительным количеством примесей и количеством дефектов кристаллического строения, значительно превышающим по сравнению с чистым железом.

При условии, что расчет ведется в тонких пленках (толщина пленок до 50 мкм [5, 11, 13, 14]), на начальном этапе процесса диффузии в рассматриваемой пленке концентрация бора в стали незначительна, диффузия бора при этом носит установившийся характер, то коэффициент диффузии можно рассчитать на исследованных этапах диффузионного насыщения. Результаты расчета сведены в таблицу 3.

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ ЗАЩИТНОЙ ПЛЕНКИ
В ОБМАЗКАХ ДЛЯ ДИФфуЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ**

Таблица 2 – Расчетная толщина боридного слоя

Номер серии	Коэффициент диффузии k_d , $\text{см}^2/\text{с}$	Время, мин	Толщина слоя, мкм	Отношение Эксп/Расч
1	$1,82 \cdot 10^{-8}$	0	0	0
2	$1,82 \cdot 10^{-8}$	30	8	0,62
3	$1,82 \cdot 10^{-8}$	60	20	1,02
4	$1,82 \cdot 10^{-8}$	90	34	1,34
5	$1,82 \cdot 10^{-8}$	120	50	1,61
6	$1,82 \cdot 10^{-8}$	150	68	1,62
7	$1,82 \cdot 10^{-8}$	180	88	1,43

Таблица 3 – Расчеты коэффициента диффузии бора по экспериментальным данным

Номер серии	Время, мин	Толщина слоя, мкм	Коэффициент диффузии k_d , $\text{см}^2/\text{с}$
1	0	0	$6,94444 \cdot 10^{-7}$
2	30	5	$2,22222 \cdot 10^{-7}$
3	60	20	$1,875 \cdot 10^{-7}$
4	90	45	$4,44444 \cdot 10^{-7}$
5	120	80	$6,72222 \cdot 10^{-7}$
6	150	110	$7,2338 \cdot 10^{-7}$
7	180	125	$6,94444 \cdot 10^{-7}$

Выводы:

1. Имеющиеся литературные данные не учитывают химический и структурный состав насыщаемой стали.

2. Имеющиеся в наличии модели применимы в большинстве своем к монокристаллическим материалам и не учитывают влияние межкристаллитных границ.

3. Экспериментальные данные по интегральному (включающие коэффициенты адсорбции, внутри- и межкристаллитной диффузии) показателю коэффициента диффузии бора в стали Ст3 на порядок превосходят приведенный в литературе коэффициент диффузии бора в бориде. И экспериментальные показатели коэффициента диффузии в реальных условиях приближаются к показателям чистого железа.

Список литературы

1. Лыгденов, Б. Д. Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей [Текст] / Б. Д. Лыгденов, А. М. Гурьев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 11. – С. 269.

2. Гурьев, А. М. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, И. А. Гармаева // Ползуновский вестник. – 2007. – № 3. – С. 28–34.

3. Ворошнин, Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов [Текст] / Л. Г. Ворошнин. Минск: Беларусь, 1981. – 205 с.

4. Иванов, С. Г. Особенности диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности стали Ст3 [Текст] / С. Г. Иванов, И. А. Гармаева, А. М. Гурьев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 86–88.

5. Гурьев, А. М. Физические основы химико-термоциклической обработки сталей [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, Н. А. Попова, Э. В. Козлов. – Барнаул, 2008. – 256 с.

6. Гурьев, А. М. Новые материалы и технологии для литых штампов [Текст] / А. М. Гурьев. – Барнаул, 2000.

7. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей [Текст]: пат. 2345175 Рос. Федерация, МПК / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденов, С. А. Земляков, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев. – №

2007112368/02; заявл. 03.04.07; опубл. 27.01.09. – Бюл. № 3.

8. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей [Текст]: пат. 2360031 Рос. Федерация: / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, С. А. Земляков, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев – № 2007127587/ 02: заявл. 18.07.2007: опубл. 27.06.2009. – Бюл. № 18.

9. Способ упрочнения стальных деталей [Текст]: пат. 2381299 Рос. Федерация. / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, Б. Д. Лыгденов. – №2008118705/02; заявл. 12.05.08; опубл. 10.02.10. – Бюл. № 4.

10. Способ изготовления и упрочнения деталей из чугунов и сталей [Текст]: пат. 2440869 Рос. Федерация. / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, С. А. Земляков, А. Д. Грешилов, А. Г. Иванов. – опубл. 10.11.2010.

11. Теория и практика получения литого инструмента. Гурьев А.М., Хараев Ю.П. Барнаул, 2005.

12. ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating. 1991 by ASM International Handbook Committee. Printed in the United States of America. ISBN 0-87170-379-3. – 2173 p.

13. Гурьев, А. М. Механизм образования боридных игл при диффузионном комплексном борхромировании из насыщающих обмазок [Текст] / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, А. Д. Грешилов, С. А. Земляков // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2011. – № 3. – С. 34-40.

14. Гурьев, А. М. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, Д. М. Махаров, В. И. Мосоров, Е. В. Черных, О. А. Гурьева, С. Г. Иванов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т. 2. – № 1. – С. 39-41.

Иванов Сергей Геннадьевич¹ – к.т.н., докторант
Гурьев Алексей Михайлович^{1,2} – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
Иванова Татьяна Геннадьевна¹ – аспирант

¹ ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай