

УДК 621.78.073:669.14

© 1991 г.

СИТКЕВИЧ М. В., ХУСИД Б. М., ТРУСОВ Б. Г.,  
ВОРОШНИН Л. Г., ХИНА Б. Б.**ГАЗОТРАНСПОРТНЫЕ ПРОЦЕССЫ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ  
В ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ АТМОСФЕРЕ ПРИ БОРИРОВАНИИ СТАЛЕЙ  
В ОБМАЗКАХ**

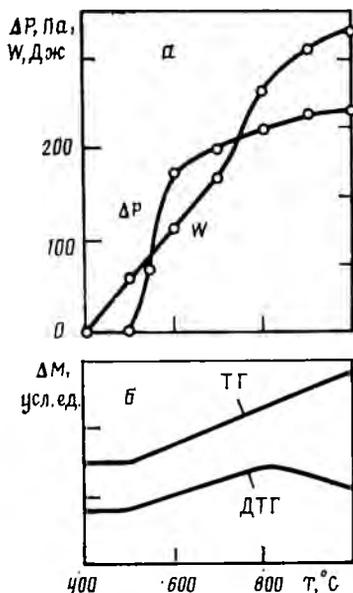
Экспериментально и с помощью термодинамических расчетов исследованы химическое взаимодействие и газотранспортный механизм доставки атомов бора к насыщаемой поверхности при диффузионном борировании сталей в обмазках. Изучено влияние состава обмазок, их химического взаимодействия с кислородом воздуха и газовой выделения на спекаемость и свойства обмазок и получаемых диффузионных слоев.

Диффузионное борирование поверхности сталей обеспечивает повышение коррозионной стойкости и износостойкости деталей машин и инструмента. В отличие от порошкового или электролизного борирования [1] насыщение из обмазок, наносимых тонким слоем (до 5 мм) на упрочняемую поверхность, не требует применения специального оборудования и оснастки [2]. Обмазки ряда составов<sup>1</sup> (например, 95%  $B_4C$ +5%  $NaF$ , связующее — вода) при температурах борирования (900–1050°С) изолируют поверхность изделия от окружающей среды и позволяют проводить насыщение в окислительной печной атмосфере. Однако высокая спекаемость таких обмазок затрудняет последующую очистку изделий и снижает качество поверхности. Наряду с процессами спекания, определяющими механические свойства обмазки, в процессе борирования протекают химические реакции между компонентами обмазки, обеспечивающие доставку атомов бора от источника (карбида бора) к насыщаемой поверхности. Как показано в работе [3] на примере спекания пористой порошковой композиции железо — карбид бора, определяющую роль играют газотранспортные процессы с участием летучих соединений бора. В связи с вышеизложенным целью работы являлось исследование структурообразования и химического взаимодействия, а также газотранспортных процессов в обмазках для борирования.

**Материалы и методика исследования.** В работе использовали обмазки двух составов: 93,1%  $B_4C$ +1,9%  $B_2O_3$ +5%  $NaF$  (обмазка I) и 55,8%  $B_4C$ +1,2%  $B_2O_3$ +25,43%  $FeO$ +12,57%  $Fe_2O_3$ +5%  $NaF$  (обмазка II). При изучении химического взаимодействия и структурообразования в обмазках смеси компонентов разбавляли водой до вязкотекучей консистенции и заливали в картонные формочки размером 2×2×3 см. Для проведения диффузионного борирования обмазку наносили слоем толщиной 5 мм на поверхность стали 45. Входящий в состав обмазок борный ангидрид содержится в техническом карбиде бора в количестве 2,0–2,2% (по данным химического анализа). Нагрев образцов в воздушной среде до температур процесса (900–1100°С) проводили со скоростью 15°С/с.

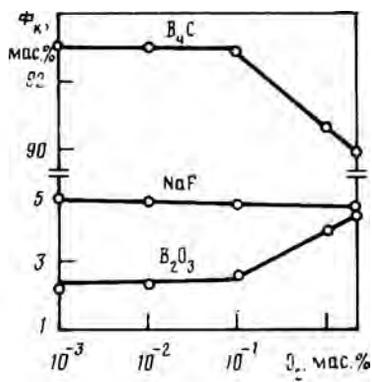
Фазовый состав и структуру обмазок исследовали рентгеновскими и металлографическими методами. Термогравиметрические исследования (ТГ и ДТГ) и дифференциальный термический анализ (ДТА) выполняли на дериватографе Q-1500D. Величину спекаемости оценивали работой выщипки обмазки из трубки диаметром 50 и длиной 50 мм после выдержки при температурах 900–1100°С в течение 8–120 мин. Для изучения газо-

<sup>1</sup> Здесь и ниже концентрации компонентов в мас. %.



Фиг. 1

Фиг. 1. Влияние температуры нагрева обломки I на работу выбивки смеси из трубки, избыточное давление газовой фазы (а) и изменение массы образца (б)



Фиг. 2

Фиг. 2. Зависимость равновесного содержания конденсированных фаз от доли кислорода в порошке при  $1000^{\circ}C$  для обломки состава I

выделения из обломки ее помещали в герметичный контейнер из жаростойкой стали с газоотводящей трубкой. Избыточное давление газовой фазы измеряли водяным манометром после нагрева до заданной температуры.

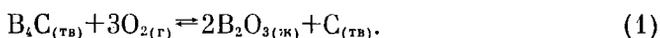
Для расчета равновесного состава продуктов химического взаимодействия применяли пакеты прикладных программ (ППП) АСГРА-3, который выполняет поиск локального максимума энтропии изолированной системы при заданных условиях (состав, объем, температура и т. д.) с использованием базы термодинамических данных [4]. Расчеты выполняли на ЭВМ ЕС-1036. Термодинамические характеристики соединения  $FeB$ , образующегося на поверхности стали при борировании, определяли по справочным данным [5].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Как показали результаты опытов (фиг. 1), увеличение массы образцов обломки I и работы выбивки смеси из трубки ( $W$ ) наблюдаются после нагрева в окислительной атмосфере при  $T > 450^{\circ}C$ , т. е. выше температуры плавления борного ангидрида. Так, при  $T = 400^{\circ}C$  происходит только испарение связующего (воды) и смесь свободно высыпается из трубки ( $W = 0$ ), а после нагрева при  $500^{\circ}C$  работа выбивки становится достаточно большой ( $W = 65$  Дж). Следовательно, спекание смеси I, содержащей технический карбид бора, обусловлено образованием расплава  $B_2O_3$ , который при последующем охлаждении затвердевает, связывая порошковые компоненты обломки в прочный каркас.

Прирост массы образцов I при  $T > 450^{\circ}C$  (фиг. 1) связан с увеличением доли  $B_2O_3$ , образующегося в результате окисления карбида бора в приповерхностных слоях обломки кислородом воздушной среды. Это приводит к формированию при  $T = 530-550^{\circ}C$  жидкого борного ангидрида на поверхности обломки. При  $T > 550^{\circ}C$ , т. е. после образования сплошной пленки расплава  $B_2O_3$ , в обломке возникает избыточное давление газовой фазы (фиг. 1). Величина избыточного давления достигает 300 Па при  $T = 900^{\circ}C$  и времени выдержки  $\tau = 8-10$  мин и практически не уменьшается при  $\tau = 2-4$  ч. Толщина пленки жидкого  $B_2O_3$  на поверхности при  $T = 900^{\circ}C$  и  $\tau = 4$  ч составляет 80 мкм, а работа выбивки  $W = 230$  Дж при

$\tau=8$  мин и почти не возрастает со временем. Установлено, что после отжига при  $T=900^\circ\text{C}$  и  $\tau=4$  ч в структуре обмазки имеется открытая пористость (не менее 15%). Наличие избыточного давления при высокотемпературной выдержке свидетельствует о существенной роли газотранспортных процессов, протекающих в порах обмазки при проведении борирования.

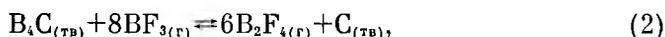
Расчет равновесных составов обмазок при  $T=400-1000^\circ\text{C}$  выполняли с помощью ИПП АСТРА-3 в изохорно-изотермических условиях для пористости 25–15% (содержание кислорода при указанном объеме газа — 0,001% от общей массы смеси). Результаты расчета равновесных составов конденсированных фаз в обмазках и парциальных давлений газообразных продуктов для  $T=1000^\circ\text{C}$  приведены в табл. 1. Как отмечено выше, с увеличением времени выдержки при постоянной температуре происходит окисление В<sub>4</sub>С. Расчеты показали, что азот практически не реагирует с компонентами смеси. В связи с этим при анализе взаимодействия обмазки с окислительной атмосферой печи содержание кислорода в рассматриваемой системе изменяли от 0,001 до 2%. При этом состав и общее давление газовой фазы  $P_0$  остаются постоянными, а количества NaF и NaBO<sub>2</sub> изменяются незначительно. Увеличение доли кислорода приводит к окислению В<sub>4</sub>С с образованием жидкого В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и углерода в виде графита (фиг. 2) по реакции



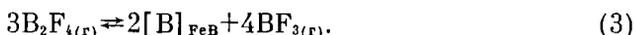
Наличие газообразного соединения ВНF ( $P=3,6$  кПа при  $T=1000^\circ\text{C}$ ) обусловлено присутствием паров воды в исходном составе. Рассчитанное давление газовой фазы  $P=180$  кПа превышает экспериментальное. Это связано с тем, что избыточное давление (300 Па) измеряли после достижения заданной температуры, когда часть газа удалялась в атмосферу.

Диффузионный слой на стали 45 состоит из FeB и Fe<sub>2</sub>B, причем фаза FeB присутствует на внешней поверхности при достаточно коротком времени борирования (менее 5 мин) при  $T=800-1100^\circ\text{C}$ . По мере роста диффузионного слоя концентрация бора на поверхности (FeB) и соответственно его химический потенциал изменяются, что влияет на равновесный состав газовой среды. Для исследования влияния продукта (фазы FeB) на состав газовой фазы выполнен термодинамический расчет для системы, состоящей из обмазки I (толщина слоя  $h=5$  мкм) и малого количества железа ( $h=1-10$  мкм), которое может превратиться в соединение FeB постоянного состава (характерное время образования FeB  $\tau \approx h^2/K_{\text{FeB}}=1-30$  с мало, где  $K_{\text{FeB}}=3,4 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с при  $T=1000^\circ\text{C}$  — параболическая константа скорости роста слоя). Установлено, что образование фазы FeB из исходного железа приводит к пропорциональному уменьшению количества В<sub>4</sub>С и увеличению доли графита, однако состав газовой фазы не изменяется.

Как показано в работе [3], при спекании в вакууме ( $10^{-1}$  Па) порошковой композиции Fe-В<sub>4</sub>С образование фазы FeB на внутренней поверхности пор происходит по газотранспортному механизму с участием В<sub>2</sub>O<sub>2(Г)</sub> и В<sub>2</sub>O<sub>3(Г)</sub>. В рассматриваемой системе в состоянии термодинамического равновесия газообразные соединения В<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> отсутствуют. При данном составе газовой фазы (см. табл. 1) перенос атомов бора от В<sub>4</sub>С к насыщаемой поверхности может осуществляться с участием В<sub>2</sub>F<sub>4</sub> (равновесное парциальное давление  $P=3,1$  Па) и ВF<sub>3</sub> ( $P=71,4$  кПа) по следующей схеме. На поверхности карбида бора образуется В<sub>2</sub>F<sub>4</sub> в результате реакции



для которой при  $T=1000^\circ\text{C}$  изменение потенциала Гиббса в стандартном состоянии  $\Delta G_T^0=630,5$  кДж/моль и константа равновесия  $K_p=\exp(-\Delta G_T^0/RT)=(P_{\text{В}_2\text{F}_4})^6/(P_{\text{ВF}_3})^8=1,35 \cdot 10^{-26}$  (Па)<sup>-2</sup>. На внешней поверхности бориды железа протекает реакция диспропорционирования молекул В<sub>2</sub>F<sub>4</sub>



Результаты расчета \* парциального давления газов и концентраций конденсированных фаз в обмазках в состоянии равновесия при 1000° С и содержании кислорода в порох 0,001%

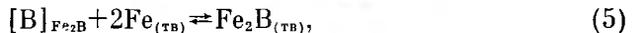
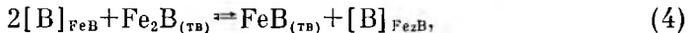
Об-мазка	$P_0 \cdot 10^5$ , Па	Парциальные давления газов, Па									
		$B_2F_4$	CO	$N_2$	$BF_3$	FBO	$F_3B_3O_3$	NaBO <sub>2</sub>	NaF	Na <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	BHF
I	1,804	3,1	28	91 042	71 439	223,7	13 917	27,5	34,6	14	3628
II	1,804	3,1	28	91 042	71 439	223,7	13 917	27,5	34,6	14	3628

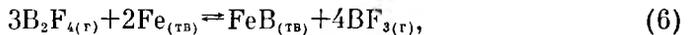
Об-мазка	$P_0 \cdot 10^5$ , Па	Концентрации конденсированных фаз, мас.%					
		$B_4C$	$B_2O_3$	NaBO <sub>2</sub>	NaF	C	FeB
I	1,804	93,09	1,88	0,021	4,986	$1,27 \cdot 10^{-4}$	—
II	1,804	43,3	14,88	0,021	4,968	2,72	34,08

\* При выполнении термодинамических расчетов рассматривались следующие газообразные (г) и конденсированные (к) соединения бора, входящие в базу данных ППП АСТРА-3:  $B_{(к,г)}$ ,  $B_2(г)$ ,  $BO(г)$ ,  $BO_2(г)$ ,  $B_2O(г)$ ,  $B_2O_2(г)$ ,  $B_2O_3(к,г)$ ,  $BH(г)$ ,  $BH_2(г)$ ,  $B_2H_6(г)$ ,  $HBO(г)$ ,  $BOH(г)$ ,  $HBO_2(г)$ ,  $HBO_3(г)$ ,  $H_2BO(г)$ ,  $B(OH)_2(г)$ ,  $H_3BO(г)$ ,  $H_3BO_2(г)$ ,  $H_3BO_3(к,г)$ ,  $H_4B_2O_4(г)$ ,  $H_3B_3O_3(г)$ ,  $H_3B_3O_6(г)$ ,  $BF(г)$ ,  $BF_2(г)$ ,  $BF_3(г)$ ,  $B_2F_4(г)$ ,  $FBO(г)$ ,  $F_2BO(г)$ ,  $F_3B_3O_3(г)$ ,  $BHF(г)$ ,  $BH_2F(г)$ ,  $BHF_2(г)$ ,  $FBOH(г)$ ,  $FB(OH)_2(г)$ ,  $F_2BOH(г)$ ,  $BN(г)$ ,  $BH_3N(г)$ ,  $B_3N_3H_6(г)$ ,  $B_4C(к)$ ,  $BC(г)$ ,  $BC_2(г)$ ,  $B_2C(г)$ ,  $FeB(к)$ ,  $Fe_2B(к)$ ,  $NaBO_2(к,г)$ .

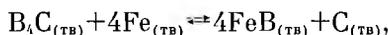
Вследствие диффузии бора через слои FeB и  $Fe_2B$  на межфазных границах FeB— $Fe_2B$  и  $Fe_2B$  —  $\gamma$ -Fe протекают реакции



обеспечивающие рост FeB за счет  $Fe_2B$  и  $Fe_2B$  за счет  $\gamma$ -железа. Суммируя реакции (3)–(5), получим брутто-реакцию образования FeB на поверхности раздела твердое тело — газ



для которой при  $T=1000^\circ\text{C}$   $\Delta G_T^0 = -412,7$  кДж/моль и константа равновесия  $K_p = (P_{BF_3})^4 / (P_{B_2F_4})^3 = 8,6 \cdot 10^{16}$  Па велика. Вследствие диффузии атомов бора в глубь фазы FeB равновесие реакции (3) смещается, вызывая превращение новых молекул  $B_2F_4$  в  $BF_3$ . Для совместного протекания реакций (2) и (3) необходим транспорт молекул  $B_2F_4$  от  $B_4C$  к поверхности борда железа через газовую фазу, а молекул  $BF_3$  — в обратном направлении. Чтобы определить возможность такого процесса, оценим равновесные давления  $B_2F_4$  в контакте с FeB и с  $B_4C$  в приближении постоянного давления  $BF_3$   $P_{BF_3} = 71,4$  кПа (см. табл. 1). Тогда по реакции (2)  $P_{B_2F_4} = 144,5$  Па, а по реакции (6)  $P_{B_2F_4} = 7$  Па. Поскольку равновесное давление  $B_2F_4$  в контакте с FeB ниже, чем у поверхности  $B_4C$ , молекулы  $B_2F_4$  могут транспортироваться через газовую фазу от карбида бора к насыщаемой поверхности, а молекулы  $BF_3$  — в обратном направлении. Величина  $P_{B_2F_4}$  превышает рассчитанное с помощью ППП АСТРА-3 равновесное давление  $B_2F_4$  (3 Па), поскольку при такой оценке не учитывается взаимодействие с другими компонентами. В результате описанных выше этапов реализуется брутто-реакция образования FeB



для которой при  $T=1000^\circ\text{C}$   $\Delta G_T^0 = -194,9$  кДж/моль. По мере насыщения стали бором содержание  $B_4C$  в обмазке уменьшается, что подтверждается и данными химического анализа.

Оценим механизм транспорта через газовую фазу и лимитирующую стадию процесса при условиях  $T=1000^\circ\text{C}$  и  $P_0=1,8$  кПа. Длина свободно-

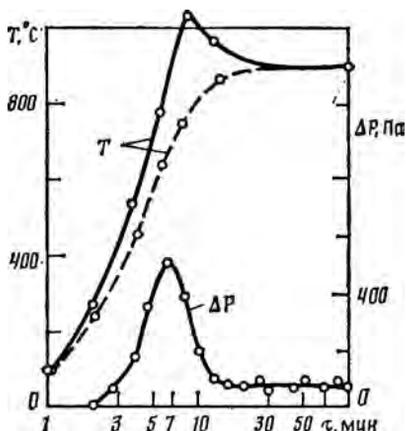
го пробега молекул газа  $\lambda = 1/(\sqrt{2}\pi d^2 n)$ , где  $d \approx 3 \cdot 10^{-10}$  м — диаметр молекул  $B_2F_4$ ,  $BF_3$ ;  $n = P_0 N_0 / (RT)$  — число молекул в единице объема;  $N_0 = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$  — число Авогадро, для  $B_2F_4$  и  $BF_3$  составляет примерно 0,25 мкм. Это существенно меньше, чем средний размер пор  $l \approx 10-100$  мкм. Следовательно, газофазный перенос осуществляется в диффузионном режиме. Коэффициент диффузии в газах  $D_r \approx \lambda v / 3$ , где среднеарифметическая скорость  $v = [8RT/(\pi \mu)]^{1/2}$ ,  $\mu$  — молекулярная масса, составляет для  $B_2F_4$  и  $BF_3$  примерно 0,4 и 0,5 см $^2$ /с соответственно. Характерное время диффузии на расстояние  $l$  молекул газа  $\tau_r \approx l^2 / D_r \approx 2 \cdot 10^{-6}$  с при размере пор  $l = 10$  мкм и  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  с при  $l = 100$  мкм. Характерное время твердофазной диффузии на расстояние  $h$   $\tau_{тв} \approx h^2 / K$ , где  $K = 3,4 \cdot 10^{-8}$  см $^2$ /с при  $T = 1000^\circ$  С — параболическая константа скорости роста боридного слоя, определенная по экспериментальным данным. Смена режимов происходит при  $\tau_r \approx \tau_{тв}$ , т. е. при  $h \approx l(K/D_r)^{1/2} \approx 0,03$  мкм для  $l \approx 100$  мкм. Таким образом, после возникновения на поверхности железа сплошной пленки борида толщиной 0,03 мкм рост по описанному выше газотранспортному механизму лимитируется твердофазной диффузией.

В состоянии равновесия в смеси обмазки I вследствие частичного разложения карбида бора содержится малое количество углерода ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  %), который, как известно, применяют в качестве основы протипригарных красок, а также добавок, увеличивающих выбиваемость литейных смесей. В связи с этим один из возможных путей уменьшения спекаемости обмазок — введение добавок, реагирующих с В $_2$ С для увеличения содержания углерода. Экспериментально установлено, что для обмазок типа II, содержащих 30–40% железной окалины, после 8 мин спекания при  $T = 900^\circ$  С работа выбивки из трубки  $W = 110$  кДж в 2 раза ниже, чем смеси I. Расчеты с помощью ППП АСТР-3 показали, что в равновесном состоянии количество графита увеличилось до 2,72%. Уменьшение спекаемости смеси II можно связать также с увеличением пористости до 35%. Толщина боридного слоя на стали 45, полученного с обмазкой II при  $T = 900-1000^\circ$  С и  $\tau = 2-4$  к, практически не снижается по сравнению с таковым, полученным при использовании обмазки I.

По данным ДТА при  $500^\circ$  С в смеси II происходит быстрый (в течение 1,5 мин) разогрев до  $990-1050^\circ$  С (фиг. 3). Далее температура смеси снижается до  $900^\circ$  С. Во время скачка температуры наблюдается газовыделение: избыточное давление повышается до 450–500 Па (фиг. 3). В дальнейшем оно снижается до 80–140 Па и остается неизменным. По результатам химического анализа в выделяющем газе содержится монооксид углерода. Рентгеноструктурным анализом установлено, что при  $T = 900^\circ$  С и  $\tau = 4-360$  мин в обмазке присутствуют В $_2$ С и FeВ. На поверхности (по данным химического анализа) имеется слой стеклообразного В $_2$ О $_3$ .

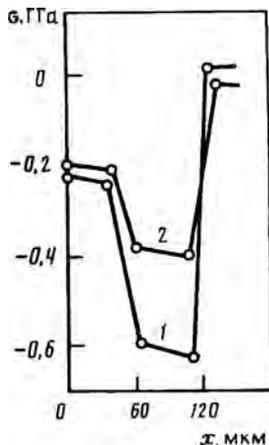
Энтальпия смеси II при  $T = 900^\circ$  С в исходном состоянии  $\Delta H_{\kappa}^0 = -1890$  кДж/кг, а в равновесном (по результатам термодинамических расчетов)  $\Delta H_p^0 = -3020$ , т. е. переход к равновесию сопровождается экзотермическими реакциями. Это вызвано превращением оксида железа в соединение FeВ. Для состава I в исходном состоянии при  $T = 900^\circ$  С  $\Delta H_{\kappa}^0 = -530$  кДж/кг, а в равновесном  $\Delta H_p^0 = -550$ , т. е. тепловыделение практически отсутствует. Из-за низкой теплопроводности обмазки экзотермические реакции протекают в режиме, близком к адиабатическому. Это приводит к разогреву смеси.

Согласно термодинамическим расчетам борид железа и В $_2$ О $_3$  образуется в смеси II уже при  $T = 400^\circ$  С. Однако по данным ДТА экзотермические реакции начинаются выше температуры плавления борного ангидрида ( $450^\circ$  С). Следовательно, взаимодействие оксидов железа с карбидом бора, содержащим В $_2$ О $_3$ , в твердом состоянии кинетически неосуществимо. Равновесный состав газовой фазы для обмазки II, определенный с помощью ППП АСТРА-3 при  $T = 400-1000^\circ$  С, не изменился по сравнению с обмазкой I. Увеличение доли кислорода от 0,001 до 1% приводит к окислению В $_2$ С по реакции (1). Парциальное давление монооксида углерода мало  $P_{CO} = 28$  Па (см. табл. 1). Сопоставление с экспериментальными данными свидетельствует о том, что термодинамические расчеты не в полной сте-



Фиг. 3

Фиг. 3. Изменение избыточного давления газовой фазы и температуры обманки II при нагреве; штриховая линия – контрольный образец (62%  $Al_2O_3$ +25,43%  $FeO$ +12,57%  $Fe_2O_3$ )



Фиг. 4

Фиг. 4. Остаточные напряжения в боридном слое на стали 45 (температура борирования  $900^\circ C$ ): 1 – охлаждение на воздухе, 2 – закалка в воде

пении характеризуют химические реакции в смеси II. Вероятно, это связано с тем, что взаимодействие между  $B_4C$  и оксидами железа протекает с участием жидкой фазы на основе борного ангидрида, в которой согласно диаграмме состояния [6] может содержаться до 20 мол.%  $Fe_2O_3$  при  $T=800^\circ C$ . Механизм этого процесса нуждается в дальнейшем изучении.

Для проведения термообработки после борирования в обманке I с высокой спекаемостью или в порошковых смесях требуются охлаждение на воздухе и очистка деталей. В ряде случаев наблюдается растрескивание поверхностного слоя при медленном охлаждении или последующем нагреве под закалку. Использование образков с низкой спекаемостью, которые легко отделяются от поверхности изделия, позволяет проводить закалку непосредственно после борирования. В результате расчета остаточных напряжений в боридном слое на стали 45 по известной методике [2] установлено, что при закалке в воде с температуры борирования уровень остаточных напряжений вблизи границы  $Fe_2B-Fe$  снижается в 1,5 раза по сравнению с охлаждением на воздухе (фиг. 4). Это связано с увеличением удельного объема при мартенситном превращении.

В табл. 2 приведены свойства сталей 45 и 5ХНМ после борирования в обманках I (закалка с повторного нагрева) и II (закалка с температуры насыщения) по сравнению с закаленным состоянием без химико-термической обработки (ХТО). Температура отпуска:  $250^\circ C$  для стали 45,  $500^\circ C$  для стали 5ХНМ. Износостойкость кольцевых образцов определяли в условиях сухого трения скольжения при давлении 15 МПа, скорости сколь-

Таблица 2

Влияние борирования в обманках I и II ( $T=900^\circ C$ ,  $\tau=4$  ч) на характеристики боридного слоя и свойства сталей 45 (числитель) и 5ХНМ (знаменатель)

Параметр	Значения параметра при использовании обманок		
	без ХТО	I	II
$h$ , мкм	—	155/135	155/135
FeB в слое, об.%	—	55/27	50/23
Износ, мг/см <sup>2</sup>	1320/410	81/76	62/60
$\chi$ , 1/мм	0,8/2,1	1,8/1,7	1,4/1,1

жения 0,42 м/с и пути трения 1 км. Материал контртела — нормализованная сталь 45. Число трещин на единицу длины кольцевого образца  $\lambda$ , характеризующее стойкость при термоциклировании, определяли после 5000 циклов теплосмен по режиму: нагрев в свинцовой ванне ( $T=700^\circ\text{C}$ ,  $\tau=28\text{ с}$ ), охлаждение в течение 10 с в интенсивно циркулирующей воде и далее 40–50 с в струе сжатого воздуха. Насыщение в обматке II и закалка с температуры борирования обеспечивают повышение износостойкости и сопротивления трещинообразованию при термоциклировании по сравнению с обработкой в обматке I. Это обусловлено снижением остаточных напряжений в боридном слое.

Таким образом, исследование газотранспортных процессов, химического взаимодействия и структурообразования в обматках для диффузионного борирования открывает возможность целенаправленно воздействовать на свойства обмазок и получаемых диффузионных слоев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошнин Л. Г., Лязович Л. С. Борирование стали. М.: Metallurgia, 1978.
2. Ситкевич М. В., Бельский Е. И. Совмещенные процессы химико-термической обработки с использованием обмазок. Минск: Высп. шк., 1987.
3. Туров Ю. В., Хусид Б. М., Ворошнин Л. Г. и др. Газотранспортные процессы при спекании порошковой композиции железо-карбид бора // Порошковая металлургия. 1989. № 8 (320). С. 38.
4. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Г. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М.: Наука, 1982.
5. Varin I., Knacke O., Kubaschewski O. Thermochemical properties of inorganic substances. Suppl. Berlin et al.: Springer-Verlag, 1977.
6. Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов: Справ. Вып. 5. Двойные системы. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. Ч. 1.

Минск,  
Москва

Поступила в редакцию  
07.05.90