

**В.Ф. ПРОТАСЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
**Г.В. СТАСЕВИЧ**,  
**И.А. БАСАЛАЙ**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА БОРИДНОГО СЛОЯ НА ЦЕМЕНТОВАННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

Борирование является одним из эффективных способов поверхностного упрочнения сталей. Повышенный интерес к процессу борирования обусловлен возможностью получения на стальных изделиях боридных слоев, характеризующихся уникальным комплексом физико-химических свойств. Прежде всего, это высокая твердость боридных покрытий (до 22000 МПа), которая в 1,5–2 раза превосходит твердость стали после термообработки, что обуславливает высокую износостойкость борированных слоев в различных условиях трения и износа [1]. Коэффициент трения борированных слоев и склонность к схватыванию (образованию металлической связи) в контакте с холодными металлами при их взаимном перемещении (холодная вытяжка, гибка, штамповка) значительно ниже, чем у закаленных сталей. Поэтому борирование значительно повышает износостойкость инструмента для холодной деформации металлов, а также пар трения, работающих без смазки или с ограниченной ее подачей.

Малоуглеродистые стали, упрочненные за счет борирования, могут применяться лишь в том случае, если в процессе эксплуатации не испытывают больших удельных нагрузок. Использование боридных покрытий на этих сталях в условиях высоких контактных нагрузок ограничено повышенной хрупкостью боридного слоя и отсутствием достаточно твердой и прочной подложки для предотвращения его продавливания. В связи с этим возникает необходимость создания под боридным слоем подложки, обладающей требуемыми свойствами. Для этой цели многие авторы применяют комплексное насыщение бором совместно с другими элементами, из которых особый интерес представляет углерод [2–5]. В работе [4] проведено упрочнение низкоуглеродистых мартенситных сталей

07Х3ГНМ и 12Х2Г2НМФТ за счет последовательного насыщения углеродом и бором. В результате борирования в обмазке с использованием карбида бора на цементованных образцах были получены боридные слои толщиной 30–40 мкм, состоящие из фазы Fe<sub>2</sub>B. Микротвердость боридного слоя составляла 14500 и 13600 МПа, а непосредственно под боридной зоной – 5800–4300 МПа. В результате двойной обработки (цементации с последующим борированием) на указанных сталях под слоем боридов формируется бейнитно-мартенситная структура, при этом твердость поверхности достигает 55–60 HRC. После борирования без предварительной цементации значения твердости составляют 35 HRC из-за продавливания боридного слоя толщиной 30–40 мкм.

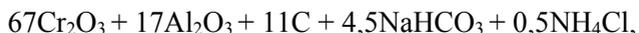
Для деталей, работающих в условиях циклического и ударного нагружения, в схему обработки (цементация + борирование) в работе [4] была включена закалка с низким отпуском с целью получения мартенситной структуры в науглероженной зоне диффузионного слоя. Это привело к уменьшению твердости боридного слоя до 10700 МПа и повышению твердости цементованной зоны до 8000–9000 МПа. В результате закалки и низкого отпуска повысилось сопротивление развитию трещин в подборидной цементованной зоне и снизилась опасность хрупкого разрушения.

В настоящей работе поставлена задача получить на низкоуглеродистой стали 20 борированные диффузионные слои с целью использования в условиях высоких контактных нагрузок без разрушения покрытия.

Для этого предварительно цементованные образцы из стали 20 подвергали борированию и термической обработке (закалке и низкому отпуску). Химико-термическая и термическая обработки была проведена по следующим схемам:

1. Борирование (Б).
2. Борирование + закалка + отпуск (Б + З + О).
3. Цементация + борирование (Ц + Б).
4. Цементация + борирование + закалка + отпуск (Ц + Б + З + О).

Цементацию осуществляли в шахтной печи из порошковой среды, следующего состава (% по массе):



при температуре 950 °С в течение 6 ч.

Для борирования использовали алюмотермические смеси на основе оксида бора (% по массе):



Борирование проводили при температурах: 800, 850, 900 и 950°С с продолжительностью насыщения 6 часов.

После химико-термической обработки образцы подвергали закалке с 780 °С в масле и низкому отпуску при 180 °С.

В ходе металлографических и дюрометрических исследований измерены микротвердость, микрохрупкость и твердость диффузионных борированных слоев.

Дюрометрический анализ проводили на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9650-76 при нагрузке 0,980 Н. Замеры микротвердости боридов проводили на поперечных шлифах от поверхности вглубь вдоль оси боридных игл. Первый замер осуществляли у поверхности в фазе FeВ, далее вдоль иглы, затем замеры проводили по фазе Fe<sub>2</sub>В от основания иглы на границе двух фаз и до вершины иглы на границе с основой.

Исследование микрохрупкости осуществляли по методике, описанной в работе [6]. Суммарный балл хрупкости оценивали в зависимости от числа отпечатков с дефектами и характера дефектов вокруг отпечатка. Твердость измеряли по методу Роквелла на приборе ТК-2М в соответствии с ГОСТ 9013-59.

Образцы из стали 20 без предварительной обработки и цементованные были обработаны в порошковой среде для борирования, в результате чего получены двухфазные боридные покрытия. Результаты исследования фазового состава, структуры, строения, свойств (микротвердость и микрохрупкость) борированных и бороцементованных покрытий представлены в работе [7]. Установлены закономерности изменения толщины слоя, микротвердости и микрохрупкости по толщине боридных покрытий в зависимости от температуры борирования и вида обработки.

Борированный слой на предварительно цементованной стали 20 состоит из двухфазной боридной зоны толщиной от 80 до 220 мкм и переходной зоны от 170 до 2800 мкм в зависимости от температуры борирования (таблица 1). Переходная зона на цементованной стали 20 образуется за счет оттеснения углерода и проникновения бора вглубь вдоль всего фронта диффузии. Толщина боридного слоя на цементованной стали примерно на 20 % ниже, чем на стали, не прошедшей предварительную обработку, что соответствует законам формирования боридных покрытий на низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталях [1].

Таблица 1– Толщина борированного слоя в зависимости от вида обработки и температуры борирования

Вид обработки	Температура борирования, °С	Толщина слоя, мкм			
		FeB	Fe <sub>2</sub> B	Боридная зона	Переходная зона
Борирование	800	60	50	110	–
	850	80	80	160	100
	900	140	90	230	1300
	950	70	140	210	1500
Цементация + борирование	800	50	30	80	170
	850	75	75	150	1750
	900	120	80	200	1750
	950	70	150	220	2800

Результаты измерения микротвердости боридного слоя для всех схем обработки представлены в таблице 2. Микротвердость фазы FeB, полученной на предварительно цементованной стали, совпадает (при 800 °С) или ниже чем на стали без предварительной обработки. Максимальная микротвердость фазы FeB до термообработки составляет 16500 МПа (850 °С, Б). Как было установлено в работе [7], микротвердость борида FeB с уменьшением температуры насыщения снижается.

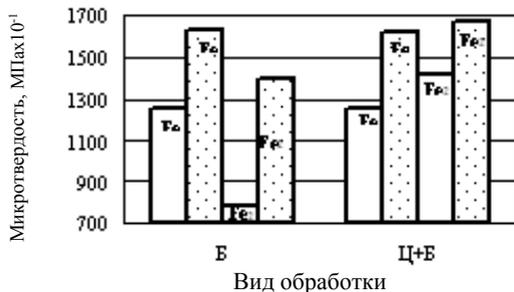
Таблица 2 – Изменение микротвердости по толщине боридного слоя в зависимости от вида обработки и температуры борирования

Температура борирования, °С	Вид обработки	Микротвердость, МПа · 10 <sup>-1</sup>								Микротвердость под боридным слоем, МПа · 10 <sup>-1</sup>
		Расстояние от поверхности, мкм								
		30	60	90	120	150	180	210	230	
800	Б	1260	1260	780	–	–	–	–	–	150
	Б+З+О	1630	1630	1400	–	–	–	–	–	200
	Ц+Б	1260	1420	1420	–	–	–	–	–	190
	Ц+Б+З+О	1620	1670	1670	–	–	–	–	–	770
850	Б	1650	1560	1530	1490	1490	–	–	–	160, 120
	Б+З+О	1650	1790	1510	1430	1370	–	–	–	180, 360
	Ц+Б	1290	1530	1510	1480	1450	–	–	–	215
	Ц+Б+З+О	1750	1930	1880	1750	1740	–	–	–	990
900	Б	1540	1520	1520	1530	1530	1390	1250	1200	190
	Б+З+О	1590	1670	1690	1790	1780	1590	1440	1290	200
	Ц+Б	1490	1470	1460	1460	1450	1350	1250	–	200
	Ц+Б+З+О	1780	1820	1820	1860	1470	1480	1520	–	1030
950	Б	1560	1610	1350	1350	1260	1190	1100	–	180, 240
	Б+З+О	1660	1740	1820	1510	1460	1430	1340	–	170, 240
	Ц+Б	1500	1610	1450	1450	1450	1460	1470	–	250
	Ц+Б+З+О	1470	1580	1690	1630	1650	1680	1700	–	610

В ходе исследований установлено, что микротвердость  $\text{Fe}_2\text{B}$  изменяется в зависимости от вида обработки и температуры борирования. Борид  $\text{Fe}_2\text{B}$ , сформированный на предварительно цементованных образцах при температуре борирования  $950\text{ }^\circ\text{C}$ , имеет по всей зоне до основы постоянную микротвердость –  $14500\text{ МПа}$ . У фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$ , полученной на стали без предварительной обработки, наблюдается более низкая микротвердость и ее значения уменьшаются по толщине слоя от  $13000\text{ МПа}$  на границе двух боридов до  $11000\text{ МПа}$  у основы. Фаза  $\text{Fe}_2\text{B}$ , образованная при  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (Б и Ц + Б) имеет переменную микротвердость по толщине зоны от  $15300\text{ МПа}$  до  $12000\text{ МПа}$  на границе с основой. При температуре борирования  $850\text{ }^\circ\text{C}$  (Б и Ц+Б) микротвердость борида  $\text{Fe}_2\text{B}$  изменяется от  $15300\text{ МПа}$  на границе боридных фаз до  $14500$  у основы.

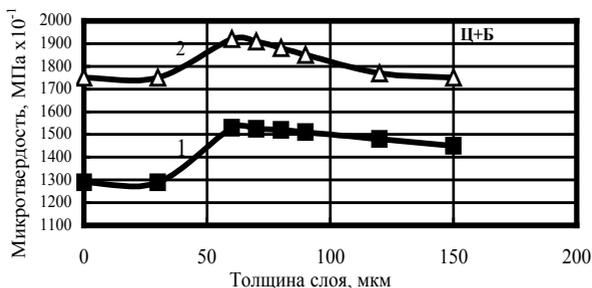
Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что после термической обработки (закалка с низким отпускком) микротвердость боридов  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$  повышается как для цементованной стали, так и для стали без предварительной обработки. Максимальные значения микротвердости борида  $\text{FeB}$  после закалки достигают  $18200\text{ МПа}$  (Б + З + О,  $950\text{ }^\circ\text{C}$ ), и  $19300\text{ МПа}$  (Б + Ц + З + О,  $850\text{ }^\circ\text{C}$ ). Эффект повышения твердости боридов в результате термической обработки в большей степени проявляется для цементованных образцов, борированных при температурах  $800$ ,  $850$  и  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (рисунки 1–3). Твердость после термообработки может достигать  $4000\text{ МПа}$  для борида  $\text{FeB}$  и  $3000\text{ МПа}$  для фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$ .

В работах [4, 8] отмечено существенное влияние борирования на свойства подборидной цементованной зоны. Твердость цементованной зоны под слоем боридов значительно выше, чем цементованной зоны без боридного слоя. Хотя диффузионная подвижность бора в железе крайне мала, но и микролегирование бором существенно изменяет его свойства. Бор, имея растворимость в железе в количестве тысячных долей процента, размещается в основном в дефектных участках кристаллической решетки и способствует уменьшению размеров зерна аустенита и измельчению мартенсита и, тем самым, повышению твердости.



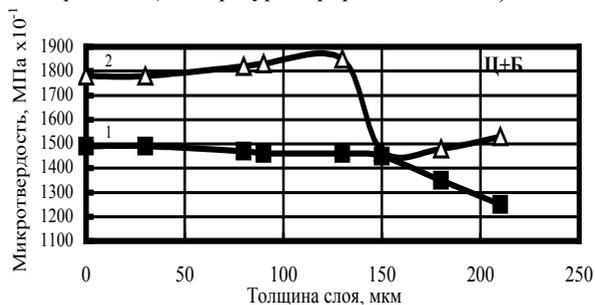
□ – до термообработки; ▤ – после термообработки

Рисунок 1 – Микротвердость боридного слоя в зависимости от вида обработки (температура борирования 800 °С)



1 – до термообработки; 2 – после термообработки

Рисунок 2 – Изменение микротвердости по толщине слоя в зависимости от вида обработки (температура борирования 850 °С)



1 – до термообработки; 2 – после термообработки

Рисунок 3 – Изменение микротвердости по толщине слоя в зависимости от вида обработки (температура борирования 900 °С)

В результате термической обработки бороцементированных образцов из стали 20 значительно повысилась твердость подборидной цементированной зоны. Микротвердость переходной зоны непосредственно под боридным слоем для предварительно цементованных образцов достигает значений 6100, 7700, 9900 и 10300 МПа соответственно при температурах борирования 950, 800, 850 и 900 °С (таблица 2). Такие различия по твердости от 6100 до 10300 МПа переходной зоны для разных температур борирования можно объяснить разными коэффициентами диффузии бора в  $\alpha$ -Fe ( $D = 1,2 \cdot 10^{-2}$ ) и в  $\gamma$ -Fe ( $D = 10^{-5}$ ). Согласно диаграмме Fe – В диффузия бора при 900, 850 и 800 °С проходит в  $\alpha$ -Fe, где коэффициент диффузии бора на три порядка выше, чем в  $\gamma$ -Fe при 950 °С.

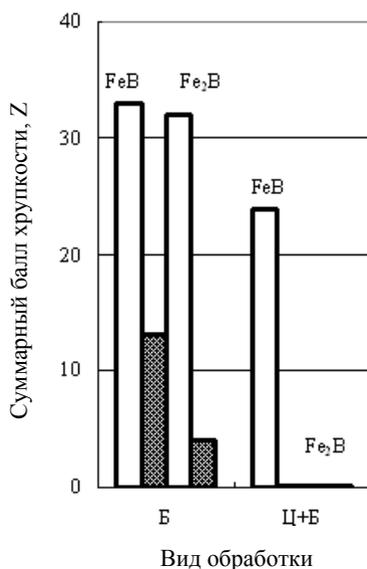
В результате создания твердой и прочной подложки под боридным слоем поверхностная твердость борированной с предварительной цементацией стали 20 после термической обработки достигла 68 HRC при температурах борирования 850, 900 и 950 °С и 66 HRC при 800 °С.

Исследование хрупкости боридных покрытий показало, что в результате упрочняющей термической обработки (закалка с низким отпускком) происходит понижение хрупкости боридного слоя как для цементованной стали, так и стали без предварительной обработки при температурах борирования 800, 850 и 900 °С (таблица 3).

Таблица 3 – Изменение суммарного балла хрупкости до ТО (числитель) и после ТО (знаменатель) в зависимости от температуры борирования и вида обработки

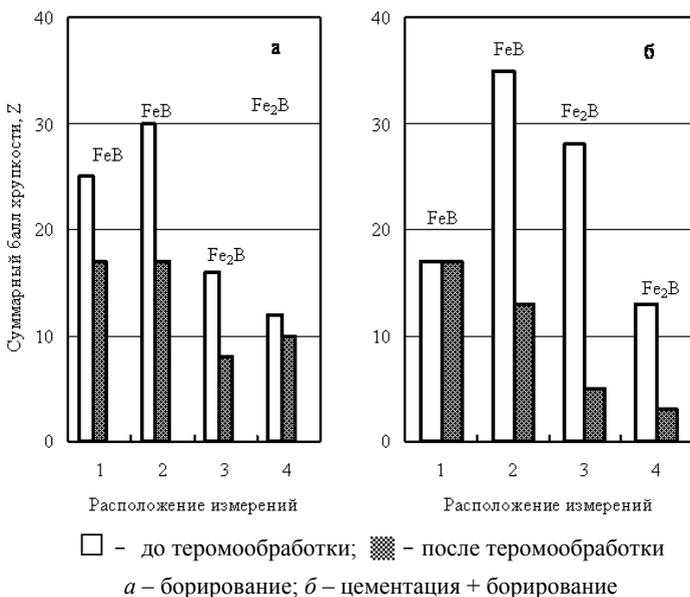
Температура борирования	Вид обработки	Суммарный балл хрупкости, Z			
		FeB		Fe <sub>2</sub> B	
		У поверхности	На границе боридов	На границе боридов	На границе с основой
800	Б	33/12	–	–	32/4
	Ц + Б	24/3	–	–	0/0
850	Б	18/12	–	–	23/16
	Ц + Б	10/9	–	–	2/2
900	Б	25/16	30/16	16/8	12/10
	Ц + Б	17/17	35/12	28/5	13/2
950	Б	16/24	29/15	17/26	20/2
	Ц + Б	13/25	24/12	13/27	3/8

До термической обработки боридные слои имеют высокую хрупкость до 35 баллов (таблица 3), особенно высока хрупкость на границе боридов. На границе фаз FeB – Fe<sub>2</sub>B имеются трещины при температурах борирования 800 и 950 °С. После термической обработки трещины в борированном слое отсутствуют. Исключением является борирование при температуре 950 °С. Результаты измерений суммарного балла хрупкости, представленные в таблице 3 и на рисунках 4, 5 (температура борирования 800 и 900 °С) показывают, что хрупкость после закалки и отпуска для предварительно цементированных образцов может снижаться в 3–8 раз. Значительно уменьшается хрупкость борида на границе с основой для цементированных образцов. Значения суммарного балла хрупкости для них – от 2 до 0 баллов.



□ – до термообработки; ▨ – после термообработки

Рисунок 4 – Изменение суммарного балла хрупкости в зависимости от вида обработки (температура борирования 800 °С)



1 – край образца; 2, 3 – граница боридов; 4 – на границе с основой  
 Рисунок 5 – Изменение суммарного балла хрупкости в зависимости от вида обработки (температура борирования 900 °С)

Боридные слои, полученные при 950 °С, имеют повышенную хрупкость после закалки с отпуском, при этом у поверхности максимальное значение составляет 25 баллов, на границе с основой – 27 баллов. Такая закономерность объясняется тем, что при 950 °С существует градиент микротвердости между боридами FeB и Fe<sub>2</sub>B, который достигает 3000 МПа [7]. В слое отмечено наличие трещин на границе боридных фаз после закалки с отпуском.

Результаты исследований хрупкости и твердости после ТО получили подтверждение в работе Л.Г. Ворошнина [1], при рассмотрении термической обработки сталей с боридными покрытиями отмечено, что нагрев под закалку боридного слоя приводит к резкому уменьшению сколов и закрытию трещин в связи с сжимающими напряжениями.

Результаты выполненных нами исследований свойств борцементованной стали 20 после закалки и отпуска противоречат данным, приведенным в работе [4]. После закалки низкоуглеродистых

мартенситных сталей сплошность боридов в наружной зоне слоя нарушается, снижается твердость боридной зоны от 13600 до 10200 МПа и одновременно повышается хрупкость с 1–2 до 3 баллов. По-видимому, это связано с существенным отличием в толщине боридного слоя. В работе [4] толщина слоя составляет 30–40 мкм, по результатам наших исследований – 200–230 мкм.

Таким образом, по результатам выполненных исследований установлено следующее.

1. Термическая обработка (закалка и низкий отпуск) повышает микротвердость боридов как на цементованной стали 20, так и на стали 20 без предварительной обработки.

2. Эффект повышения твердости боридов в результате термической обработки в большей степени проявляется для цементованных образцов, борированных при температурах 800, 850 и 900 °С. Повышение твердости после термообработки может достигать 4000 МПа для борида FeB и 3000 МПа для борида Fe<sub>2</sub>B.

3. Показано влияние борирования на твердость переходной зоны. Максимальная микротвердость переходной зоны непосредственно под боридным слоем достигает 10300 МПа при температуре борирования 900 °С. Минимальная микротвердость 6100 МПа достигается при температуре борирования 950 °С.

4. Установлено понижение хрупкости боридных покрытий после закалки и отпуска как для цементованной стали, так и для стали без предварительной обработки. Снижение хрупкости боридов после закалки и отпуска для цементованной стали 20 может достигать от 3 до 8 баллов при температуре борирования 800 и 900 °С.

5. Благодаря созданию твердой и прочной подложки под боридным слоем поверхностная твердость борированной стали 20 с предварительной цементацией после термической обработки достигла 68 HRC при температурах борирования 850, 900 и 950 °С и 66 HRC при 800 °С.

## Литература

1. **Ворошнин, Л.Г.** Борирование стали / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович. – М.: Металлургия, 1978. – 239 с.

2. **Лыгденов, Б.Д.** Повышение износостойкости углеродистой феррито-перлитной стали / Б.Д. Лыгденов, И.Б. Обунеев, А.М. Гурьев // Ползуновский альманах. – 2003. – № 3-4. – С. 105–107.

3. **Иванов, А.С.** Бороцементация низкоуглеродистых мартенситных сталей / А.С. Иванов, О.Н. Карманова, М.Б. Гужева // Вестн. ПГТУ. – 1999. – № 2. – С. 3–8.

4. **Иванов, А.С.** Исследование двухслойных боридоцементованных покрытий на низкоуглеродистых мартенситных сталях / А.С. Иванов, А.П. Быкова // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т. 100, № 1. – С. 57–64.

5. **Иванов, А.С.** Карборирование мартенситных сталей / А.С. Иванов, А.П. Быкова // Вестн. ПГТУ. – 2004. – № 8. – С. 191–197.

6. **Глазов, В.М.** Микротвердость металлов / В.М. Глазов, В.Н. Вигдорович. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.

7. **Кухарева, Н.Г.** Боридные покрытия на предварительно цементованной стали 20 / Н.Г. Кухарева, В.Ф. Протасевич, С.Н. Петрович // Вестник БНТУ. – 2010. – № 2. – С. 24–27.

8. **Азаркевич, А.А.** Об оптимальном содержании бора в стали / А.А. Азаркевич, Л.В. Коваленко, В.М. Краснопольский // МиТОМ. – 1995. – № 1. – С. 24–26.

*УДК [666.3:539.4]:519.2*

**Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ),  
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ)**

## **ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНЫХ И СПЛОШНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ**

В настоящей работе изучено влияние дискретных и сплошных защитных покрытий из нитрида титана на износостойкость керамического инструмента на основе нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при непрерывном точении легированной термообработанной стали ШХ15 (HRC 62).