

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

**С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, С. А. Земляков,
Н. Ю. Малькова, А. М. Гурьев, А. М. Кириенко**

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

В условиях научно-технического прогресса для современной промышленности проблема износа стоит достаточно остро, так как основным конструкционным материалом для изготовления подавляющего большинства деталей машин и инструмента до сих пор остается железо. Тенденции развития техники и технологий таковы, что материалам приходится работать во все более и более экстремальных условиях. В строительной отрасли проблема износа стоит также достаточно остро в силу того, что строительное производство ориентировано прежде всего на работу с каменными и керамическими материалами, являющимися отличными абразивами. Наиболее экономичным вариантом повышения эксплуатационных характеристик стальных изделий является нанесение покрытий – наплавка, напыление, химико-термическое насыщение поверхности.

Химико-термическая обработка (ХТО) стальных деталей машин и инструмента стоит особняком среди других способов нанесения покрытий, так как методами ХТО возможно получение более толстых покрытий по сравнению, например, с магнетронным распылением; либо получение покрытий на основе таких элементов как бор, азот и др., получить которые другими методами просто невозможно. Особенно актуально эта проблема стоит для покрытий на основе бора, так как известно, что добавка даже тысячных долей процента этого элемента в стали приводит к их значительному упрочнению. Однако, скапливаясь по границам зерен, бор приводит к снижению таких важных показателей как пластичность и ударная вязкость. При этом боридные покрытия, нанесенные методами химико-термической обработки, обладают наиболее высоким комплексом эксплуатационных свойств, таких как: твердость, износостойкость, тепло- и коррозионная стой-

кость.

В работе были исследованы боридные покрытия, полученные методами ХТО. Были исследованы условия получения боридных покрытий на стальных изделиях, обладающих максимальными свойствами. Полученные покрытия были подвергнуты различным эксплуатационным испытаниям: воздействию факторов абразивного, адгезионного и коррозионного износа, в том числе происходящего при повышенных температурах.

Химико-термическую обработку осуществляли из обмазок на основе карбида бора в термических печах при температурах 920–1150°C [1]. Микроструктурный анализ полученных покрытий осуществляли с помощью световой, растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии на микроскопах NEOFOT-32, JEOL, FEMTOSKAN соответственно. Фазовый и химический анализ проводили с помощью рентгено-спектрального анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН 2,0 и энергодисперсионным анализатором X-MAX посредством программного пакета INCA ENERGY. Эксплуатационные испытания моделировались проводились с помощью машины Амслера при трении образцов о закрепленные абразивные частицы и по металлическому диску из стали 45.

В работе проводили борирование образцов из сталей 45 и 5ХНВ в порошковой смеси на основе карбида бора (B₄C) с добавкой диборида хрома, в качестве активатора использовали фторид натрия. Время выдержки составило 2,5 часа при температуре насыщения 950°C.

Поверхностная структура в исследуемых сталях фактически формируется четырьмя химическими элементами: железом, бором, углеродом и хромом. Железо является основным элементом, бор и хром – основными

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

легирующими элементами на поверхности, углерод присутствует в количестве, введенном в стали.

На рисунке представлены фотографии покрытий, получаемых ХТО и наплавкой соответственно. Хорошо видны принципиальные отличия диффузионных и наплавленных слоев: диффузионный слой обладает ярко выраженной игольчатостью по сравнению с гладким наплавленным слоем. Данная особенность позволяет диффузионным боридным слоям хорошо противостоять воздействию касательных напряжений, при которых слои, имеющие гладкую границу контакта с основным материалом начинают разрушаться.

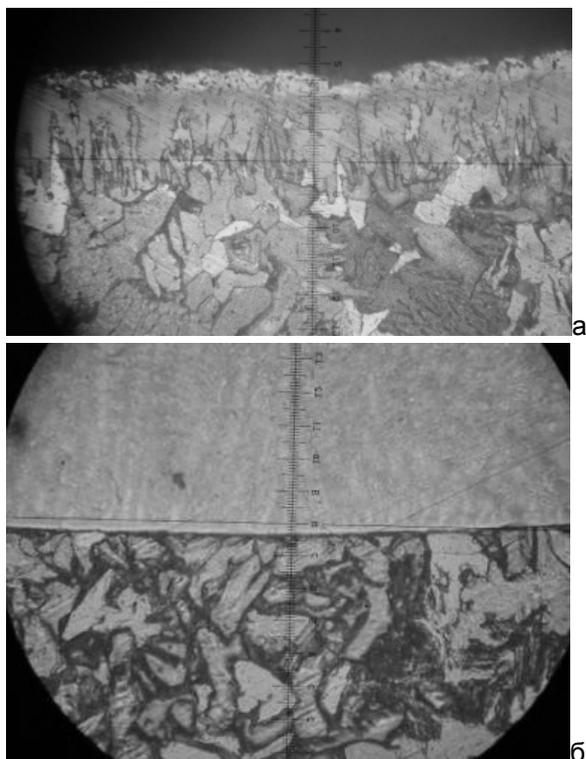


Рисунок 1 – Боридное покрытие, полученное способом ХТО (а) и наплавленное (б)

На рисунках 2, 3, 4 соответственно показаны диффузионный боридный слой и боридные слои, легированные титаном и хромом. Условно боридный слой можно разделить на 3 зоны, отличающиеся как по химическому и фазовому составу, так и по механическим свойствам:

1) непосредственно сам слой, толщиной

до 300 мкм, имеющий игольчатое строение и кардинально отличающийся по всем признакам от остальных зон;

2) переходная зона толщиной от 1 до 10 мм, находящаяся между боридным слоем и имеющая с ним, как правило, резкую границу и далее плавно переходящая в основной материал. Механические и эксплуатационные свойства переходной зоны также плавно изменяются в направлении от боридного слоя к основному металлу;

3) основной металл, находящийся ниже переходной зоны на глубине, как правило ниже 15-20 мм от поверхности материала.

На практике, как правило, за толщину боридного слоя понимают среднее арифметическое длин боридных игл, а за толщину диффузионного слоя условно понимают зону, в которой механические свойства имеют средние арифметические значения от соответствующих показателей боридного слоя и основного материала.

Такое деление имеет определенный смысл: в силу своей небольшой толщины, боридный слой в очень сильной степени зависит от твердости переходной зоны, так как мягкая переходная зона может привести к продавливанию боридного слоя, его сколам и как следствие – к катастрофическому износу в результате абразивного воздействия частиц выкрошенного боридного слоя. Наоборот, слишком твердая переходная зона может приводить к выкрашиванию боридных игл и как следствие – к недостаточной стойкости покрытия в целом.

В работе проводили борирование образцов из сталей 45 и 5ХНВ в порошковой смеси на основе карбида бора (B_4C) с добавками диборида хрома и диборида титана, в качестве активатора использовали фторид натрия. Время выдержки составило 2,5 часа при температуре насыщения $950^{\circ}C$.

Поверхностная структура в исследуемых сталях фактически формируется четырьмя химическими элементами: железом, бором, углеродом и хромом. Железо является основным элементом, бор, титан и хром – основными легирующими элементами на поверхности, углерод присутствует в количестве, введенном в стали.

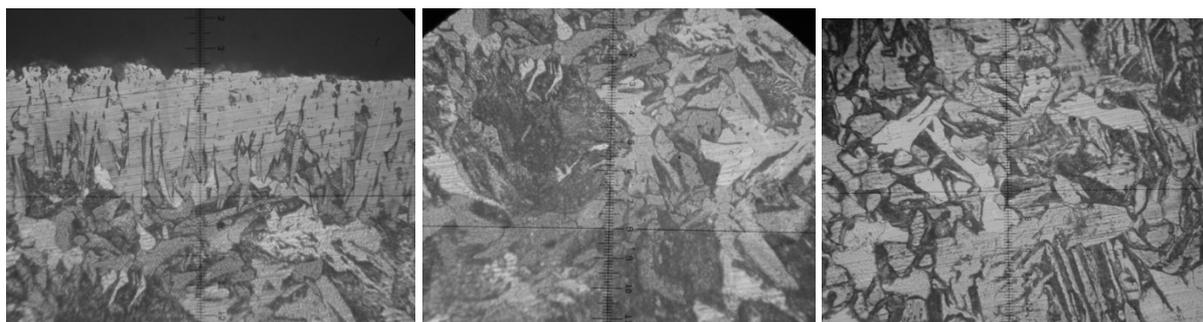


Рисунок 2 – Борирование: боридный слой, переходная зона, сердцевина



Рисунок 3 – Боротитанирование: боридный слой, переходная зона, сердцевина

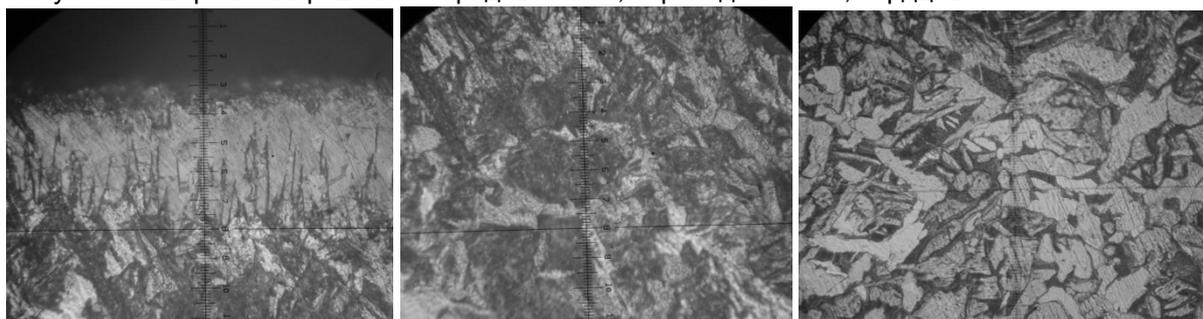


Рисунок 4 – Борохромирование: боридный слой, переходная зона, сердцевина

Как видно из представленных рисунков, легирование боридного слоя различными элементами приводит к изменениям микроструктуры всех элементов покрытия – непосредственно слоя, переходной зоны и основного материала. Боридный слой, получаемый в результате чистого борирования, обладает высокой твердостью, износостойкостью и высокой хрупкостью, которая ограничивает применение борированных изделий в условиях динамических нагрузок. Для снижения хрупкости боридного слоя применяют его легирование различными элементами: никелем, хромом, медью и др. При этом удается не только снизить хрупкость боридного слоя, но и дополнительно придать ему такие свойства, как повышенная тепло- и коррозионная стойкость.

На рисунке 3 представлено боридное покрытие, легированное титаном. Видно, что

в результате легирования титаном микроструктура боридного слоя значительно изменилась: произошло явное разделение боридного слоя на 2 части – верхнюю, имеющую высокие показатели твердости, износостойкости и коррозионной стойкости и представляющую собой смесь боридов железа, титана а также карбида титана. Присутствие карбида титана объясняется высоким сродством титана к углероду, в результате чего при одновременном боротитанировании углеродистых сталей наблюдается встречная диффузия углерода и титана. Причем, чем больше углерода содержится в стали, тем интенсивнее диффузия. В результате при одновременном боротитанировании толщина боридного слоя несколько снижается, боридные иглы значительно утолщаются, твердость их возрастает. Также в результате встречной диффузии под боридным слоем формируется переходная

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В УПРОЧНЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

зона, легированная карбидами титана, имеющая повышенную твердость и несколько охрупчивающая боротитанированный слой. Однако, тонкий слой боридов титана, образующийся на поверхности изделия в процессе одновременного боротитанирования кроме высокой твердости и износостойкости, обладает высокой коррозионной стойкостью в растворах солей и кислот, что позволяет рекомендовать боротитанирование для упрочнения деталей строительной техники, работающей в условиях абразивного износа в сочетании с коррозионно-активной средой.

На рисунке 4 представлено боридное покрытие, легированное хромом в результате

одновременного насыщения бором и хромом. Легирование хромом позволяет наряду со снижением хрупкости повысить теплостойкость и коррозионную стойкость в щелочных средах. Боридные иглы при этом утолщаются и закругляются на концах.

На рисунке 5 представлена тонкая структура боридного слоя на стали 5 ХНВ, полученная методами растровой электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Изображение получено на расстоянии 20 мкм от поверхности образца. Белыми стрелками отмечены частицы борида Fe_2B , расположенные на границах кристаллов FeB .

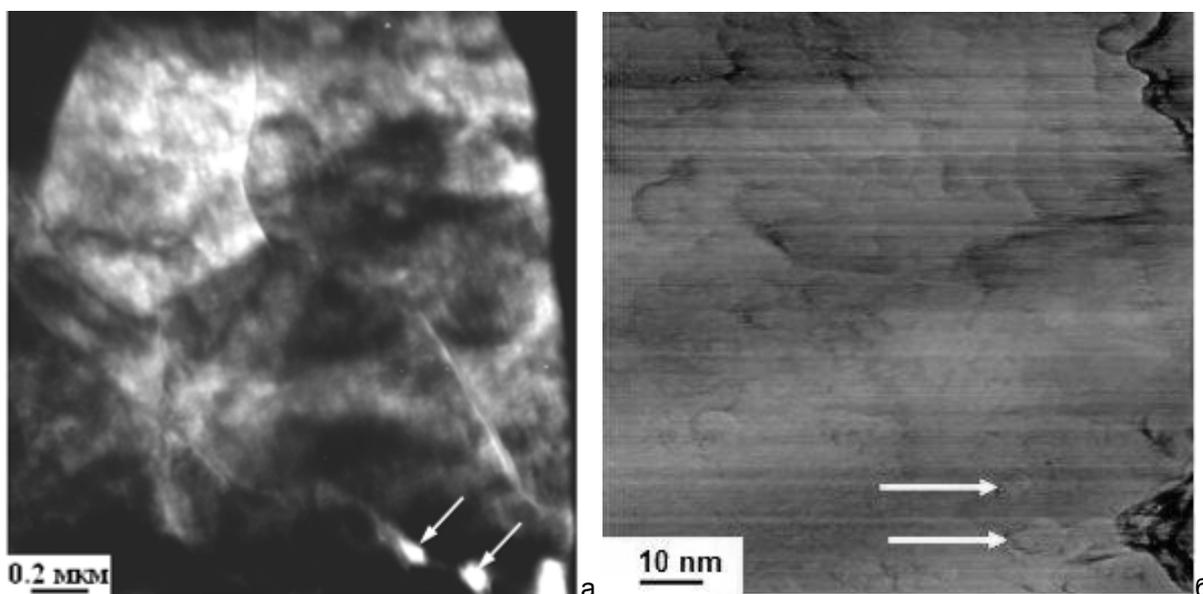
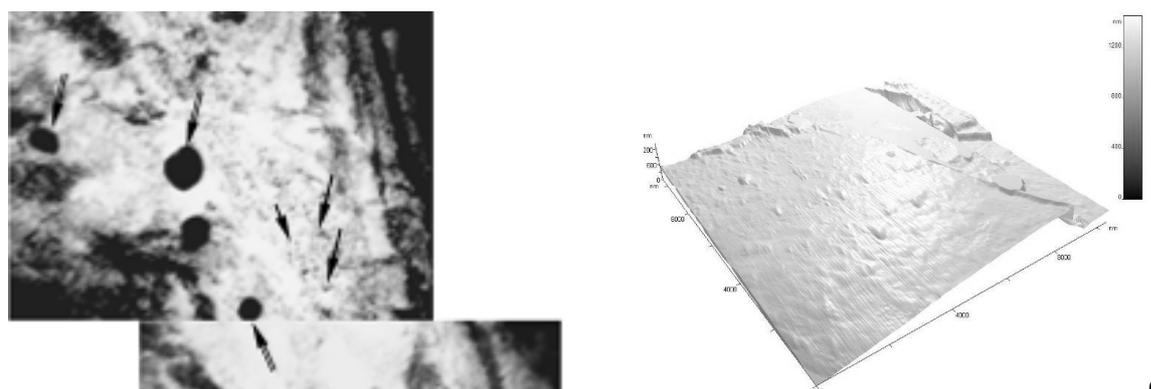


Рисунок 5 - Тонкая структура борированной стали 5ХНВ, полученная методами: а) – РЭМ, б) – АСМ.

На исследованных сталях боридный слой состоит преимущественно из борида железа Fe_2B , лишь на поверхности встречаются небольшие включения боридов железа FeB , в небольших количествах встречаются еще 3 фазы: бориды железа Fe_2B и Fe_8B и карбоборид $Fe, Cr_{23}(C, B)_6$. Хром собственных боридов при процессах совмещенного борхромирования не образует, однако легирует карбобориды железа, причем количество хрома в карбоборидах типа $M_{23}C_6$ значительно (в 2–10 раз) выше, чем в карбидах вида M_3C [2]. Борид Fe_2B обнаруживается как методом РСА, так и методом ПЭМ. На поверхности материала в случае образования больших количеств моноборида железа

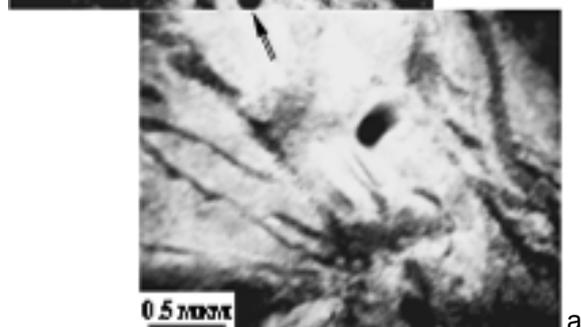
частицы боридов Fe_2B располагаются по границам кристаллов боридов FeB и имеют, в основном, округлую форму (рисунки 5,7). Размеры таких частиц, как правило, не превышают 10–20 нм [3].

В борированном слое частицы карбоборидов имеют округлую форму и малый размер (~10 нм) и расположены на дислокациях в α -фазе. При удалении от борированной поверхности вглубь материала на расстояние, приблизительно 80 мкм, наряду с мелкими частицами, находящимися на дислокациях, обнаруживаются также частицы, не связанные с дислокациями (рисунок 6) [4].

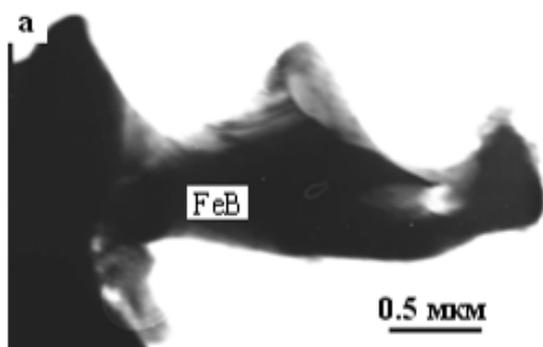


б

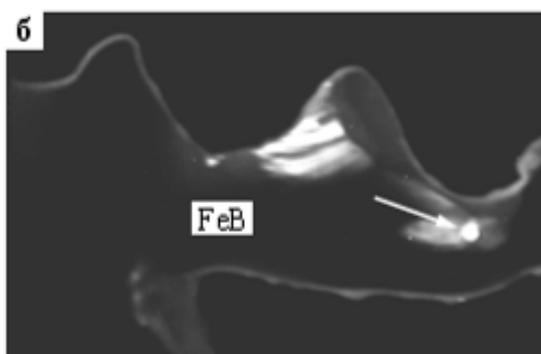
Рисунок 6 – Тонкая структура борированной стали 5XNB. Изображение получено на расстоянии 80 мкм от поверхности образца: а – методами РЭМ, б – методом АСМ. Черными стрелками на (а) отмечены мелкие частицы карбоборида $Fe, Cr_{23}(C,B)_6$, расположенные на дислокациях, двойными стрелками – крупные отдельно расположенные.



а



а



б

Рисунок 7 – Тонкая структура борированной стали 45. Изображение получено на поверхности образца: а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение. Белой стрелкой на (б) отмечена частица борида Fe_2B

Из рисунка 6 видно, что эти частицы также имеют округлую форму. Их размер значительно больше по сравнению с частицами, расположенными на дислокациях, и составляет величину ~ 60 нм. По мере дальнейшего удаления (до глубины ~ 150 мкм) в материале присутствуют только крупные частицы карбоборида. При этом их размеры возрастают до величины ~ 150 нм, возрастает и их плотность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А.,

Гармаева И.А. Ползуновский Вестник №3 2007. С. 28–34.

2. Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Власова О., А., Козлов Э.В., Гармаева И.А. Упрочняющие технологии и покрытия №1 2008. С. 20-27.

3. А.М. Гурьев, О.А. Власова, С.Г. Иванов. Коллективная монография «Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов. /отв. Ред. В.Е. Громов.- Новокузнецк: Изд-во НПК, 2009г.-613 с.

4. SURFACE ALLOYING OF STEEL. M.A. Guriev, S.G. Ivanov, A.M. Guriev. 17 international conference production and management in the steel industry, Poland, Zakopane, 25-27.06.2009. p.12 – 14.