

А. М. Гурьев, д-р техн. наук, С. Г. Иванов, канд. техн. наук, Барнаул, Россия

## **МЕХАНИЗМ ДИФФУЗИИ БОРА, ХРОМА И ТИТАНА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ЛЕГИРОВАНИИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ**

*Рассмотрены механизмы совместной диффузии атомов бора, хрома и титана в поверхность стали при комплексном легировании ее этими элементами. Дано объяснение этим явлениям с точки зрения управления течением процесса и получения диффузионных слоев с требуемыми свойствами.*

*Розглянуто механізми спільної дифузії атомів бора, хрому й титану в поверхню стали при комплексному легуванні її цими елементами. Дано пояснення цим явищам з погляду керування плином процесу й одержання дифузійних шарів з необхідними властивостями.*

A. M. GUREV, S. G. IVANOV

### **THE MECHANISM OF DIFFUSION OF THE PINE FOREST, CHROME AND THE TITAN AT SIMULTANEOUS MULTICOMPONENT SUPERFICIAL ALLOYING IRON-CARBON ALLOYS**

*Mechanisms of joint diffusion of atoms of a pine forest, chrome and the titan in a surface of steel are considered at complex alloying by its these elements. The explanation is given to these phenomena from the point of view of management of current of process and reception diffusion layers with demanded properties.*

На современном этапе развития техники и технологий детали машин работают зачастую в экстремальных условиях, сочетающих в себе множество факторов: повышенные температуры, воздействие абразивных частиц, высокие удельные давления и т.д. Наиболее частой причиной выхода из строя деталей машин и инструмента является деградация геометрических размеров по причине износа. В рамках растущего дефицита многих легирующих элементов и повышения их цены в большинстве случаев целесообразно изготовление деталей машин и инструмента из объемно-легированных сталей, так как это ведет к удорожанию изделия или конструкции в целом. Наиболее приемлемым выходом из данной проблемы является нанесение покрытий.

Одним из достаточно часто используемых методов нанесения покрытий является химико-термическая обработка. Она позволяет упрочнять детали произвольной формы и размеров, получать покрытия с применением некоторых элементов, которыми объемное легирование попросту невозможно. Кроме того, химико-термическая обработка позволяет совместить термическую обработку с процессом нанесения упрочняющего покрытия и таким образом экономить трудовые и энергоресурсы.

Борирование как процесс упрочнения стальных изделий машин и инструмента известен давно, однако применяется недостаточно широко по срав-

нению с цементацией, азотированием и нитроцементацией. Это обусловлено тем, что: поверхностное насыщение бором требует высокой культуры производства, кроме того, боридные слои имеют также существенный недостаток как высокая хрупкость. Не смотря на это, износостойкость боридных слоев в 2–2,5 раза выше износостойкости азотированных и в 3,5–4,5 раза выше – цементованных.

Известно несколько путей снижения хрупкости боридного слоя:

1. Стремиться к получению однофазных покрытий, состоящих из фазы  $\text{FeB}_2$ ;
2. Получать возможно более тонкие покрытия [1]
3. Наносить комплексные покрытия, кроме бора содержащие также такие элементы как хром, медь, никель и др.

На наш взгляд наиболее предпочтительным является третий вариант – получение комплексных многокомпонентных покрытий, однако традиционно получаемые покрытия отличаются высокой стоимостью вследствие того, что процесс насыщения приходится вести в несколько стадий, последовательно насыщая изделие каждым элементом в отдельности [2, 3].

В ГОУ ВПО АлтГТУ им. Ползунова нами разработаны составы и технологии комплексного одновременного насыщения несколькими элементами: борохроммирование, боротитанирование, боросилицирование и т.д. На эти технологии получены патенты РФ на изобретения, составы насыщающих сред и способы их приготовления охраняются в режиме «ноу-хау».

В данной работе выполнены исследования по влиянию различных легирующих добавок в насыщающие смеси для диффузионного борирования. Исследования проводились с использованием следующего оборудования и с применением следующих методик: оптическая микроскопия выполнялась на микроскопах «МИМ-10» и «NEOPHOT-32», электронная микроскопия выполнялась на микроскопе JEOL JSM-7401F со встроенной системой микроанализа INCA X-MAX производства Oxford Instruments, исследование атомной структуры проводилось на атомно-силовом микроскопе «FEMTOSKAN FSB-29». Общий вид микроструктуры диффузионного борохроммированного слоя приведен на рисунках 1 и 2.

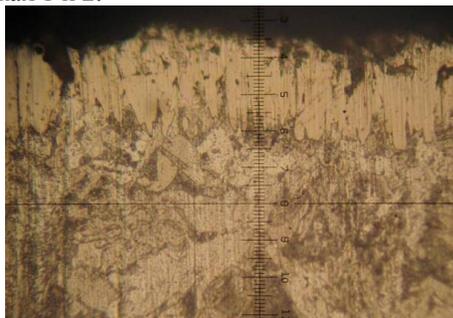


Рисунок 1 – Общий вид боридного слоя

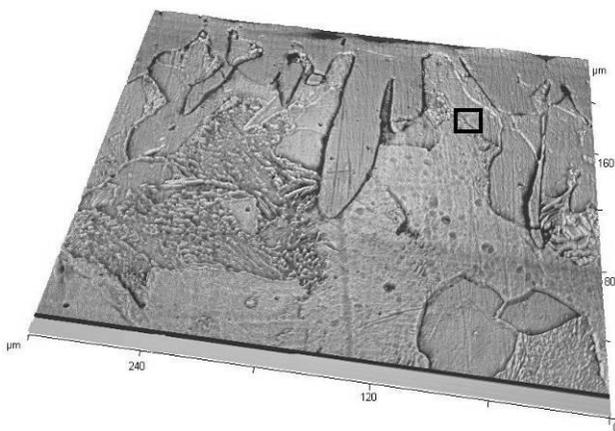


Рисунок 2 – Микроструктура переходной зоны борхромированного слоя (рамкой выделен фрагмент, показанный на рисунке 3)

Как видно из представленного рисунка 1, микроструктура комплексных слоев на основе бора похожа на классическую игольчатую микроструктуру боридного слоя. Данная структура является более выгодной с точки зрения энергетических параметров, характеризующих процесс скалывания покрытия под действием касательных напряжений.

На рисунке 3 представлена микроструктура контакта боридной иглы (левый угол изображения, возле шкалы по оси Z) и переходной зоны с зародышами боридов имеющими глобулярную форму.

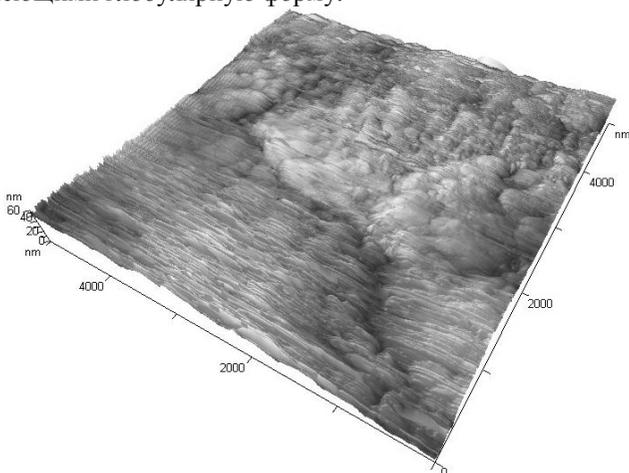


Рисунок 3 – Тонкая микроструктура границы боридной иглы и переходной зоны

Как можно судить по представленному рисунку, механизм диффузии бора имеет несколько стадий и отличается от механизма диффузии других элементов, так как растворимость бора в железе достаточно мала даже при высоких температурах процесса насыщения. Однако, этих температур достаточно для активации атомов бора, приводящей к образованию содинений бора и железа – боридов. Такой механизм называется реакционным и может осуществляться несколькими путями:

1. Непосредственное образование боридов из свободных атомов бора и железа [1];
2. Легирование цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$  бором с образованием бороцементита ( $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ ), имеющего переменный состав, который по мере легирования приобретает формулу  $\text{Fe}_3\text{B}$ . Но так как данное соединение является неустойчивым, то оно распадается на моно- и гемиборид железа ( $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ ). Кроме легирования цементита бор способствует образованию специальных карбидов железа состава  $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ , небольшие количества которых обнаруживаются в подборидной зоне [4]. Могут образовываться и другие бориды, например,  $\text{FeB}_8$ . [3].

По мере подхода к границе раздела все новых атомов бора, фронт реакции смещается в сторону основного материала.

Немаловажное значение на диффузию бора оказывает и наличие и разветвленность межзеренных границ, так как диффузионная активность всех без исключения атомов здесь будет повышена в силу высокой концентрации различных дефектов кристаллического строения и локализации на краях зерен большого количества дислокаций [5, 6, 7].

Субатомная структура подборидной зоны представлена на рисунке 4.

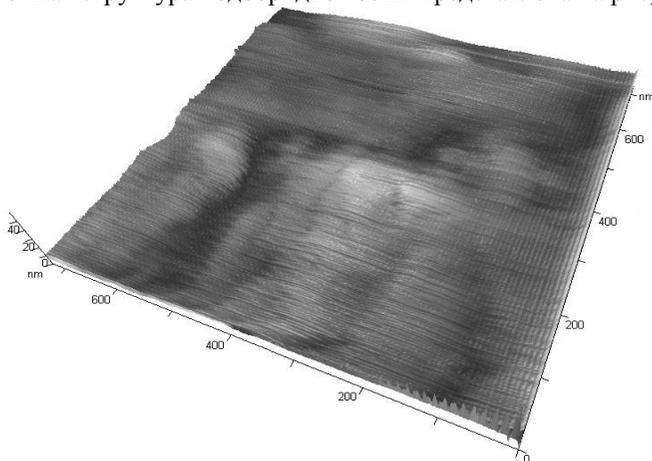


Рисунок 4 – Субатомная структура подборидной зоны

На представленном рисунке показан субатомная структура подборидной зоны. Четко прослеживается наличие дислокационных дефектов кристаллического строения – наличие лишних плоскостей, краевые дислокации. Более мелкие дефекты кристаллического строения, такие как вакансии, лишние атомы и т.п. представлены на рисунке 5.

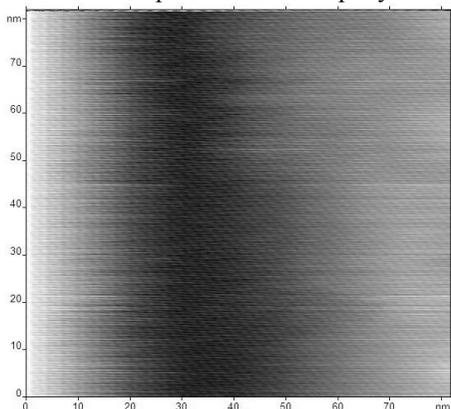


Рисунок 5– Атомная структура подборидной зоны

Диффузия легирующих элементов зависит от их природы. Так, элементы, являющиеся неметаллами (углерод, кремний, азот) конкурируют с атомами бора в местах захвата активированных атомов поверхностью материала в силу одинаковой химической природы. Так как электрохимические потенциалы бора и углерода находятся достаточно близко, то диффузии углерода в поверхность стали не наблюдается в силу того, что атомов углерода значительно меньше, чем бора и активность атомов бора несколько выше активности углерода. Таким образом идет преимущественно процесс борирования [1]. Кроме того, диффундирующий бор вытесняет углерод из поверхностного слоя материала, в результате чего подборидная зона оказывается обогащенной по углероду. По мере нарастания концентрации углерода в подборидной зоне скорость роста боридного слоя замедляется. Диффузия кремния также приводит к перераспределению углерода, кроме того, кремний имеет достаточно большое отличие электрохимического потенциала от бора, поэтому процесс одновременного боросилицирования термодинамически возможен. И более того, реализуем на практике. В случае, когда совместно с бором диффундирует элемент, относящийся к металлам (хром, титан и т.д.), имеющий абсолютное отличный электрохимический потенциал, механизм диффузии имеет некоторые отличия: захват активных атомов бора и легирующего элемента поверхностью материала происходит в разных местах. Таким образом, конкуренции между ними не наблюдается. Кроме того, скорость диффузии карбидообразующих элементов в стали ускоряется за счет встречной диффу-

зии углерода с образованием карбидов и карбоборидов различного состава. Этот процесс повышает твердость подборидной зоны, и, кроме того, преимущественно глобулярные частицы карбидных образований локализуют часть напряжений, возникающих в диффузионном слое, и таким образом повышают пластичность диффузионного слоя [8, 9].

**Список использованной литературы:** 1. *Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С.* Борирование стали. -М.: Металлургия, 1978. -239 с. 2. *Гурьев А.М.* Физические основы химико-термоциклической обработки сталей / *А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов и др.* – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 250с. 3. Повышение износо- и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного бороникелирования и борвольфрамирания. – [Фундаментальные проблемы современного материаловедения](#), *С. Г. Иванов, А. М. Гурьев и др.* №7. 2010, С 108–111. 4. *Лякишев Н.П.* Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т. 1996-2000. – 992+1024+448 с. 5. Влияние параметров борхромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя. – *А.М. Гурьев, С.Г. Иванов и др.* – Ползуновский вестник, 2007, №3, С 28–34. 6. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке. [Фундаментальные проблемы современного материаловедения](#). *А.М. Гурьев, С.Г. Иванов и др.* №1. 2005., С 39-41. 7. *Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М.* Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей. [Известия высших учебных заведений. Физика. 2000. Т. 43.](#) № 11. С. 269. 8. [Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия.](#) *Гурьев А.М., Иванов С.Г., и др.* [Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 1.](#) С. 20-27. 9. [Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали.](#) *Иванов С.Г., Гурьев М.А. и др.* [Современные наукоемкие технологии. 2010. № 7.](#) С. 170-172.

*Поступила в редколлегию 15.03.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. *Voroshnin L.G., Ljahovich L.S.* Borirovanie stali. -M.: Metallurgija, 1978. -239 s. 2. *Gur'ev A.M.* Fizicheskie osnovy himiko-termociklicheskoj obrabotki stalej / *A.M. Gur'ev, B.D. Lygdenov i dr.* – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2008. – 250s. 3. *Povyshenie iznosoi i korrozionnoj stojkosti stal'nyh detalej metodami kompleksnogo borovol'framirovanija.* – [Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenija](#), *S. G. Ivanov, A. M. Gur'ev i dr.* №7. 2010, S 108–111. 4. *Ljakishev N.P.* Diagrammy sostojanija dvojnnyh metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3 t. 1996-2000. – 992+1024+448 s. 5. *Vlijanie parametrov borohromirovanija na strukturu stali i fiziko-mehaničeskie svojstva diffuzionnogo sloja.* – *A.M. Gur'ev, S.G. Ivanov i dr.* – *Polzunovskij vestnik*, 2007, №3, S 28–34. 6. *Osobennosti formirovanija struktury diffuzionnogo sloja na litoj stali pri himiko-termičeskoj obrabotke.* [Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenija](#). *A.M. Gur'ev, S.G. Ivanov i dr.* №1. 2005., S 39-41. 7. *Lygdenov B.D., Gur'ev A.M.* Blijanie sostava nasyvajuwej sedy na strukturu i svojstva diffuzionnogo sloja pri titanirovanii stalej. [Izvestija vysših učebynyh zavedenij. Fizika. 2000. T. 43.](#) № 11. S. 269. 8. [Fazovyj sostav i mehanizm obrazovanija diffuzionnogo sloja pri borirovanii stalej v uslovijah ciklicheskogo teplovogo vozdejstvija.](#) *Gur'ev A.M., Ivanov S.G., i dr.* [Uprochnjajuwe tehnologii i pokrytija. 2008. № 1.](#) S. 20-27. 9. [Vlijanie dobavok legirujuwih jelementov v obmazku na processy kompleksnogo mnogokomponentnogo diffuzionnogo nasywenija stali.](#) *Ivanov S.G., Gur'ev M.A. i dr.* [Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2010. № 7.](#) S. 170-172.