

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ

А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, Б.Д. Лыгденов, О.А. Власова, Е.А. Кошелева,
М.А. Гурьев, И.А. Гармаева

Повышение стойкости деталей машин и инструмента за счет диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами является актуальной задачей современного материаловедения. Химико-термической обработкой (ХТО) изделиям можно придать такой комплекс эксплуатационных свойств, достижения которого объемным легированием или невозможно (азотирование, борирование), или экономически невыгодно (хромирование, хромониобирование и др.).

Диффузионное насыщение поверхности сталей, чаще всего, производят при высокотемпературной изотермической или изотермически-ступенчатой выдержке с полной перекристаллизацией стали в аустенитное состояние. Это приводит к перегреву – структура и механические свойства, кроме твердости и износостойкости, ухудшаются. Есть и другие недостатки в технологии ХТО с высокотемпературной выдержкой в процессе насыщения: коробление от обычной ползучести, высокая энергоёмкость процесса [1, 2].

Указанные недостатки можно устранить при диффузионном насыщении поверхности сплава в режиме термоциклирования (ТЦО) [3-7], а также при совместном насыщении поверхности металла несколькими химическими элементами т.е. при двух- или многокомпонентном насыщении [8, 9].

В настоящей работе проводили борохромирование сталей Ст3, 30Х, 30ХМ и У8 из образков, в которых в качестве насыщающего компонента применялись борид хрома, оксид хрома, феррохром и алюминотермическая смесь на основе оксида хрома. В качестве защитного и основного насыщающего компонента применяли карбид бора. Для сравнения физико-механических свойств получающихся слоев проводили также борирование в образке на основе карбида бора. Температура всех процессов насыщения составляла 1000°С, время - 6 ч.

В результате насыщения на сталях были получены слои, показанные на рисунке 1. Видно, что с увеличением степени легированности стали претерпевают изменения как толщина и микроструктура диффузионного

слоя, так и микроструктура переходной зоны. При насыщении бором стали Ст3, где содержание легирующих элементов минимально общая толщина боридного слоя достигает 200 мкм, а толщина сплошного слоя боридов – 100 мкм. Микроструктура боридного слоя представляет собой иглы, сросшиеся в основаниях – такая структура является характерной для диффузионных слоев на основе бора. Благодаря развитой поверхности раздела между слоем боридов и переходной зоной, диффузионный слой хорошо удерживается на металле и при соблюдении рекомендуемых параметров процесса насыщения и отсутствии ударных нагрузок скалывания слоя не происходит.

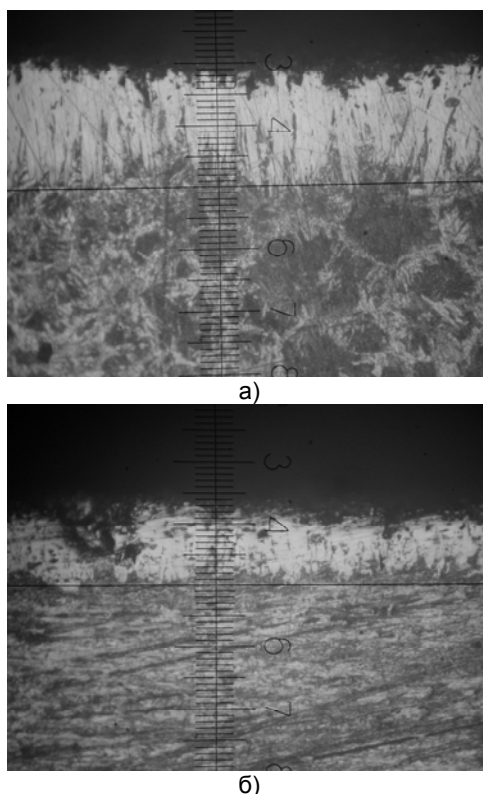
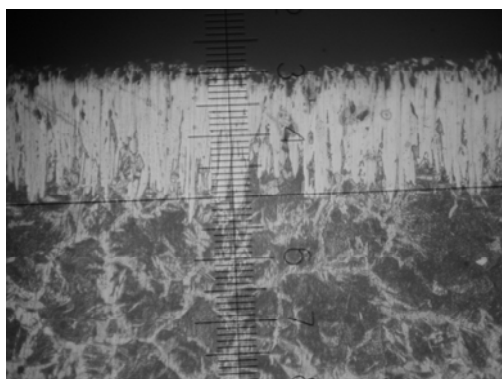


Рис. 1. Микроструктура боридных слоев на сталях Ст3 (а) и 30ХМ (б)

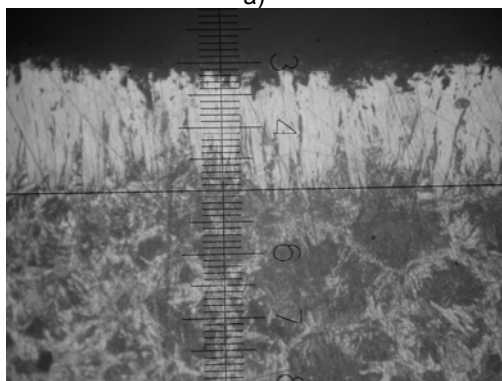
С увеличением содержания легирующих элементов толщина диффузионного боридного слоя снижается, а толщина сплошного слоя боридов остается практически неизмен-

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ

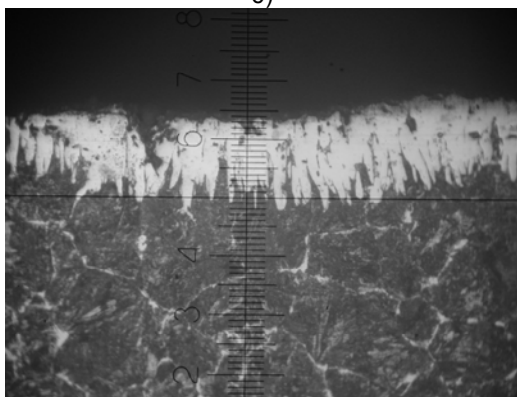
ной (рисунок 1 б). Как видно из рисунка, в случае борирования стали 30ХМ при прочих равных условиях толщина слоя боридов снижается до 130 мкм, а толщина сплошного слоя боридов практически не изменяется и в среднем составляет 90 мкм, – то есть растет компактность слоя. Одновременно с ростом компактности боридного слоя усложняется его строение – боридные иглы становятся закругленными, наблюдается их рост не только по нормали к поверхности, но и под некоторым углом толщина боридных игл также увеличивается. Это объясняется влиянием хрома и молибдена, которые содержатся в сталях в основном в виде различных карбидов, которые тормозят продольный рост боридного слоя.



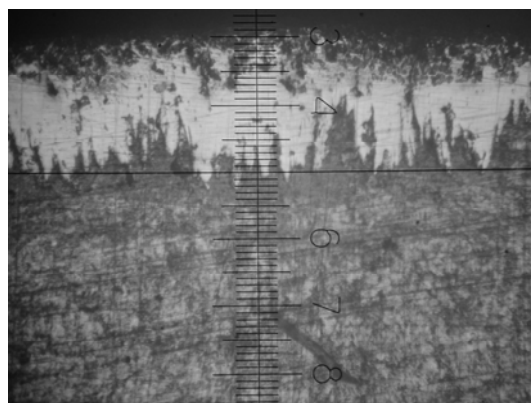
а)



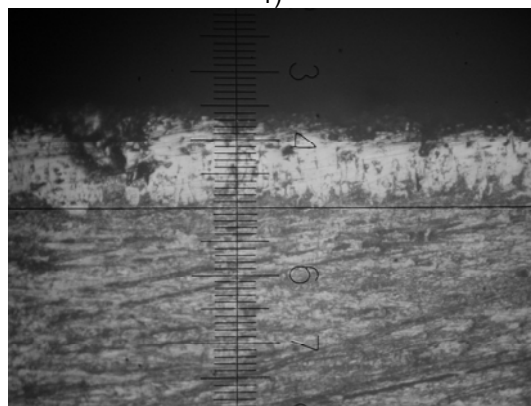
б)



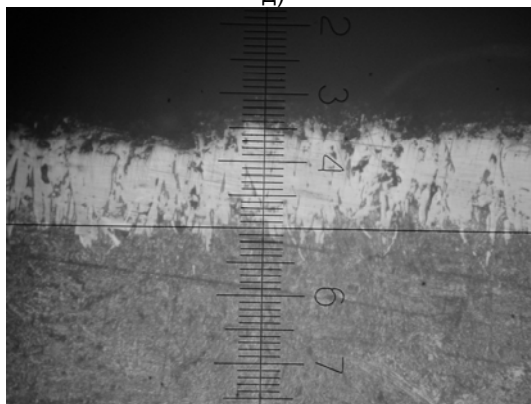
в)



г)



д)



е)

Рис. 2. Микроструктура диффузионных слоев в зависимости от состава обзапки: а, в, д – борохромирование сталей Ст3, 30Х, 30ХМ соответственно; б, г, е – борирование сталей Ст3, 30Х, 30ХМ соответственно

Значительные изменения с увеличением степени легированности претерпевает также переходная зона. Если в стали Ст3 структура переходной зоны практически ничем не отличается от структуры основного металла и представляет собой значительно (в 20–50 раз) выросшие зерна с выделением феррита и бористого цементита по краям. То в стали 30ХМ, легированной такими сильными кар-

бидообразующими элементами как хром и молибден, при насыщении зерно практически не растет. Микроструктура ее представляет собой мелкое зерно с включениями карбидов и карбоборидов как по границам, так и внутри зерна. Причем бор в большей степени легирует карбиды, расположенные по границам зерен, так как в данных областях его диффузионная активность наиболее велика (рисунок 2).

Следует отметить, что большие выдержки в процессе борирования способствуют получению видманштеттова феррита в сталях, что свидетельствует о значительном перегреве приводящем к ухудшению их физико-механических свойств.

На всех сталях в случае одновременного двухкомпонентного насыщения бором и хромом заметно некоторое увеличение толщины диффузионного слоя. Переходная зона и сердцевина металла имеют более благоприятную структуру – более мелкое зерно, меньшее количество видманштеттова феррита, что отразится на таких важных свойствах, как ударная вязкость и износостойкость. С увеличением степени легированности стали видманштеттовы структуры вообще не появляются как при борировании, так при борохромировании. Графики микротвердости борированных и борохромированных диффузионных слоев приведены на рисунках 3 и 4.

Как видно из рисунка 3, толщина боридного слоя на стали Ст3 достигает 250 мкм, причем она монотонно убывает до микротвердости переходной зоны по всей толщине диффузионного слоя. На стали 30ХМ распределение микротвердости имеет вид площадок, что можно объяснить образованием различных новых фаз вследствие повышенного содержания легирующих элементов по сравнению со сталью Ст3, в частности молибдена и хрома. Причем убыль микротвердости носит не монотонный, а ступенчатый характер, что также можно истолковать как переход между различными фазами в диффузионном слое.

При одновременном насыщении поверхности различных сталей бором и хромом из диборида хрома падение микротвердости диффузионного слоя от поверхности к сердцевине имеет исключительно ступенчатый вид. Также необходимо отметить, что максимальная поверхностная микротвердость также возрастает приблизительно в 3 раза. Таким образом сказывается влияние насыщения хромом и бором с образованием их боридов и карбоборидов. Данное предположе-

ние косвенно подтверждается тем, что максимальная микротвердость борохромированных сталей Ст3 и 30Х приблизительно равны между собой. Так как в данном случае поверхностная концентрация хрома почти одинакова. Влияние хрома на толщину диффузионного слоя сказывается в ее увеличении по результатам дюрометрических испытаний за счет миграции атомов углерода и части атомов хрома от поверхности в более глубокие слои с образованием различных карбидов.

В работе [8] проводили последовательное борохромирование. Для борирования применяли порошковую металлотермическую смесь на основе оксида бора. Для борохромирования – соответственно металлотермическую смесь на основе оксида хрома III. Хромирование проводили после борирования. При этом получалось покрытие, верхний слой которого состоял из гемиборида хрома, под которым располагался гемиборид железа. Данная обработка позволила снизить микрохрупкость, повысить нагрузочную способность и коррозионную стойкость упрочненных изделий из углеродистых сталей по сравнению с однокомпонентным борированием.

Тормозящее действие хрома при одновременном борохромировании можно проследить на примере стали Ст3 – по результатам дюрометрических исследований толщина боридного слоя в случае чистого борирования достигает 250 мкм, тогда как по результатам измерения толщины зоны боридов на микрошлифах толщина ее не превышает 200 мкм. Данный факт объясняется тем, что в процессе насыщения поверхности бором, углерод вытесняется в более глубокие слои. В результате в подборидной зоне образуются смешанные борокарбиды и карбобориды, также имеющие высокую микротвердость.

При одновременном же насыщении бором и хромом, хром препятствует диффузии углерода вглубь материала, связывая углерод в смешанные карбобориды. В результате чего дюрометрическая и оптико-микроскопическая оценки толщины диффузионного слоя совпадают и составляют величину около 200 мкм. При этом послойное распределение микротвердости диффузионного слоя имеет ступенчатый характер в силу преобладания на различной глубине различных соединений железа, хрома, бора и углерода. Максимальная микротвердость многокомпонентных диффузионных слоев возросла при этом, как уже отмечалось ранее, примерно в 3 раза.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ

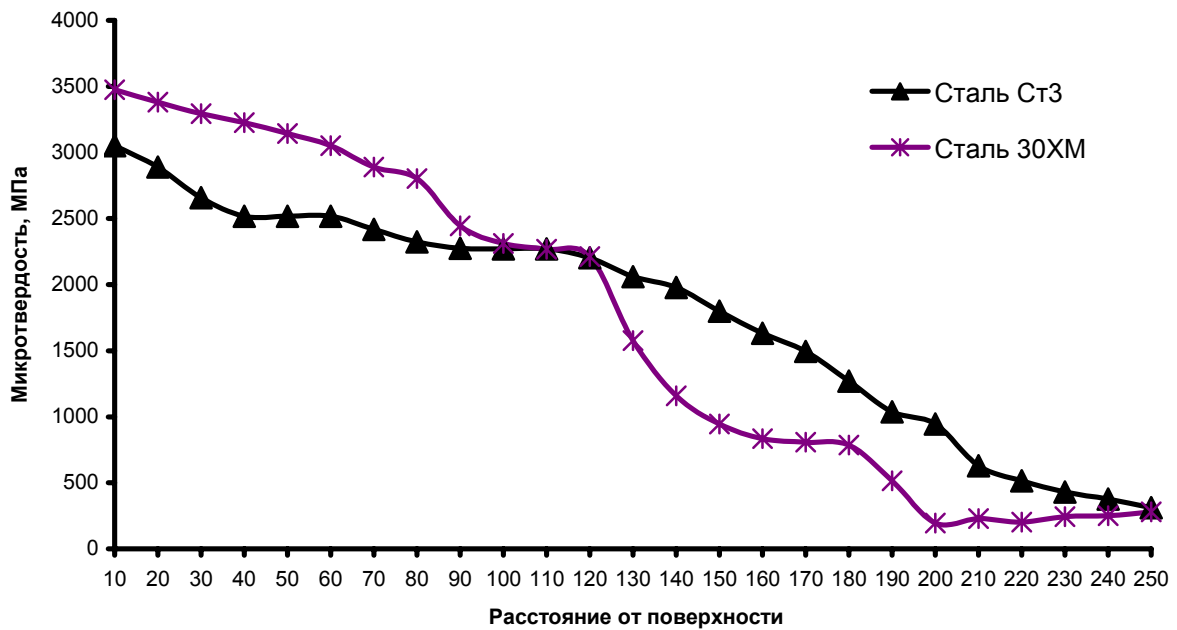


Рис. 3. Распределение микротвердости боридного слоя

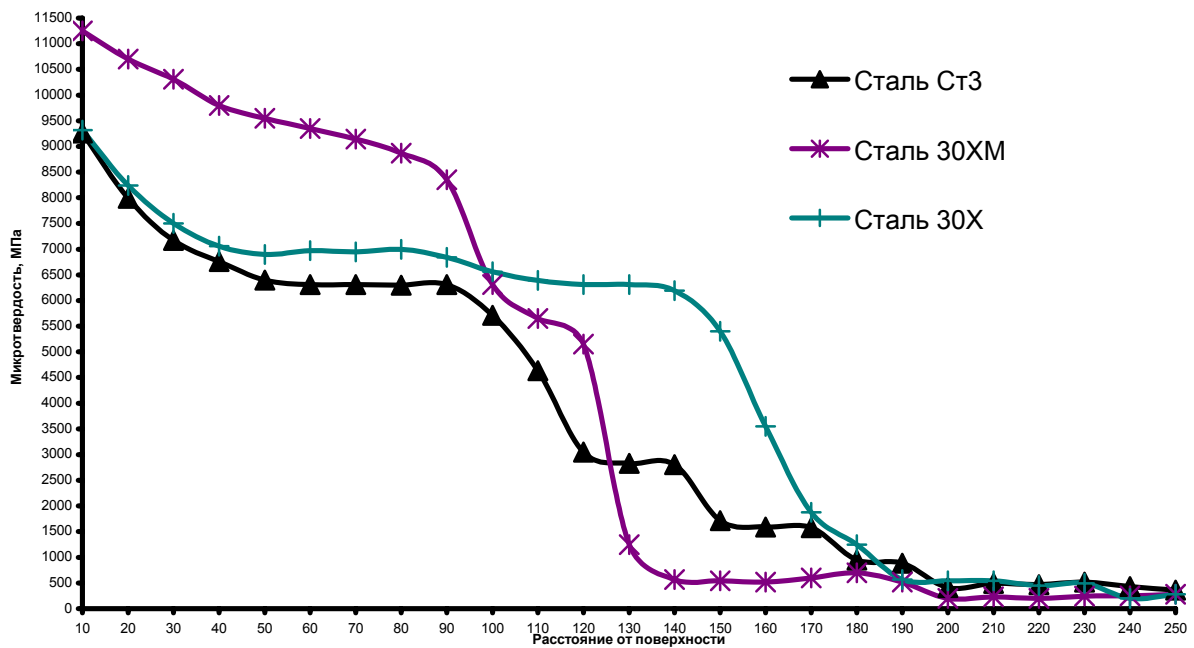


Рис. 4. Распределение микротвердости борохромированного слоя

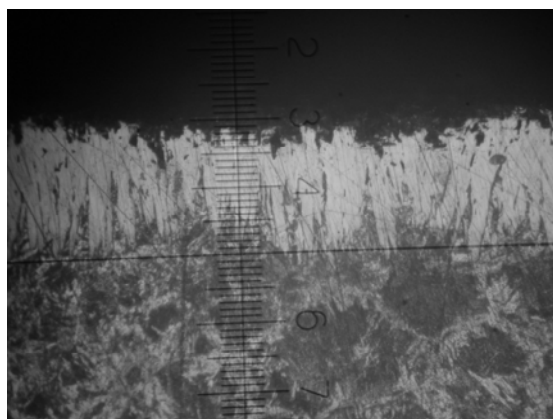
При этом микрохрупкость двухкомпонентных борохромированных диффузионных слоев либо не изменяется, либо уменьшается.

Необходимо отметить тормозящее действие хрома на рост зерна стали в процессе насыщения. Так как границы зерна и приграничные его зоны содержат максимум дефектов кристаллического строения, а атомы хрома по размерам соизмеримы с атомами же-

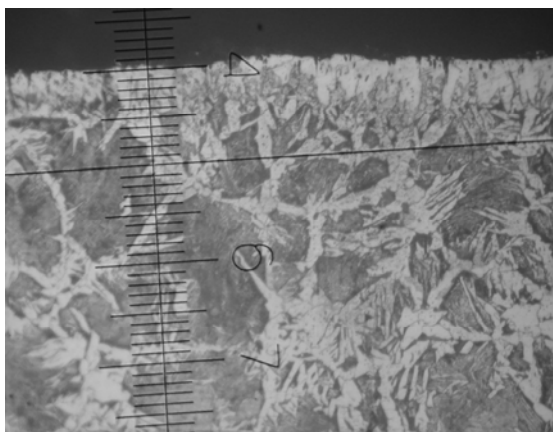
леза, то наиболее высокая скорость диффузии хрома будет наблюдаться по границам зерна. А так как по границам зерна интенсивнее диффундируют бор и углерод, то по границам зерна и в приграничных его зонах будут образовываться различные соединения бора, углерода и хрома, которые задерживают рост зерна.

Влияние температуры процесса насыщения на толщину диффузионных слоев не-

зависимо от их состава демонстрируется рисунком 5.



а)



б)

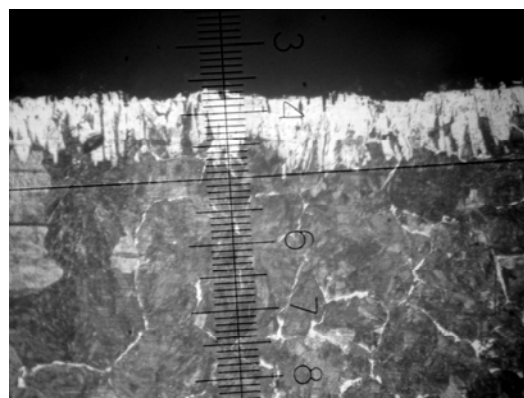
Рис. 5. Влияние температуры насыщения на толщину диффузионных слоев: а – температура насыщения 1050°С, б – 950°С

Время насыщения в обоих случаях не менялось и составляло 6 часов.

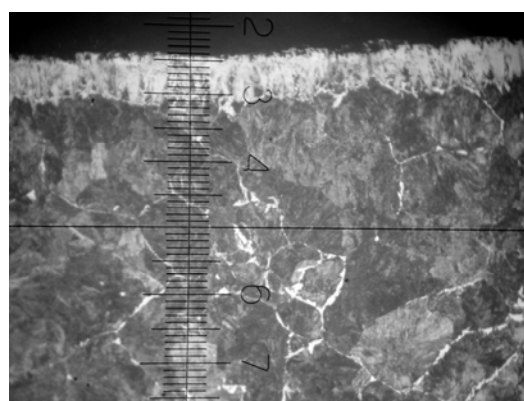
Зависимость толщины и микроstructures слоя от режима насыщения показаны на рисунке 6.

Температура и время при обоих процессах насыщения не изменялись и составили 950°С и 6 часов соответственно. При термоциклическом насыщении дополнительно вводились следующие параметры: минимальная температура и время цикла.

В качестве минимальной температуры цикла была принята температура 550°С, время цикла было выбрано в районе 1 часа. Выбор минимальной температуры в цикле осуществлялся с учетом того, чтобы весь образец в насыщающей обматке охладился ниже температур фазовых превращений. Выдержки при минимальной температуре цикла не осуществляли.



а)



б)

Рис. 6. Влияние параметров процесса насыщения на толщину и микроstructure полученных слоев: а – изотермическое насыщение, б – термоциклическое насыщение

Как видно из рисунков, при замене изотермического процесса насыщения на циклический, толщина диффузионного слоя несколько уменьшилась, (на 10 – 15%) однако плотность и компактность диффузионного слоя, полученного по методу ХТЦО значительно возросли. Строение боридных игл также усложнилось, что сказывается на повышении адгезии диффузионного слоя. Микротвердость ХТЦО слоя несколько ниже, чем у изотермически обработанного, однако ее распределение более благоприятно в связи с возросшей компактностью. Наряду с незначительно снизившейся микротвердостью самого диффузионного слоя, микротвердость переходной зоны возросла в гораздо большей степени (рисунок 7).

Необходимо также отметить тот факт, что действительный размер зерна при замене изотермической ХТО на химико-термоциклическую обработку с временем цикла, равным 1 часу при том же общем времени насыщения, уменьшился в 2,5 – 5 раз.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ

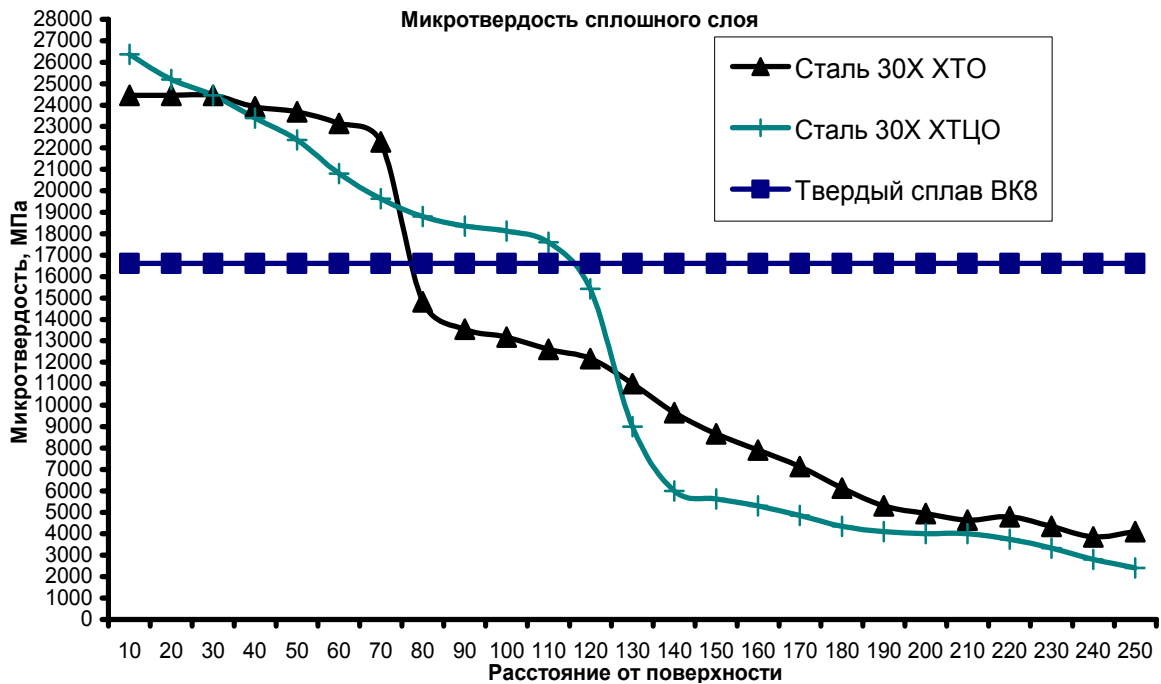


Рис. 7. Послойное распределение микротвердости в стали 30X

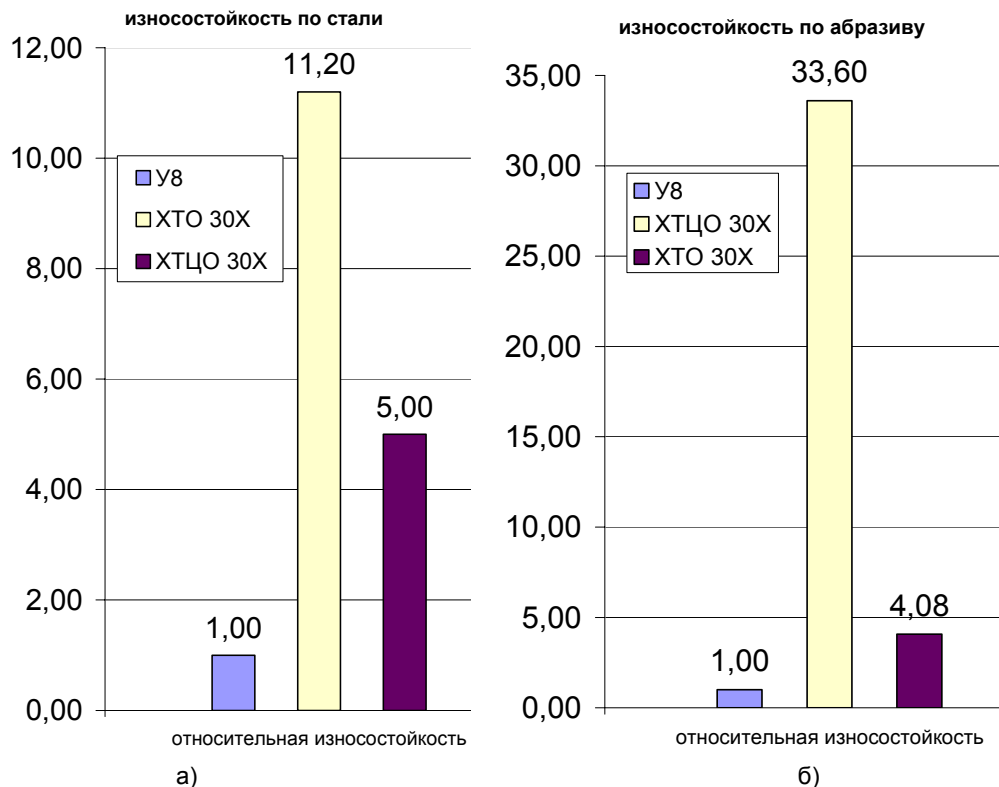


Рис. 8. Относительная износостойкость борхромированной стали 30X: а – адгезионный износ по стали 15ШХ, б – абразивный износ

Данный факт объясняется следующим. Диффузионный слой состоит из 2 частей: самого диффузионного слоя, представляющего

твердый раствор или химическое соединение, причем концентрация насыщающего элемента в данном случае – преимуществен-

ная – либо близка к предельной; и второй зоны – переходной, которая является буферной между диффузионным слоем и основным металлом. В случае химико-термоциклической обработки верхние слои переходной зоны, прилегающие к боридному, оказываются значительно больше обогащенными насыщающими элементами, чем при изотермическом насыщении, однако недостаточно для того, чтобы изменилась микроструктура. В результате многократных фазовых превращений и температурного и концентрационного градиентов, диффузия при циклически изменяющихся температурах протекает значительно интенсивнее. В результате этого кроме непосредственно диффузионного слоя, значительную роль начинают играть и верхние слои переходной зоны, более обогащенные насыщающими элементами по сравнению с изотермическим насыщением.

Немаловажную роль в процессе диффузии играют границы зерна, так как именно они имеют наибольшее количество дефектов кристаллического строения, облегчающих диффузию и способствующих ей. Так как при термоциклической обработке рост зерна происходит значительно медленнее, а иногда даже наблюдается дробление зерна, то суммарная площадь межзеренных границ будет больше, соответственно диффузия вглубь материала будет происходить на большую глубину.

Проведены сравнительные испытания на износостойкость упрочненных сталей. При испытаниях на адгезионный износ нагрузка на образец составляла 40Н, при абразивном износе – 4Н. В качестве абразивного материала была выбрана шлифовальная шкурка зернистостью 100 – 120 мкм. Результаты испытаний на износостойкость представлены на рисунке 8.

Видно, что независимо от способа насыщения упрочненные методами химико-термической обработки стали показывают на порядок более высокую износостойкость по сравнению с закаленной сталью У8.

Установлено, что износостойкость образцов, подвергнутых ХТЦО в случае высокой нагрузки при испытании на адгезионный износ понижена по сравнению с износостой-

костью образца, подвергнутого изотермической ХТО по причине меньшей толщины слоя, в результате чего происходит его продавливание и преждевременное разрушение (выкрашивание). При меньших нагрузках износостойкость упрочненной ХТЦО стали закономерно оказалось выше, чем у стали с диффузионным слоем, полученным ХТО. Данный факт объясняется тем, что диффузионные слои, полученные методами ХТЦО, имеют более высокую плотность и пластичность, чем изотермические.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник // Под ред. Л.С. Ляховича. - М.: Металлургия, 1981. - 424 с.
2. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. - М.: Металлургия, 1978. - 239 с.
3. Бондарь Б.С. Влияние термоциклирования при борировании на ударную вязкость углеродистых сталей // Химико-термическая обработка металлов и сплавов. - Минск, 1977. - С. 185 – 186.
4. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние. 1989. – 255 с.
5. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ.- 2000.- 216 с.
6. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. // Изв. Вузов. Физика. - №11. - 2000.- Т.43.- С. 269 - 270.
7. Transition zone forming By different diffusion techniques in borating process of ferrite - pearlite steels Under the thermocyclic conditions А.М. Guriev, E.V. Kozlov, B.D. Lygdenov, A.M. Kirienko, E.V. Chernykh // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - №2.- 2004.- С.54 – 60.
8. Галынская Н.А. Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов. Сб. науч. тр. / Под ред. Л.Г. Ворошнича. – Минск: Изд-во БНТУ, 2004. - С.48 – 52.
9. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г. и др. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - №1.- 2007.-С.30 -35.