

# Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на малоуглеродистой и штамповой стали в условиях термоциклирования под нагрузкой

Пугачева Н.Б., Быкова Т.М.

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В настоящее время накоплен большой опыт по нанесению и эксплуатации диффузионных боридных покрытий, которые весьма эффективны для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента, работающих в условиях трения без смазки или в коррозионных средах, а также при абразивном изнашивании. В таких экстремальных условиях борированный поверхностный слой претерпевает существенные изменения, что влияет на его эксплуатационные свойства. Различные газовые атмосферы также оказывают влияние на процессы деградации боридных покрытий. Такие газы, как азот и водород хорошо растворяются в сталях и могут существенно влиять на свойства поверхностных слоев, а кислород является активным окислителем и вызывает бурное образование оксидов. Вопросы влияния атмосферы на изменение строения и свойств различных, в том числе и боридных покрытий, до сих пор уделялось мало внимания. В связи с этим, интерес представляют исследования изменения структуры, химического состава и характер разрушения боридных покрытий в условиях резкого изменения температур в окислительных и восстановительных атмосферах. Диффузионные боридные покрытия наносили на образцы из углеродистой стали марки Ст3 и легированной стали 4Х5МФС в порошковых насыщающих смесях на основе карбида бора с галогенными активаторами. Температура выдержки в печи 900°C, длительность 5 ч. После борирования штамповой стали 4Х5МФС легирующие элементы образуют бориды в покрытии, а также они тормозят процесс насыщения бором – при одинаковых режимах насыщения на стали 4Х5МФС формируется покрытие на 5 – 10 мкм тоньше по сравнению с малоуглеродистой сталью Ст3, а так же меняется характер распределения бора по толщине покрытия.

Микроструктура покрытий на разных сталях также отличается: на углеродистой стали Ст3 борированный слой имеет игольчатое строение состоит из боридов железа FeB, Fe<sub>2</sub>B и характеризуется максимальной микротвердостью 1550 HV 0,5, (рис1 а); на штамповой стали 4Х5МФС сформировалось двухслойное покрытие с внешней игольчатой зоной (FeB и Fe<sub>2</sub>B) с микротвердостью 1600 HV 0.5 и внутренней мелкозернистой зоной (Cr<sub>7</sub>B<sub>3</sub>) (рис1 б).

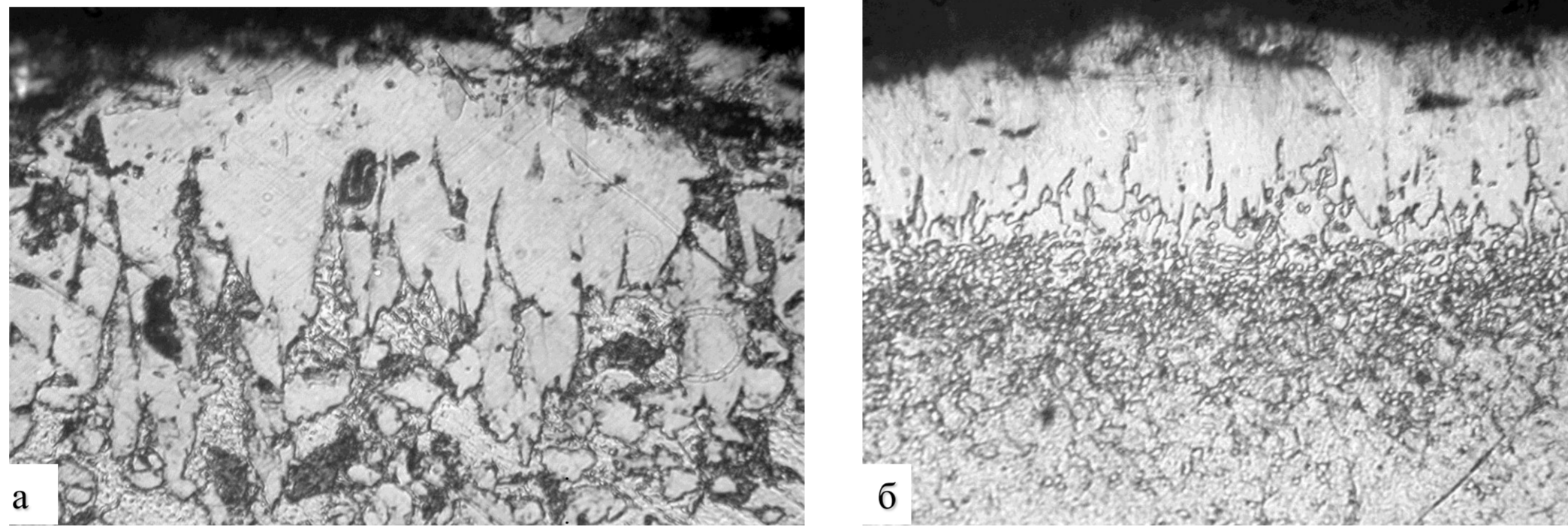


Рисунок1 – Микроструктура исследованных боридных покрытий: а – на углеродистой стали Ст3; б – на штамповой стали 4Х5МФС

Характер распределения бора по толщине покрытий на сталях одинаков: максимальная концентрация этого элемента фиксируется вблизи поверхности, затем она плавно уменьшается по всей толщине покрытий и достигает содержания бора в основном материале. Характер распределения значений микротвердости совпадает с распределением бора по толщине покрытий.

На сталях хорошо различимы две зоны покрытия: внешняя с максимальной твердостью и переходная на границе с основой. Ширина переходной зоны на границе с основой определяется наличием или отсутствием в стали карбидообразующих элементов.

Игольчатое строение боридных покрытий может существенно снизить и показатели жаро- и коррозионной стойкости, поскольку кислород и химически активные реагенты легко проникают вдоль границ зерен на всю глубину покрытия. Атмосферы азота и особенно водорода могут повлиять на характер повреждения борированного слоя при термоциклировании под нагрузкой за счет исключения образования оксидов железа, укрепления связей между иглами боридов, а также между покрытием и основой.

Для оценки стойкости боридных покрытий к растрескиванию проведены испытания, позволяющие осуществлять циклический нагрев образцов до заданной температуры в условиях постоянно действующих механических напряжений растяжения. Режим термоциклирования – нагрев до 1000, 1100, и 1200°C, в различных атмосферах при растягивающих напряжениях 1,64 МПа и 9,84 МПа (таблица). Длительность цикла составляла 120 с (60 с нагрев и 60 с охлаждение) В процессе термоциклирования проводилась фотосъемка образцов в конце каждого цикла нагрева и охлаждения.

Исследования заключались в анализе характера деградации структуры диффузионных боридных покрытий на углеродистой конструкционной стали марки Ст3 при термоциклировании под нагрузкой в атмосфере азота, водорода и на воздухе.

Таблица – Количество циклов до локального (N1) и массивного (N2) повреждения боридных покрытий и до разрыва образца (N3) при термоциклировании в разных атмосферах.

№	Температура °С	Атмосфера	Марка стали	N1	N2	N3
1	1000	Воздух	Ст3	2	10	56
			4Х5МФС	2	50	100
2		Азот	Ст3	2	20	.*
			4Х5МФС	1	30	.*
3		водород	Ст3	.**	.**	50
			4Х5МФС	8	35	.*
1	1100	Воздух	Ст3	1	2	11
			4Х5МФС	2	4	37
2		Азот	Ст3	2	10	.*
			4Х5МФС	13	30	.*
3		водород	Ст3	5	.**	49
			4Х5МФС	2	5	13
1	1200	Воздух	Ст3	1	2	9
			4Х5МФС	.**	.**	5
2		Азот	Ст3	1	5	.*
			4Х5МФС	1	.**	7
3		водород	Ст3	2	.**	2
			4Х5МФС	1	.**	2

\*- образец до разрушения не испытывался

\*\* - поверхность образца с покрытием сохранялась гладкой

Изменение температуры при одновременном воздействии растягивающих напряжений вызывает появление микротрещин в покрытии из боридов железа. Атмосфера оказывает существенное влияние на дальнейший характер деградации борированного слоя. В окислительной атмосфере происходит проникновение атомов окислителя сквозь борированный слой на границу с основой, затем образование на этой границе продуктов окисления и выталкивание покрытия с разворотом игл боридов и разрывом связей между ними и основой

Проведенные исследования показали значительное влияние конечной температуры термоциклирования на стойкость покрытия. На рисунке 2 показано состояние покрытия при максимальной и минимальной температурах в циклах. Установлено, что разрушение покрытий происходит путем его постепенного отслаивания от поверхности образца. На стали марки Ст3 заметно развиваются процессы окисления, ускоряющие отслаивание борированного слоя. На штамповой стали марки 4Х5МФС происходит постепенное довольно медленное отслаивание боридов.

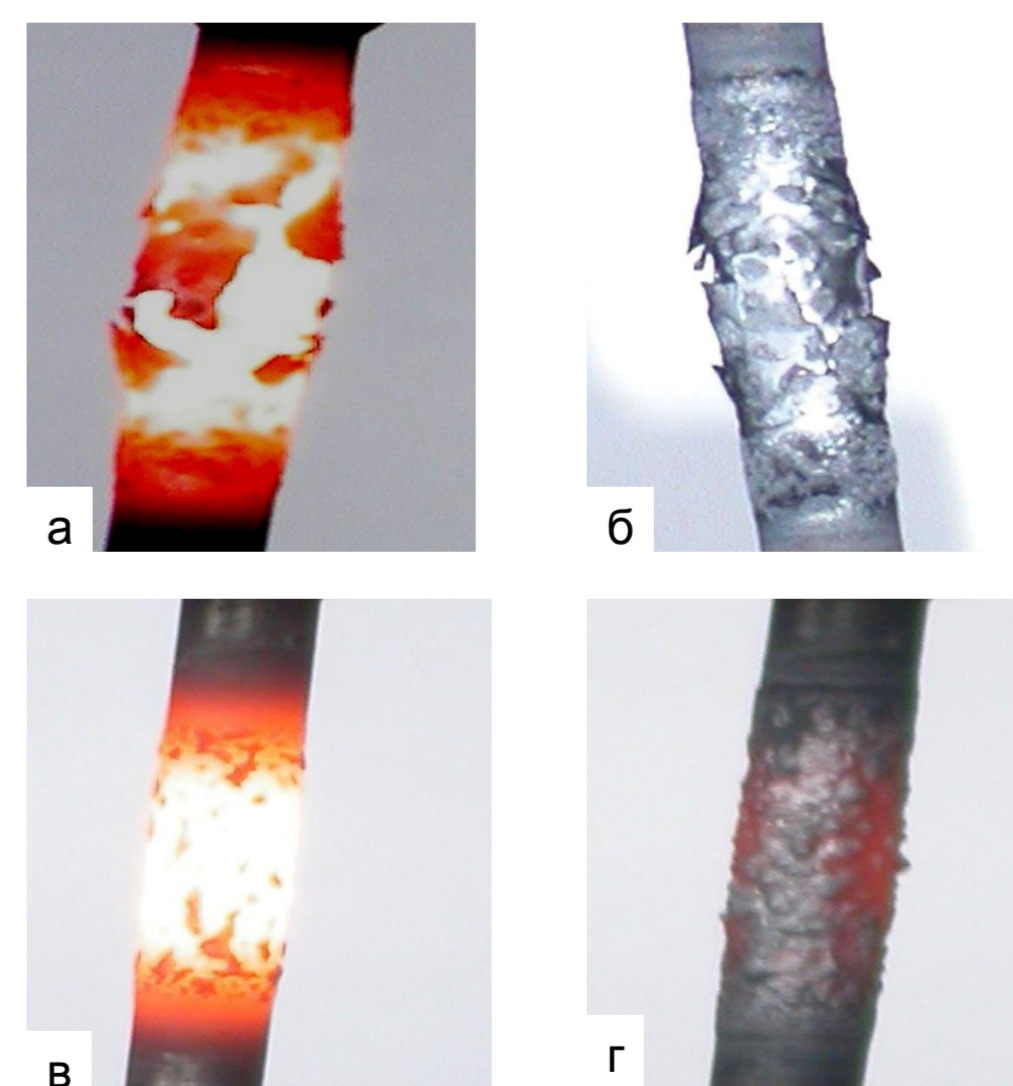


Рисунок 2– Поверхность образцов после термоциклирования до 1200 °С на воздухе: а, б - покрытие на стали марки 4Х5МФС в третьем цикле, в, г – покрытие на стали Ст3 во втором цикле: а, в - при максимальной температуре цикла, б, г - в охлажденном состоянии

## Заключение:

Долговечность боридных покрытий на штамповой стали 4Х5МФС существенно выше по сравнению с углеродистой Ст3 при умеренных температурах до 1000 °С. При повышении температуры происходит интенсивное окисление покрытия и его разрушение происходит при одном и том же количестве циклов

По результатам выполненных исследований определена структура, фазовый и химический составы диффузионных боридных покрытий на сталях разного химического состава. Показано, что на легированных сталях в покрытиях формируются не только бориды железа, но и легирующих элементов основы, при этом покрытие приобретает дисперсное строение, что положительно сказывается на его долговечности при термоциклировании. Бориды вольфрама, титана, молибдена и, особенно, хрома являются более стойкими к высокотемпературному окислению, формируют более пластичное покрытие с умеренными значениями микротвердости. При термоциклировании покрытий на легированной штамповой стали в области температур 800 – 1000 °С его долговечность существенно превышает боридное покрытие на углеродистой стали.