

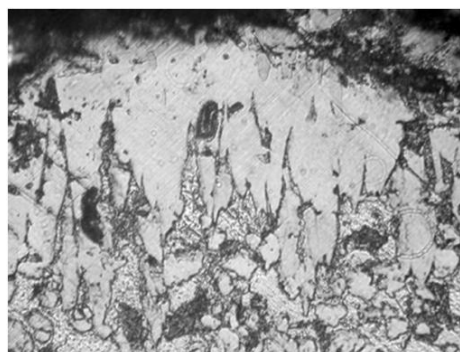
ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДИФФУЗИОННЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

В настоящее время накоплен большой опыт по нанесению и эксплуатации диффузионных боридных покрытий, весьма эффективных для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента, работающих в условиях трения без смазки, абразивного изнашивания, трения в коррозионных средах [1]. Для некоторых деталей, таких как штампы горячего деформирования или кристаллизаторы установок непрерывного литья, температура поверхности может достигать 1000 – 1300 °С. В таких экстремальных условиях борированный поверхностный слой претерпевает значительные изменения, что влияет на его эксплуатационные свойства. Интерес представляют исследования механизмов деградации боридных покрытий в условиях циклического изменения температур, когда из-за различий значений коэффициента термического расширения покрытия и основы на поверхности возникают остаточные напряжения. Целью данной работы было исследование характера разрушения боридных покрытий на штамповой стали 4Х5МФС при термомеханическом воздействии в условиях циклических нагревов под нагрузкой. Для сравнения было исследовано покрытие на малоуглеродистой стали марки Ст3 с целью выявления роли легирующих элементов основы, попадающих в покрытие, на его долговечность.

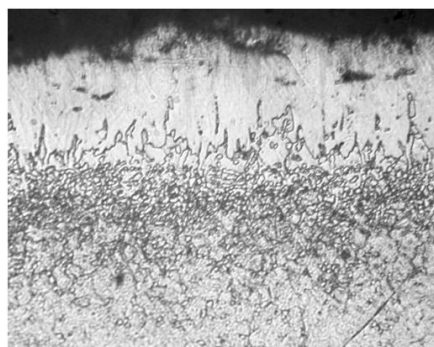
Боридное покрытие наносили в смеси порошков на основе карбида бора с галоидным активатором. Испытания на термоциклирование проводили при нагреве до температур 1000, 1100 и 1200 °С путем пропускания переменного тока через образец в окислительной (воздух, азот) и восстановительной (водород) атмосферах. Для ужесточения условий эксплуатации покрытий термоциклирование проводили под постоянно действующей нагрузкой – на один конец образца подвешивали груз 193 Н (подробно методика испытаний представлена в работе [2]). После испытаний исследовали рельеф поверхности на растровом электронном микроскопе TESCAN с приставками для микроанализа.

В исходном состоянии покрытие на стали марки Ст3 представляет собой послойное расположение двух боридов – иглы FeB вблизи поверхности с содержанием бора около 18 мас. % и микротвердостью около 16 ГПа и Fe₂B на границе с основой содержат 10 мас. % бора и имеют микротвердость 7 ГПа (рис. 1, а). На стали 4Х5МФС бориды легированы хромом в количестве до 4 мас. %, значения твердости зоны

боридов $(\text{Fe,Cr})\text{B}$ – 12 ГПа, а зоны боридов $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ – 6 ГПа. На границе с основой сформировалась переходная зона борированного феррита, содержащая около 2 мас. % кремния, оттесненного в процессе нанесения покрытия из внешних слоев, с равномерно распределенными дисперсными глобулярными частицами боридов хрома CrB_2 (рис. 1б).



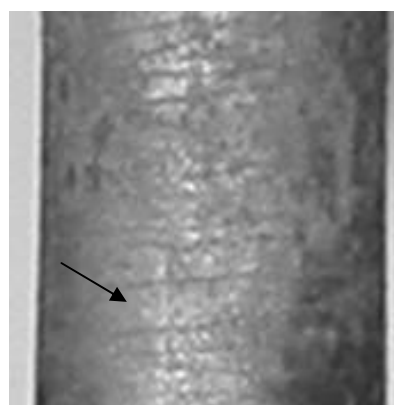
а) 100 мкм



б) 100 мкм

Рис. 1. Микроструктура боридных покрытий на стали Ст3 (а) и 4Х5МФС (б)

Результаты термоциклирования приведены в таблице. В качестве показателей долговечности выбраны следующие: N_1 – количество циклов до появления первых локальных повреждений покрытия в виде пузырей, N_2 – количество циклов до повреждения покрытия по всей площади поверхности и N_3 – количество циклов до разрыва образца, который происходил посередине рабочей части. Некоторые образцы после повреждения покрытия на всей поверхности не довели до разрушения, поэтому значения показателя N_3 не приведены. На некоторых образцах локальные повреждения покрытия сохранялись до разрыва образца, поэтому для них не приведены значения показателя N_2 . В результате термоциклирования на всех образцах первоначально наблюдали локальное повреждение покрытия в виде сетки микротрещин, расположенных параллельно друг другу (на рис. 2а указаны стрелкой).



а)



б)

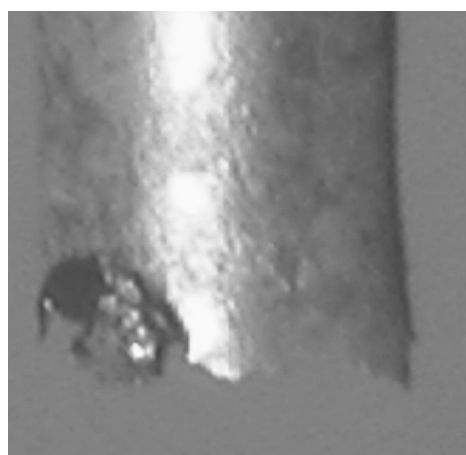


в)

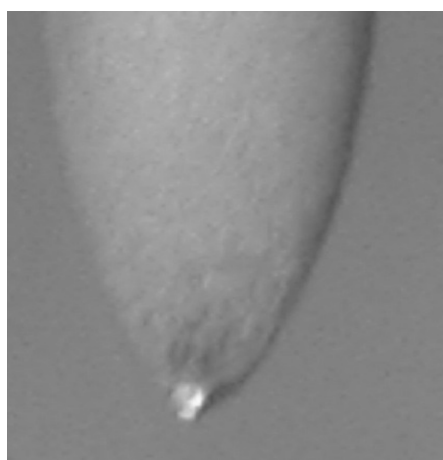
Рис. 2. Поверхность образцов с боридным покрытием на стали 4Х5МФС после термоциклирования до 1000 °С на воздухе:
а) после 5-го цикла; б) 35-го цикла; в) 60-го цикла

С увеличением длительности или температуры испытаний на воздухе происходит постепенное проникновение кислорода на участках растрескивания в основу, окисление основы и отслаивание покрытия. Эти процессы более развиты на малоуглеродистой стали Ст3 [2]. Легирование боридного покрытия на стали 4Х5МФС хромом привело к повышению его долговечности в ходе испытаний в целом (см. табл.), главным образом, за счет повышения стойкости к окислению. Первые следы окисления наблюдали после 60 циклов испытаний – покрытие на участках между трещинами начало отслаиваться по границам с зоной боридов $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ или с борированным ферритом.

Интерес представляет тот факт, что в случае испытаний в атмосфере водорода образцов с боридными покрытиями на стали марки Ст3 при максимальных температурах цикла 1000 и 1100 °С разрушение происходит с образованием шейки, а при 1200 °С – без заметной пластической деформации [2]. На образцах из стали 4Х5МФС наоборот – при максимальных температурах цикла 1000 и 1100 °С пластической деформации при разрушении не наблюдается (рис. 3а), а при 1200 °С уже образец разрушился после 2-го цикла испытаний с существенной пластической деформацией (рис. 3б).



а) 1 мм



б)

Рис. 3. Участки разрыва образцов с боридным покрытием на стали 4Х5МФС после термоциклирования в атмосфере водорода:
а) максимальная температура цикла 1100 °С; б) 1200 °С

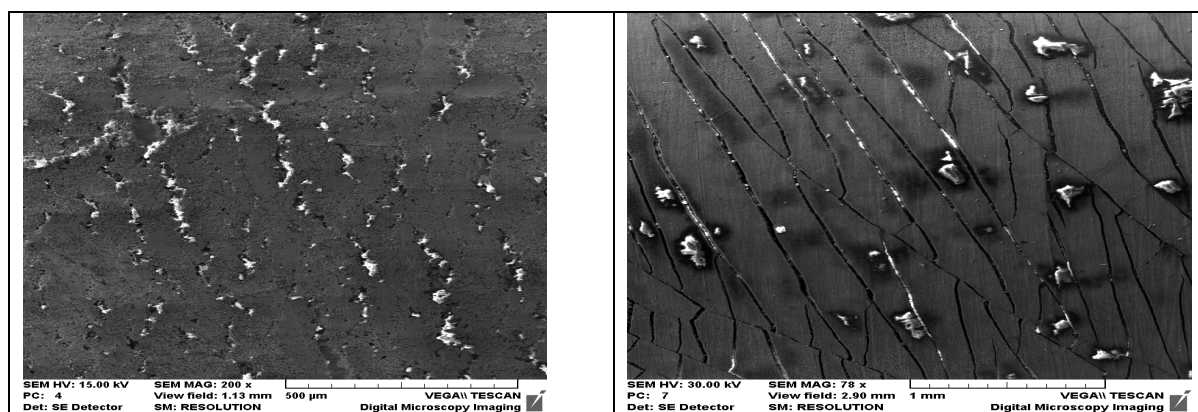
Таблица

Количество циклов до локального (N_1), массивного (N_2) повреждения боридных покрытий и до разрыва образца (N_3) при термоциклировании под нагрузкой в разных атмосферах

№	Температура а °С	Атмосфера	Марка стали	N_1	N_2	N_3
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	-*
4	1100	воздух	Ст3	1	2	11
			4Х5МФС	2	4	37
5		азот	Ст3	2	10	-*
			4Х5МФС	13	30	-*
6		водород	Ст3	5	-**	49
			4Х5МФС	2	5	13
7	1200	воздух	Ст3	1	2	9
			4Х5МФС	-**	-**	5
8		азот	Ст3	1	5	-*
			4Х5МФС	1	-**	7
9		водород	Ст3	2	-**	2
			4Х5МФС	1	-**	2

- * – образец до разрушения не испытывался
- ** – поверхность образца с покрытием сохранялась гладкой

Оценить характер растрескивания покрытия во всем диапазоне температур позволяет использование восстановительной атмосферы, полностью исключаяющей влияние окисления. Как известно, растрескивание покрытий под нагрузкой происходит на участках локализации пластической деформации, а расположение трещин зависит от типа действующих напряжений [3]. В покрытии на стали Ст3 образуются короткие поперечные трещины (до 0,3 мм), расположенные в шахматном порядке (рис. 4а). На стали 4Х5МФС наблюдали сплошную сетку трещин, характерных для касательных напряжений (рис. 4б).



а)

б)

Рис. 4. Характер растрескивания боридных покрытий после термоциклирования до 1100 °С в восстановительной атмосфере:
а) на углеродистой стали Ст3; б) на стали 4Х5МФС.

Список использованных источников

1. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Упрочняющие покрытия в машиностроении. Екатеринбург: Уро РАН, 2004. 244 с.
2. Пугачева Н.Б., Замараев Л.М., Трушина Е.Б. [и др.] Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термоциклирования под нагрузкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 3. С. 24–30.
3. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: ТПУ, 2010. 254 с.