

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ САМОФЛЮСЮЩИХСЯ СПЛАВОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ**

*Полоцкий государственный университет  
Новополоцк, Беларусь*

Одной из характерных и экономически очевидных тенденций современного этапа развития восстановительно-упрочняющих технологий является вытеснение дорогостоящих никелевых самофлюсующихся порошков более дешевыми порошками на железной основе [1]. Однако есть области, где позиции никелевых покрытий остаются незабываемыми. Это в первую очередь восстановление и упрочнение деталей работающих в условиях интенсивного коррозионного воздействия. Характерным примером являются быстроизнашиваемые детали химических производств. Традиционно считается, что в этих условиях самофлюсующиеся сплавы на железной основе непригодны.

Разработанная авторами технология диффузионного легирования (ДЛ) сплавов для защитных покрытий открывает широкие возможности по рациональному подбору химического состава защитного слоя на детали (рис.1) [2]. Поэтому актуальным является изучение коррозионной стойкости плазменных слоев из ДЛ-сплавов в различных технологических средах и определение путей повышения их коррозионной стойкости.

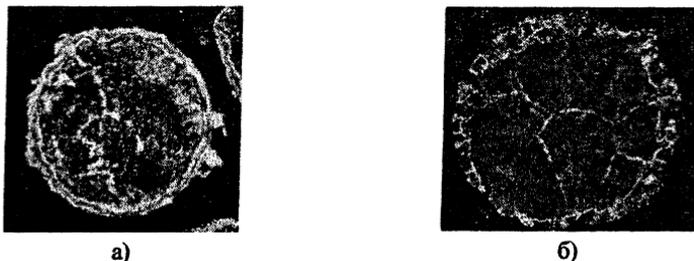


Рис. 1. Микроструктуры диффузионно-легированных марганцем (а) углеродом (б) частиц железного порошка,  $\times 200$

Исследования ДЛ-сплавов были проведены гравиметрическим и потенциометрическим методами в лабораторных и технологических средах ПО "Полимир" (г. Новополоцк) и Архангельского целлюлозно-бумажного комбината (АЦБК) (г. Ново

шинск).

Как известно [3], коррозионная стойкость при прочих равных условиях зависит от природы основы сплава, параметров легирования и структурного состояния. Традиционно высокая коррозионная стойкость Ni-сплавов обусловлена в первую очередь высокой пассивационной способностью основы сплава. В большинстве изученных коррозионных сред сплав ПГ-10Н01 демонстрирует высокую пассивационную способность и коррозионную стойкость (4-й балл коррозионной стойкости). Исключение составляет водный раствор азотной кислоты, в котором анализируемый сплав относится к группе малостойких (табл. 1).

Железо, как основа сплава, существенно уступает никелю по коррозионной стойкости. Наиболее низкой коррозионной стойкостью характеризуются сплавы системы Fe-C-B. В большинстве изученных сред они являются малостойкими. Это обусловлено в первую очередь отсутствием в основе элементов, обеспечивающих самопассивирование сплава.

Как известно [4], наличие диффузионного боридного слоя на поверхности стальной детали повышает коррозионную стойкость в кислых средах неокислительного характера (серная, соляная кислота), что обусловлено торможением процесса анодного растворения. Аналогичный эффект авторы [5] наблюдали в щелочных средах. Анализируемые в настоящей работе сплавы являются гетерогенными (рис.2). Поэтому их коррозионная стойкость отличается от стойкости гомогенных боридных слоев. Из всех изученных железо-бор-углеродистых сплавов максимальные коррозионные потери в щелочных средах и соляной кислоте отмечены у сплавов с минимальным содержанием углерода.

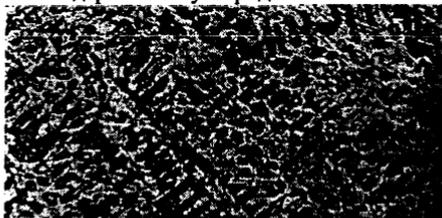


Рис. 2. Микроструктура гетерогенного наплавленного слоя из ДП-сплава ПР-Х18Н9Р2,  $\times 200$

Вызывает интерес влияние бора на коррозионную стойкость. Для гетерогенных сплавов существенное влияние имеет соотношение анодных и катодных участков. Обнаружено экстремальное влияние бора на коррозионную стойкость [2]. Минимальная коррозионная стойкость соответствует эвтектическим сплавам, максимальная – заэвтектическим. Избыточные боридные фазы в этом случае являются катодными участками. Уменьшение количества анодных участков в структуре сплава способствует повышению коррозионной стойкости.

Таблица 1

## Коррозионная стойкость наплавленных слоев в различных коррозионных средах

Материал наплавки		Скорость коррозии [мм/год] за время испытаний, часов				Балл коррозионной стойкости по 10-бальной шкале	Тип коррозии по ГОСТ 9.908-85
		5	25	50	100		
30% раствор NaOH (лабораторная среда)							
ПГ-10Н01		0,400	0,100	0,081	0,046	4	1
ПР-Х4Г2Р4С2Ф		0,085	0,060	0,050	0,038	4	1
С-300(ПР-Х14Ф6С3Р3)		0,255	0,115	0,070	0,048	4	1
Стальной образец 12Х18Н9		0,027	0,0021	0,01	0,005	3	1
ДЛ-сплавы	ГДКВ-4%В	0,092	0,058	0,046	0,05	4	1
	ПР-45Р4	0,260	0,148	0,132	0,121	6	2
	ПР-Х18Н9Р4	0,150	0,071	0,046	0,025	4	1
	ПР-06ХН28МДТР4	0,091	0,038	0,021	0,012	4	1
3% раствор NaCl (лабораторная среда)							
ПГ-10Н01		0,298	0,081	0,064	0,029	4	1
ПР-Х4Г2Р4С2Ф		0,085	0,043	0,051	0,040	4	1
С-300(ПР-Х14Ф6С3Р3)		2,390	0,639	0,399	0,206	6	2
Стальной образец 12Х18Н9		0,106	0,058	0,032	0,017	4	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	0,153	0,041	0,031	0,027	4	1
	ПР-06ХН28МДТР4	0,280	0,200	0,110	0,060	5	1
10% раствор H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (лабораторная среда)							
ПГ-10Н01		0,116	0,035	0,034	0,023	4	1
ПР-Х4Г2Р4С2Ф		42,471	88,951	76,861	62,612	10	2
С-300(ПР-Х14Ф6С3Р3)		29,600	6,540	3,330	2,709	8	4
Стальной образец 12Х18Н9		1,200	0,283	0,147	0,083	3	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	18,200	8,725	4,007	3,900	8	10
	ПР-06ХН28МДТР4	6,950	5,190	4,650	3,264	8	10
10% раствор HCl (лабораторная среда)							
ПГ-10Н01		1,104	0,251	0,156	0,083	5	1
ПР-Х4Г2Р4С2Ф		5,190	2,607	2,700	4,078	88	2
С-300(ПР-Х14Ф6С3Р3)		24,820	22,650	17,407	11,920	10	2
Стальной образец 12Х18Н9		1,100	0,600	0,410	0,300	6	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	2,590	0,610	0,336	0,180	6	1
	ПР-06ХН28МДТР4	0,280	0,200	0,110	0,060	5	1
10% раствор HNO <sub>3</sub> (лабораторная среда)							
ПГ-10Н01		2,950	9,575	6,213	4,309	8	10
ПР-Х4Г2Р4С2Ф		464,0	203,7	Полное разрушение образца			
Стальной образец 12Х18Н9		0,132	0,037	0,019	0,009	3	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	121,5	84,330	61,220	39,430	10	10
	ПР-06ХН28МДТР4	6,750	6,500	7,699	9,100	9	10
Роданистый натрий NaSCN (раствор промышленного производства), ПО "Полимер"							
ПГ-10Н01		0,261	0,104	0,068	0,133	6	2
Стальной образец 12Х18Н9		0,240	0,064	0,069	0,053	5	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	0,460	0,220	0,170	0,175	6	1
	ПР-06ХН28МДТР4	1,000	0,250	0,146	0,196	7	1
Водный раствор муравьиной и щавелевой кислот (краситель искусственных волокон) ПО "Полимер"							
ПГ-10Н01		0,570	0,205	0,189	0,137	6	1
Стальной образец 12Х18Н9		0,150	0,045	0,025	0,014	4	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	3,080	1,900	1,660	1,790	8	6
	ПР-06ХН28МДТР4	0,699	1,060	1,480	1,570	8	10
Деметилформамид муравьиной кислоты HNON(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (растворитель промышленного производства)							
ПГ-10Н01		0,396	0,106	0,066	0,036	4	1
Стальной образец 12Х18Н9		0,125	0,035	0,038	0,025	4	1
ДЛ-сплавы	ПР-Х18Н9Р4	0,730	0,630	0,097	0,057	5	1
	ПР-06ХН28МДТР4	0,380	0,093	0,170	0,102	6	1

1- сплошная коррозия; 2- местная неравномерная коррозия; 4- язвенная коррозия; 6- подповерхност-

ная коррозия; 10-избирательная коррозия.

Легирование железо-бористых сплавов пассивирующими элементами способствует повышению коррозионной стойкости. Для щелочных сред (NaOH и NaCl) введение 4-х% хрома переводит сплав в группу стойких. Дальнейшее повышение степени легированности весьма незначительно изменяет коррозионное поведение железо-бористых сплавов в указанных средах. В слабоагрессивных средах анализируемые сплавы разрушаются преимущественно равномерно, в отдельных случаях присутствуют коррозионные пятна.

Анализ результатов коррозионных испытаний в агрессивных средах ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ) свидетельствует о необходимости дополнительного легирования сплавов пассивирующими элементами, в первую очередь хромом. Повышение содержания хрома более 18% позволяет значительно повысить коррозионную стойкость сплавов в 10% растворе соляной кислоты, переведя их в группу стойких. Меньшее количество хрома в сплаве приводит к активной местной неравномерной и язвенной коррозии. В растворе серной кислоты хромо-никелевое легирование железобористых сплавов несколько повышает коррозионную стойкость, переводя сплав из группы нестойких в группу малостойких. Следует отметить, что легирование 28% хрома не дает ожидаемого эффекта. Сплав по-прежнему имеет 8-й балл коррозионной стойкости.

Наиболее низкая коррозионная стойкость анализируемых сплавов в растворе азотной кислоты. Причем традиционное легирование хромом и никелем дает незначительный эффект. Негативным фактором является наличие ярко выраженной избирательной коррозии гетерогенных бористых сплавов, как на никелевой так и на железной основах.

В технологических средах ПО "Полимир" легированные бористые сплавы на железной основе приближаются по коррозионной стойкости к сплавам на никелевой основе ПГ-10Н01. Исключение составляет краситель искусственных волокон, в котором указанные сплавы являются малостойкими. Введение бора в сплав 06ХН28МДТ, имеющий высокую коррозионную стойкость, переводит его в группу понижено стойких.

Данные по коррозионной стойкости сплавов в технологических средах АЦБК (табл. 2) хорошо согласуются с предшествующими результатами. Коррозионная стойкость бористых сплавов на железной основе в растворе серной кислоты является неудовлетворительной. Повышение электродного потенциала указанных сплавов в растворе ингибированной соляной кислоты свидетельствует о пассивировании поверхности сплава. Однако в этом случае наблюдается избирательная коррозия и фрагменты коррозионного растрескивания. Отметим, что никелевые сплавы в указанной технологической среде так же подвержены язвенной и точечной коррозии. В изученных технологических средах АЦБК никелевые бористые сплавы на железной

и никелевой основе имеют близкие антикоррозионные свойства и относятся к группе стойких (4,5 балл коррозионной стойкости). Потенциометрические измерения подтверждают высокую пассивационную способность хромоникелевых бористых сплавов в щелочных средах АЦБК.

Анализ результатов проведенного комплекса исследований и доступных литературных данных позволил сформулировать пути повышения коррозионной стойкости наплавленных самофлюсующихся сплавов на железной основе.

Гетерогенизация структуры сплава в результате легирования бором снижает коррозионную стойкость сплава. Степень этого снижения зависит от ряда факторов: электрохимической картины сплава, наличия пассивирующих и депассивирующих легирующих элементов типа коррозионной среды, структурного состояния сплава и качества наплавленного слоя.

Таблица 2

**Коррозионная стойкость самофлюсующихся сплавов  
в технологических средах АЦБК**

Характеристика технологической среды	Скорость коррозии [ $\text{г/м}^2 \cdot \text{г}$ ] и стандартный потенциал [Э.В.] самофлюсующихся сплавов ( $(\text{г/м}^2 \cdot \text{г})/\text{Э.В.}$ )			
	ПГ-10К01	ПГ-10Н01	ДЛ-сплавы	
			ПР-10Р6М5, бориров.	ПР-Х18Н9Р4
Технологическая серная кислота, 27,8 %, 24,5°C	0,078/+0,010	0,097/ -0,041	-	10,57/-0,179
Ингибированная соляная кислота 21,9 %, 26°C	0,231/+0,004	0,346/+0,037	-	0,334/-0,06
Каустик 428 г/л ед. NaOH, 42°C	0,0019/-0,560	0,0022/-0,573		0,019/-0,924
Хлористый натрий 312,4г/л, 60°C	0,052/-0,175	0,051/-0,060	-	0,048/-0,062
Оборотная вода сушильных цехов SO <sub>2</sub> -0,01%, 34,7°C, 3,72 pH		-	0,265/-0,390	-
Черный сульфатный щелок 12,03pH, 70°C	0,0021/-0,560	0,0032/-0,601	0,0425/-0,376	0,0023/-0,0562
Белый щелок 38 г/л Na <sub>2</sub> O, 33,5°C	0,095/-0,136	0,103/+0,006	-	0,055/-0,660

Для всех изученных бористых сплавов на железной основе влияние углерода является отрицательным. В слабоагрессивных щелочных средах железо-бор-углеродистые сплавы корродируют быстрее, чем аналогичные сплавы без бора. В то же время сплавы системы Fe-B с минимально возможным содержанием углерода демонстрируют удовлетворительную коррозионную стойкость (4 балл). Это обусловлено изменением электрохимической картины бористого сплава с углеродом и низкой коррозионной стойкостью бороцементита. Для хромоникелевых бористых сплавов на железной основе отрицательное влияние углерода проявляется еще более ярко. Увеличение содержания углерода в сплаве с 0,12% до 0,24% приводит к снижению кор-

розионной стойкости в хлорсодержащих средах (HCl, NaCl) в 2,1–3,3 раза. Причины этого аналогичны ситуации в хромоникелевых сталях [3].

Легирование бористого сплава традиционными пассивирующими элементами позволяет повысить его коррозионную стойкость. Для слабоагрессивных сред достаточно 4% хрома (ГР-Х4Г2Р4С2Ф). Обеспечение коррозионной стойкости в растворах кислот требует более существенного легирования хромом и никелем. Следует признать, однако, что для работы в растворах серной и особенно азотной кислот эти сплавы не пригодны вследствие ярко выраженной избирательной коррозии. Наиболее рациональным является легирование сплава хромом и никелем по схеме 18–9. Увеличение количества этих элементов не дает ожидаемого существенного эффекта вследствие гетерогенности сплава.

Регулирование структурного состояния сплава термической обработкой позволяет улучшить коррозионную стойкость за счет уменьшения гетерогенности. Закалка боритых хромоникелевых сплавов повышает коррозионную стойкость в 10% растворе  $H_2SO_4$  в 6 раз. При этом избирательная коррозия сплава уменьшается. Аналогичный эффект получен при скоростном охлаждении наносимого слоя. С этих позиций способы наплавки, обеспечивающие максимальный градиент температур (плазменная, лазерная), являются предпочтительными.

Отдельно следует рассмотреть влияние бора на коррозионную стойкость анализируемых сплавов. Влияние бора противоречиво. С одной стороны, обеспечивая самофлюсование сплава при наплавке, бор способствует получению качественного беспористого слоя, что само по себе способствует повышению коррозионной стойкости. Это особенно актуально для гетерогенных покрытий, для которых даже незначительные дефекты становятся очагами катастрофического коррозионного разрушения. Следует отметить так же позитивное влияние бора на стойкость нержавеющих сталей против межкристаллитной коррозии, обусловленной рафинирующим действием боридной эвтектики и измельчением структуры. По данным разных источников оптимальным в этом случае является содержание бора 0,4–0,5% [6,7]. В наших экспериментах наличие МКК так же зафиксировано не было.

С другой стороны, гетерогенизация сплава при легировании бором обуславливает снижение коррозионной стойкости. С этой точки зрения уменьшение площади анодных участков сплава при увеличении количества избыточных боридов способствует повышению коррозионной стойкости.

Вышеприведенные соображения позволяют рекомендовать заэвтектические концентрации бора для хромоникелевых износостойких наплавов на железной основе, работающих в агрессивных средах. В случае второстепенного влияния изнашивания по сравнению с коррозией возможно уменьшение содержания бора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко Ф.И., Любецкий С.Н. Особенности боросилицирования порошков на железной основе // Известия вузов. Черная металлургия, 1995. – №2. – С. 16–19.
2. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – Мн.: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 133 с.
3. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1967. – 798 с.
4. Ворошнин Л.Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 296 с.
5. Зорин А.А., Каспарова О.В., Хохлов Н.И. Исследование коррозионного и электрохимического поведения борированных сталей // Защита металлов. – 1989. – Т. 25, №3. – С. 390–398.
6. Медовар Б.И., Пинчук Н.И., Чекотило Л.В. Аустенитно-боридные стали и сплавы для сварных конструкций. – Киев: Наукова думка, 1970. – 145с.
7. Дергач Т.А., Сухомлин Г.Д. Влияние бора на структуру и стойкость против МКК аустенитной нержавеющей стали // Защита металлов. – 1989. – Т.25, №3. – С. 498–502.

УДК 621.923

**А.П.Ракомсин, И.С.Гаухштейн, Л.Е. Сергеев, М.И.Сидоренко**

### **КОНСТРУИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

*РУП «Минский автомобильный завод»*

*Минск, Беларусь*

Известно, что финишная обработка сложнопровильных поверхностей деталей машин представляет сложную задачу. В машиностроении существует ряд отделочных операций, среди которых можно отметить магнитно-абразивную обработку (МАО) [1,2], направленных на реализацию равномерности размерного и массового съема материала с такого рода поверхностей. Однако применение метода МАО характеризуется тем, что при превышении перепада диаметральных размеров изделия более 6 мм интенсивность обработки резко падает и практически сводится к нулю. Это связано с особенностями физики магнитного поля. Поэтому решением этой проблемы является создание системы концентрации магнитного потока в рабочей зоне таким образом, чтобы наличие феррообразивного порошка (ФАП) соответствовало изменению конфигурации обрабатываемой поверхности. Известно устройство для МАО фасонных поверхностей с выполненными на рабочих поверхностях полусных окончаний концентраторами магнитного потока (МП), расположенных по взаимно сопря-