



УДК 539.3:624.014:620.1-69.1

И.Н. Гатауллин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

В данной работе изучаются коррозионная стойкость металлических конструкций и методы их противокоррозионной защиты на объекте корпуса обогащения Лебединского горно-обогатительного комбината (ЛГОК), расположенного в городе Губкин. Он представляет собой многопролетное здание размерами в плане 100x1000м, оснащенное мостовыми кранами грузоподъемностью до 320 тонн. Несущие металлические конструкции выполнены в виде рамной системы с шагом рам 6 м. Технология обогащения железистых кварцитов предусматривает трехстадиальное измельчение, магнитное обогащение и обезвоживание концентрата. Хвосты магнитной сепарации и сливы дешламаторов самотеком поступают в гидроциклоны или непосредственно в радиальные сгустители. Продукт сгущения и пески гидроциклонов перекачиваются в хвостохранилище насосами, а их сливы - осветленная вода с содержанием твердого вещества до 50 мг в 1 дм³, насосами возвращаются в технологический процесс. Применяемая технология обогащения железистых кварцитов характеризуется большим расходом технологической воды. Неизбежные проливы и интенсивный смыв рабочих площадок вызывают, во-первых, повышение влажности воздуха в корпусе, во-вторых, увлажнение металлических конструкций.

Натурные обследования состояния металлических конструкций показали, что более сильному коррозионному износу подвержены колонны и балки рабочих площадок ниже отг. 8.000м, которые регулярно увлажняются технологической водой. Изучение температурно-влажностного и газового режима внутрицеховой среды показало, что относительная влажность воздуха в зимний период составляет 60-70%, в летний период - 65-75%; температура воздуха в зимний период 5-15⁰С; в летний период - 20-30⁰С; агрессивные газы по СНиП 2.03.11-85 относятся к группе "А". Таким образом, воздушная среда для металлических конструкций является неагрессивной. Несмотря на то, что во всех экспериментальных точках воздушная среда примерно одинакова, имеется большой разброс коррозионных потерь металлических конструкций по длине корпуса обогащения ЛГОК. Это объясняется воздействием в одних случаях неагрессивной воздушной среды производства (коррозионные потери практически отсутствуют), в других случаях - агрессивной технологической воды (интенсивный коррозионный износ). Технологическая вода, содержащая твердые частицы пыли и железистого кварцита, а также растворенные коррозионно-активные примеси, постоянно или периодически увлажняя поверхность метал-

ла, вызывают интенсивное коррозионное разрушение. Содержание в технологической воде таких компонентов, как хлориды, сульфаты резко интенсифицирует коррозию металла. Проведенный химический анализ технологической воды в различных точках корпуса обогащения ЛГОК показал, что водородный показатель рН производственных оборотных и сточных вод без очистки составляет 8,9, а суммарная концентрация сульфатов и хлоридов - 4,5 г/дм³. Степень агрессивного воздействия технологической воды на металлические конструкции при свободном доступе кислорода в интервале температур от 0 до 50⁰С и скорости движения до 1 м/сек является среднеагрессивной. Если учесть, что технологическая вода воздействует на металлические конструкции периодически, степень агрессивного воздействия среды принимается на одну ступень выше, т.е. сильноагрессивная.

Подготовка образцов к коррозионным испытаниям. Для экспериментальных исследований использованы 580 шлифованных металлических образцов, изготовленных из стали марки ВСт3псб, размерами 100x50x2 мм, по ГОСТ6992-68. Из них: без защитных покрытий подготовлено 450 образцов, а с лакокрасочными покрытиями - 130 образцов. Образцы без защитных покрытий предназначены для определения интенсивности коррозионного износа в изучаемой агрессивной среде. Для этого в каждой экспериментальной точке испытаны 15 образцов (из расчета 5 съемов по 3 образца). Шлифованные образцы измерялись и взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,01 грамма. Торцы мерительных образцов тщательно заделывались эпоксидной шпатлевкой ЭП-0010 и эпоксидной смолой ЭД 6.

Для определения сроков службы систем лакокрасочных покрытий приняты 130 образцов (из расчета 26 вариантов систем лакокрасочных покрытий по 5 образцов). Для систем лакокрасочных покрытий были приняты следующие варианты:

1) эмали ХВ 785, ЭП-575, ЭП-5116 и ЭП-07105 в сочетании с грунтовками ХС-010, ХС-068, ХС-050, АК-070, ЭП-057 и шпатлевкой ЭП-0010, рекомендованные по СНиП 2.03.11-85 для защиты от коррозии металлических конструкций при воздействии среднеагрессивных химических неорганических жидких сред;

2) масляная краска МА-15 в сочетании с железным суриком на натуральной олифе, проектная защита металлических конструкций корпуса обогащения ЛГОК;

3) эпоксидно-пексовые краски ЭПК-1, ЭПК-2, ЭПК-



Таблица 1

Варианты систем лакокрасочных покрытий, принятые для испытания

Номер варианта	Марка грунтовки	Кол-во слоев	Марка покрытия	Кол-во слоев
1	Грунтовка ХС-010	1	Эмаль ХВ-785	5
2	Грунтовка ХС-068	1	Эмаль ХВ-785	5
3	Грунтовка ХС-050	1	Эмаль ХВ-785	5
4	-	-	Эмаль ЭП-575	5
5	Грунтовка ЭП-057	1	Эмаль ЭП-575	5
6	Грунтовка АК-070	1	Эмаль ЭП-575	5
7	-	-	Эмаль ЭП-5116	5
8	Грунтовка ЭП-057	1	Эмаль ЭП-5116	5
9	Шпатлевка ЭП-0010	1	Эмаль ЭП-5116	5
10	-	-	Эмаль ЭП-7105	5
11	Грунтовка ЭП-057	1	Эмаль ЭП-7105	5
12	Шпатлевка ЭП-0010	1	Эмаль ЭП-7105	5
13	Железный сурик	2	Краска МА-15	2
14	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-1	5
15	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-2	5
16	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-3	5
17	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-4	5
18	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-5	5
19	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-6	5
20	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-7	5
21	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ЭПК-8	5
22	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ПП-1	5
23	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ПП-2	5
24	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ПП-3	5
25	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ПП-4	5
26	Грунтовка-модификатор ГМ-1	1	Краска ПП-5	5

3, ЭПК-4, ЭПК-5, ЭПК-6, ЭПК-7 и полистирольно-пексовые краски ПП-1, ПП-2, ПП-4, ПП-4, ПП-5 в сочетании с грунтовкой-модификатором ГМ-1, разработанные нами.

Варианты систем лакокрасочных покрытий, принятые для испытания в лабораторных условиях, представлены в таблице 1.

Лабораторные исследования коррозионного износа металлических образцов. Для создания моделей агрессивных сред и изучения коррозионной стойкости металлов с различными системами защитных лакокрасочных покрытий в лабораторных условиях нами разработана универсальная установка для коррозионных испытаний. Испытания образцов производились при периодическом погружении в электролит. Для изучения интенсивности коррозионного износа в установке для коррозионных испытаний незащищенного металла использованы 150 шлифованных металлических образцов без защитных покрытий. Съем образцов производился 5 раз по 30 образцов через 20, 30, 40, 80 и 100 суток. Для определения дол-

говечности различных систем лакокрасочных покрытий в установке для коррозионных испытаний испытывались 78 образцов (26 вариантов систем лакокрасочных покрытий по 3 образца). В основу метода контроля за состоянием окрашенных образцов положено визуальное наблюдение, которое позволяет оценить вид, степень и границы коррозионных поражений. Контрольные осмотры образцов производились через каждые 10 суток в течение всего периода испытаний. Качественная оценка изменения защитных свойств лакокрасочных покрытий производилась в соответствии с требованиями ГОСТ 6992-68. В зависимости от меления, коррозии и других признаков разрушения покрытий образцов оценивались по восьмибалльной шкале ГОСТа.

Результаты испытания различных систем лакокрасочных покрытий в установке для коррозионных испытаний приводятся в таблице 2. Из таблицы видно, что к концу срока испытания все варианты систем лакокрасочных покрытий потеряли защитную способность. Наиболее стойкими к мелению и коррозион-

**Результаты испытания систем лакокрасочных покрытий в установке для коррозионных испытаний**

Номер варианта	Оценка защитных свойств покрытия в баллах по ГОСТ 6992-68 и площадь разрушения покрытия в % после сроков экспозиции в сутках									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	8:0	8:0	8:0	7:0	6:0	5:0	4:0	4:0	3:0	3:5
2	8:0	8:0	7:0	6:0	5:0	4:0	4:0	4:5	3:9	3:12
3	8:0	8:0	8:0	7:0	6:0	6:0	5:0	4:0	3:5	3:10
4	8:0	8:0	7:0	7:0	6:0	5:0	4:0	4:3	3:7	3:11
5	8:0	8:0	8:0	8:0	7:0	7:0	6:0	4:0	3:0	3:5
6	8:0	8:0	8:0	7:0	7:0	6:0	5:0	5:0	3:0	3:5
7	8:0	8:0	7:0	7:0	6:0	6:0	5:0	4:6	3:10	3:12
8	8:0	8:0	8:0	8:0	7:0	7:0	6:0	4:0	3:0	3:2
9	8:0	8:0	8:0	7:0	7:0	7:0	6:0	4:0	3:0	3:4
10	8:0	8:0	7:0	7:0	6:0	5:0	5:0	4:5	3:8	3:12
11	8:0	8:0	8:0	8:0	8:0	7:0	6:0	5:0	4:0	3:2
12	8:0	8:0	8:0	7:0	7:0	7:0	5:0	5:0	4:0	3:5
13	8:0	7:0	6:0	5:0	4:0	3:0	3:5	2:7	2:10	2:15
14	8:0	7:0	6:0	5:2	4:3	3:5	3:8	3:15	2:18	1:23
15	8:0	7:0	6:2	5:4	4:5	3:8	3:12	2:15	1:24	1:30
16	8:0	7:0	5:2	4:3	3:4	3:5	3:10	2:17	2:20	1:24
17	8:0	7:0	6:0	4:2	4:4	4:5	3:11	3:13	2:17	1:25
18	8:0	6:0	5:1	4:2	4:5	3:8	3:10	2:14	1:15	1:20
19	8:0	7:0	6:0	5:2	5:4	4:5	4:7	3:10	2:12	1:15
20	8:0	7:0	7:0	5:2	4:3	3:5	3:6	3:7	2:8	2:10
21	8:0	7:0	6:2	4:3	4:5	3:8	3:11	2:16	1:20	1:25
22	8:0	7:0	7:0	6:2	4:3	3:5	3:9	3:12	2:14	2:20
23	8:0	7:0	6:0	6:2	5:3	5:4	4:5	3:8	2:10	2:15
24	8:0	7:0	6:2	6:3	5:4	4:5	4:10	3:15	2:20	1:25
25	8:0	7:0	6:2	5:3	5:4	4:5	3:11	3:12	2:14	1:20
26	8:0	7:0	6:0	5:2	4:3	4:4	3:5	3:9	2:11	1:15

ному поражению оказались покрытия из эмалей ХВ-785, ЭП-575, ЭП-5116 и ЭП-7105, защитные свойства которых после 100 суток испытания оценивались в 3 балла, а разрушение покрытия составило от 2 до 12%. Окрашенные масляной краской МА-15 поверхности образцов получили 5% коррозионное поражение после 70 суток экспозиции.

Изменение площади коррозионных поражений с течением времени происходило неравномерно. Для эпоксидно-пековых и полистирольно-пековых красок отмечено резкое увеличение площади коррозионных поражений после 40 суток экспозиции.

Натурные исследования коррозионного износа металлических конструкций. Для изучения интенсивности коррозионного износа металлических конструкций в условиях производства корпуса обогащения ЛГОК использованы 300 шлифованных металлических образцов без защитных покрытий. 20 экспериментальных точек, равномерно распределенных по

всему объему корпуса, выбраны таким образом, что 10 из них принадлежали зоне 1 (где воздействие технологической воды на металлические конструкции практически отсутствует), а остальные 10 точек - зоне 2 (где металлические конструкции подвержены периодическому воздействию технологической воды). В каждой экспериментальной точке установлено 15 образцов, которые расположены в кассетах под углом 45°. Съем образцов производился пять раз по три образца из каждой экспериментальной точки через 70, 200, 345, 515 и 665 суток.

Обработка образцов после испытания и оценка коррозионных потерь. Образцы, предназначенные для определения интенсивности коррозионного износа в лабораторных и натуральных условиях, после снятия подвергались удалению продуктов коррозии травильной пастой. После травления образцы промывались горячей водой, ацетоном и высушивались. Количественные величины коррозионных потерь оп-



Таблица 3

Результаты статистической обработки данных испытания коррозионного износа образцов

Место испытания образцов	Время испытания t, сутки	Среднее значение удельной потери массы образцов G_{cp} , г/м ²	Среднее квадратичное отклонение σ , г/м ²	Границы доверительного интервала ΔG , г/м ²	Приведенное отклонение значений $\Delta G/G_{cp} * 100, \%$
Корпус обогащения ЛГОК (Зона 1)	70	12,00	2,7	1,04	8,7
	200	46,00	2,8	1,05	2,3
	345	87,23	4,9	1,88	2,2
	515	122,18	7,9	2,99	2,4
	665	155,00	15,4	5,85	3,8
Корпус обогащения ЛГОК (Зона 2)	70	32,82	3,8	1,43	4,4
	200	132,07	10,6	4,03	3,1
	345	242,30	15,1	5,74	2,4
	515	339,50	19,2	7,28	2,1
	665	436,98	19,4	7,35	1,7
В установке для коррозионных испытаний	20	193,98	11,4	4,32	2,2
	40	419,03	13,1	4,99	1,2
	60	542,82	19,4	7,35	1,4
	80	637,17	19,0	7,23	1,1
	100	673,37	18,6	7,08	1,1

ределялись весовым методом.

Произведена статистическая обработка данных испытания коррозионного износа образцов в лабораторных и натуральных условиях. Принимая число замеров $n=3$ и вероятность $\alpha=0,95$ и определяя коэффициент Стьюдента $t_{5,29}=2,045$ производили оценку средних значений удельной потери массы образцов (табл. 3).

Из таблицы 3 видно, что границы доверительного интервала ΔG не превышают 8 г/м² и составляют в среднем 2,7% от средних значений удельной потери массы образцов.

Как видно из таблицы 3, интенсивность коррозионного износа в зоне 1 ниже почти в три раза, чем в зоне 2. В то же время в установке для коррозионных испытаний интенсивность коррозионного износа выше на порядок, чем в зоне 2.

Обработка результатов экспериментальных исследований. Данные экспериментальных исследований подвергались обработке с помощью ЭВМ. В основу алгоритма расчета коррозионного износа с помощью ЭВМ заложены разработанные нами модель дробно-параболического вида и методика прогнозирования [1]. Временные ряды глубины коррозии, полученные в установке для коррозионных испытаний и в зонах I и 2 корпуса обогащения ЛГОКа, позволили установить интенсивность развития коррозионного износа, соответственно, на I год и на 5 лет. В результате расчета коррозионного износа по пяти экспериментальным точкам, полученным в установке для коррозионных испытаний в течение 100 суток, про-

изведен прогноз на 300 суток. Также в результате расчета коррозионного износа по пяти экспериментальным точкам, полученным в условиях производства корпуса обогащения ЛГОКа (зона I и 2) в течение 665 суток, произведен прогноз на 5 лет.

По результатам испытания различных систем лакокрасочных покрытий в установке для коррозионных испытаний установлены моменты времени появления первых коррозионных поражений t_{ni} , где $i=1, 2, \dots, n$ - номера вариантов защитных покрытий (табл. 4). Для перехода из результатов лабораторных испытаний на натурные условия определены соответствующие глубины коррозии $d(t_{ni})$ шлифованных образцов и с помощью разработанной методики [1] получены расчетные значения сроков службы систем лакокрасочных покрытий в условиях корпуса обогащения ЛГОКа (табл. 4).

Погрешности прогноза определяются в следующей последовательности:

- находят коэффициент временного упреждения k_y :

$$k_y = t_3 / t_n = 3,2 \cdot 1,8 = 1,78,$$

где t_n - время интерполяции - участок кривой, полученный экспериментальным путем; t_3 - время экстраполяции - участок кривой, определенный методом прогнозирования;

- находят среднюю относительную погрешность прогнозирования Δ_{cp} :

$$\Delta_{cp} = \pm \sqrt{33k_y} = \pm \sqrt{33 * 1,78} = \pm 8\%.$$

Таким образом, относительная погрешность полученных расчетных значений сроков службы систем



лакокрасочных покрытий в натуральных условиях не превышает 8%.

Проверка достоверности полученных результатов производится при сравнении результатов прогноза и натуральных обследований. В ходе натуральных обследований было установлено, что срок службы проектной защиты металлических конструкций корпуса обогащения ЛГОКа в зоне 2 составляет 3 года, а расчетный срок службы - 2,8 года. Относительная погрешность составляет менее 8%.

Прямые затраты выполнения противокоррозионных работ на 1 кв.м площади поверхности металлических конструкций складываются из основной заработной платы рабочих, эксплуатации машин и материальных ресурсов (табл. 5). Средние годовые затраты проведения противокоррозионных работ определяются делением прямых затрат на срок службы систем лакокрасочных покрытий. Для определения эконо-

мически эффективной системы лакокрасочных покрытий в зоне 2 из всех вариантов выбирают один с минимальными средними годовыми затратами. Такой системой в рассматриваемой задаче является 13-ый вариант - краска МА-15 в сочетании с железным суриком (проектная защита), средними затратами на 1 год эксплуатации металлических конструкций 6,5 руб/год. В зоне I (менее агрессивная среда) для противокоррозионных работ выбирают систему лакокрасочных покрытий с минимальными прямыми затратами.

Минимальные прямые затраты имеет также система лакокрасочных покрытий 13-го варианта, т.е. краска МА-15 в сочетании с железным суриком.

Таким образом, для противокоррозионной защиты металлических конструкций корпуса обогащения ЛГОКа целесообразно применять систему лакокрасочных покрытий 13-го варианта с периодом возобновления 2,8 года.

Таблица 4

Результаты сравнения вариантов систем лакокрасочных покрытий в натуральных условиях

Номер варианта	Срок службы ЛКП в лабораторных условиях $t_{\text{лп}}$, годы	Коэффициент перехода		Расчетное значение срока службы ЛКП в натуральных условиях, годы		Прямые затраты проведения противокоррозионных работ на 1 кв. м, руб.	Средние годовые затраты на 1 кв. м, руб.	
		Зона 1	Зона 2	Зона 1	Зона 2		Зона 1	Зона 2
1	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	84,3	Менее 16,9	24,8
2	0,219	>22,8	14,1	Более 5	3,1	86,2	Менее 17,2	27,8
3	0,247	>20,2	13,0	Более 5	3,2	93,9	Менее 18,8	29,3
4	0,219	>22,8	14,1	Более 5	3,1	191,5	Менее 38,3	61,8
5	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	314,5	Менее 62,9	92,5
6	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	206,9	Менее 41,4	60,9
7	0,219	>22,8	14,1	Более 5	3,1	100,0	Менее 20,0	32,3
8	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	223,0	Менее 44,6	65,6
9	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	127,0	Менее 25,6	37,6
10	0,219	>22,8	14,1	Более 5	3,1	122,5	Менее 24,5	39,5
11	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	245,5	Менее 49,1	72,2
12	0,274	>18,2	12,4	Более 5	3,4	140,12	Менее 28,1	41,2
13	0,191	>26,1	14,6	Более 5	2,8	18,06	Менее 3,6	6,5
14	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	26,59	Менее 5,3	15,6
15	0,082	50	14,6	4,1	1,2	26,09	6,56	21,7
16	0,082	50	14,6	4,1	1,2	26,09	6,56	21,7
17	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	25,59	Менее 5,1	15,1
18	0,082	>50	14,6	4,1	1,2	25,34	6,18	21,1
19	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	25,84	Менее 5,2	15,2
20	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	25,59	Менее 5,1	15,1
21	0,082	50	14,6	4,1	1,2	25,09	6,12	20,9
22	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	20,59	Менее 4,1	12,1
23	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	20,09	Менее 4,0	11,8
24	0,082	50	14,6	4,1	1,2	20,34	4,96	16,9
25	0,082	50	14,6	4,1	1,2	20,09	4,90	16,7
26	0,110	>45,5	15,5	Более 5	1,7	20,84	Менее 4,2	12,2



Распределение затрат на проведение противокоррозионных работ металлических конструкций (на 1 кв.м площади поверхности)

Номер варианта	Основная заработная плата рабочих в руб.		Эксплуатация машин в руб.		Материальные ресурсы в руб.		Прямые затраты в руб.
	грунтовка	покрытие	грунтовка	покрытие	грунтовка	покрытие	
1	1,61	4,9	0,25	0,85	8,44	68,25	84,3
2	1,61	4,9	0,24	0,85	10,35	68,25	86,2
3	2,06	4,9	0,22	0,85	17,62	68,25	93,9
4	-	4,95	-	0,85	-	185,7	191,5
5	1,49	4,95	0,31	0,85	121,2	185,7	314,5
6	1,61	4,95	0,26	0,85	13,53	185,7	206,9
7	-	4,95	-	0,8	-	94,25	100,0
8	1,49	4,95	0,31	0,8	121,2	94,25	223,0
9	1,63	4,95	0,3	0,8	25,97	94,25	127,0
10	-	7,65	-	0,7	-	114,15	122,5
11	1,49	7,65	0,31	0,7	121,2	114,15	245,5
12	1,63	7,65	0,3	0,7	25,97	114,15	140,12
13	3,22	1,96	0,5	0,3	0,88	11,2	18,06
14	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	19,0	26,59
15	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	18,5	26,09
16	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	18,5	26,09
17	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	18,0	25,59
18	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	117,75	25,34
19	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	18,25	25,84
20	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	18,0	25,59
21	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	17,5	25,09
22	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	13,0	20,59
23	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	25,5	20,09
24	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	12,75	20,34
25	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	12,5	20,09
26	1,69	4,9	0,25	0,75	3,1	13,25	20,84

Литература

1. Якупов Н.М., Гатауллин И.Н., Хисматуллин Р.Н. Обследование, анализ и прогнозирование

долговечности строительных конструкций и рекомендации по их восстановлению. Методическое руководство. - Казань: ИММ РАН, 1996. 208 с.