

«Утверждаю»

Проректор по науке и инновациям,

проф., д.т.н.



Филонов М. Р.

29.12.2023

Заключение № 063/14-503-45

**«Исследование коррозионной стойкости и монтажной
системы из углеродистых сталей с горячим цинковым
покрытием»**

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
заведующий кафедрой металлургии и
защиты металлов, проф., д.т.н.

Дуб Алексей Владимирович

Ответственный исполнитель, к.т.н.

Волкова Ольга Владимировна

Исполнители:

зав. лабораторией МЗМ

Обухова Татьяна Анатольевна

инженер научного проекта
I категории, к.х.н

Сафонов Иван Александрович

научный сотрудник

Ковалев Александр Федорович

инженер научного проекта
I категории, к.т.н.

Шибаета Татьяна Владимировна

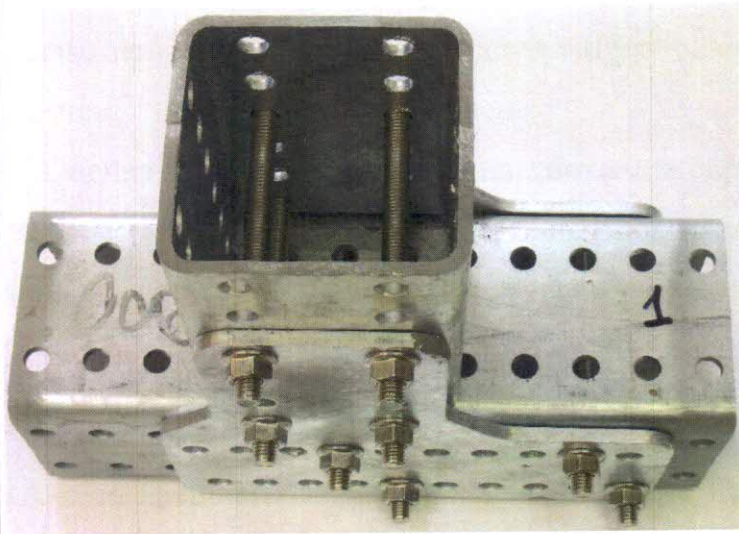
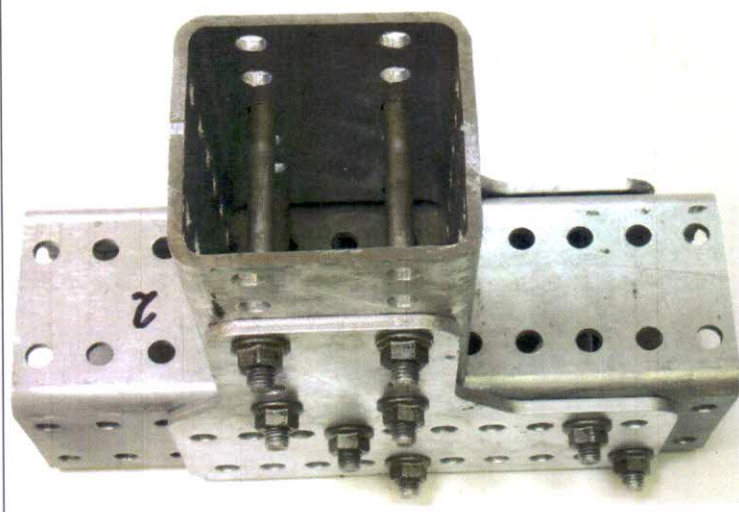
Заявитель	АО «Хилти Дистрибьюшн ЛТД»
Основание для проведения испытаний	Доп. соглашение №45 от 30.10.23 г. к договору № 063/14-503 от 06.10.14г.
Дата проведения исследований	начало 07 ноября 2023 г. окончание 07 декабря 2023 г.
Задачи испытаний	Дать оценку качества деталей с горячим цинковым покрытием
Образцы	Детали из углеродистых сталей с горячим цинковым покрытием с крепежными элементами из: - горячеоцинкованной стали; - коррозионностойкой стали.
Оборудование	- камера с одновременным воздействием соляного тумана и сернистого газа; - металлографический комплекс.
Документация	1. ГОСТ 9.307–2021 «ЕСЗКС. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля» 2. ГОСТ 15150–69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов, категории, условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды. 3. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 4. ГОСТ ISO9223–2017 Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка 5. СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» (актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85)
Результаты исследований	Заключение № 063/14-503-45

На исследование поступили узлы монтажной системы (табл. 1) из углеродистых сталей с горячим цинковым покрытием с крепежными элементами (болты, гайки) из:

- №1 - коррозионностойких сталей (КСС);
- №2 - углеродистых сталей с горячим цинковым покрытием.

Отбор образцов производился представителями Заказчика.

Таблица 1 – Внешний вид узлов и деталей в состоянии поставки

№	Изображение	Наименование элементов в составе узла
1		Профиль СН-100-5,8м ОС L=300 мм (срезы защищены*)
		Профиль СН-100-5,8м ОС L=150 мм (срезы НЕ защищены)
		Коннектор СН-100-LP L ОС
		Болт шестигр. M10x130 DIN 931 КСС А2
		Гайка с фланцем M10 DIN 6923 А2
2		Профиль СН-100-5,8м ОС L=300 мм (срезы защищены*)
		Профиль СН-100-5,8м ОС L=150 мм (срезы НЕ защищены)
		Коннектор СН-100-LP L ОС
		Болт шестигр. M10x130-F
		Гайка фланцевая S-M NU-FL-M10 HDG

* - на торцы нанесено цинкирующее покрытие методом аэрозольного напыления (цинковым спреем)

Цель работы:

1. Оценка сроков службы узлов из легкосборных стальных элементов с горячим цинковым покрытием в условиях, имитирующих неагрессивную, слабоагрессивную-1, слабоагрессивную-2, среднеагрессивную и сильноагрессивную среды по СП 28.13330.2017 и сопоставление степеней агрессивности сред с классификацией по ГОСТ ISO 9223;
2. Оценка влияния контакта с крепежными элементами (болты и гайки) из нержавеющей стали на срок службы элементов с горячим цинковым покрытием;
3. Оценка влияния отсутствия герметизации торцов на срок службы элементов с замкнутым прямоугольным сечением с периодической перфорацией по четырем сторонам при наличии защиты внутренних поверхностей горячим цинковым покрытием;
4. Оценка эффективности защиты цинковым спреем участков с поврежденным покрытием (места реза, сколов или иных локальных повреждений покрытия) и влияния на срок службы элементов с горячим цинковым покрытием.

При исследовании были выполнены следующие работы:

1. Ускоренные коррозионные испытания.
2. Анализ внешнего состояния поверхностей деталей.
3. Металлографический анализ.
4. Оценка коррозионной стойкости и долговечности.

Методики исследований.

1. Ускоренные коррозионные испытания проведены по ГОСТ 9.308–85 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний» в течение 720 ч (30 суток) в камере при одновременном воздействии соляного тумана и сернистого газа. Циклические испытания при воздействии 3% NaCl, сернистого газа концентрацией $(0,75 \pm 0,2)$ г/м³, влажности (98%) и температуры (40°С) в течение 8 ч; далее на воздухе в течение 16 ч.
2. Внешний вид поверхностей деталей до, во время и после испытаний оценивали визуально по ГОСТ 9.311–2021 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений» и по ГОСТ 9.302–88 «ЕСЗКС. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля» п.2.

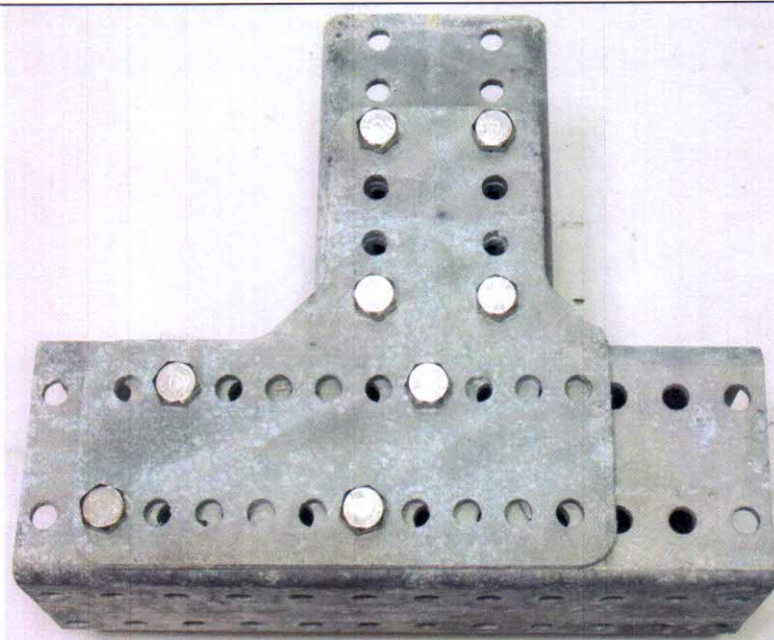
3. Металлографический анализ проводили на микроскопе ZEISS с системой анализа изображения «Thixomet». Шлифы изготовлены в поперечном сечении образцов.

4. Долговечность цинковых покрытий оценивали согласно агрессивности эксплуатируемых сред по СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» (СНиП 2.03.11-85), ГОСТ 9.039-74 «ЕСЗКС. Коррозионная агрессивность атмосферы», ГОСТ ISO9223-2017 «Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная активность атмосфер», ISO12944-2:2017 «Краски и лаки. Защита от коррозии стальных конструкций системами защитных покрытий».

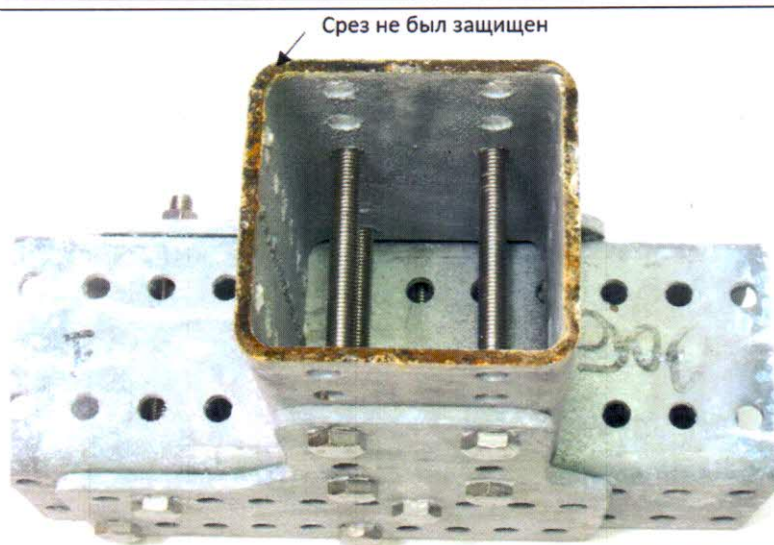
Результаты исследования

В результате исследования *внешнего вида* образцов установлено, что в состоянии поставки поверхности деталей матовые, ровные, однородные, без видимого рисунка кристаллизации и признаков нарушения сплошности покрытия, что соответствует требованиям ГОСТ 9.307-2021 «ЕСЗКС. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля».

После испытаний в камере одновременного воздействия соляного тумана и сернистого газа на внешних поверхностях, в зонах контакта и защищенных срезах элементов из оцинкованной стали образцов №1 (рис. 1 а, в) и №2 (рис. 1 г-е) после всего времени испытаний обнаружена коррозия цинка в виде сплошного белого налета. На торцах без дополнительной защиты зафиксированы признаки коррозии стальной основы в виде ржавчины (рис. 1 б).



(a)



(б)



(B)

№1

КСГ+КСТ

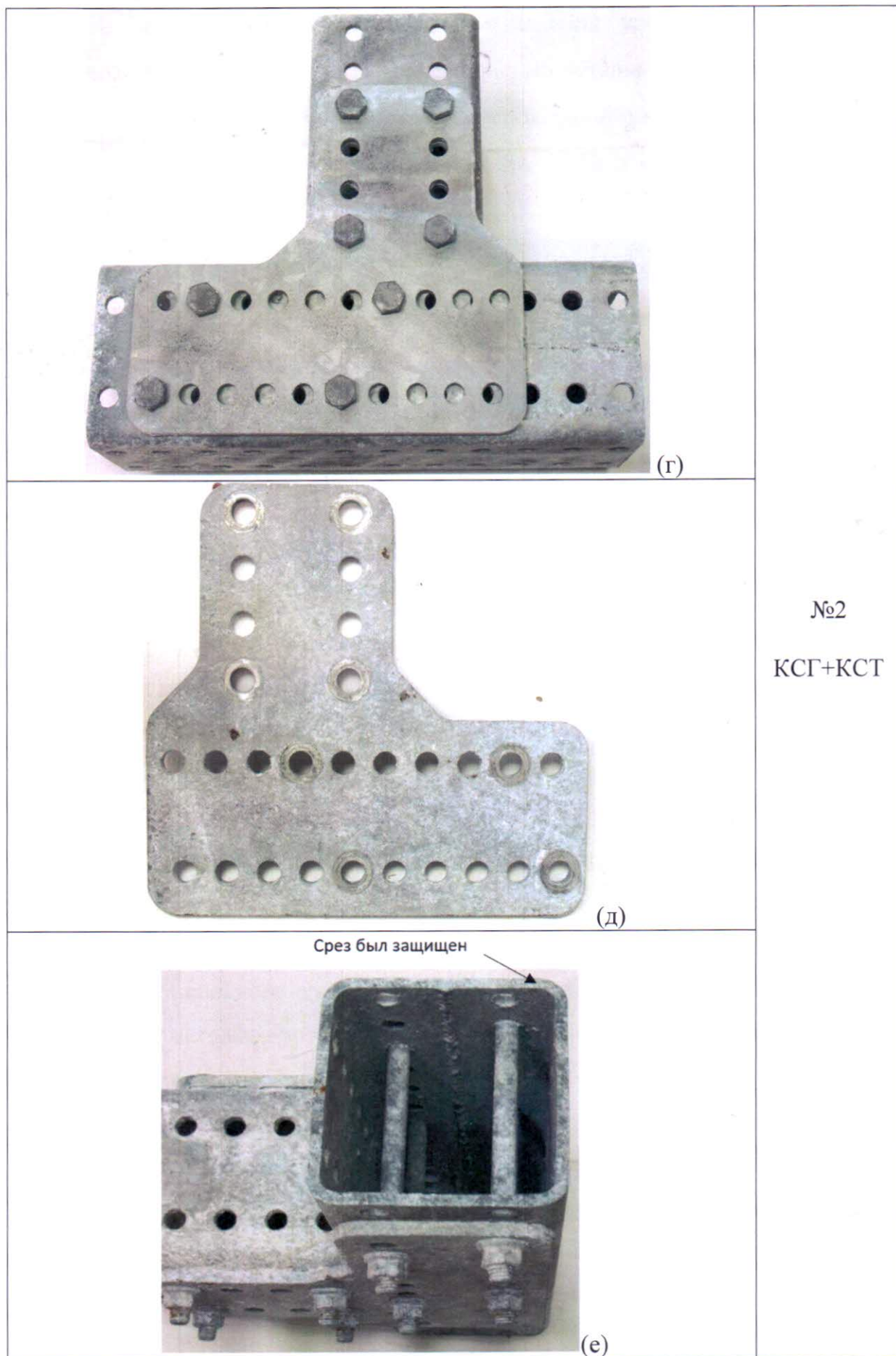


Рис. 2 Внешний вид деталей №1 (а-в) и №2 (г-е) после 30 циклов испытаний КСГ+КСТ

В результате металлографического анализа установлено, что горячее цинковое покрытие на элементах равномерно по толщине, которая составляет 80-100 мкм. После испытаний в коррозионно-агрессивной среде в цинковом покрытии зафиксирована равномерно-язвенная коррозия, глубина которой составляет до 15 мкм (рис. 3).

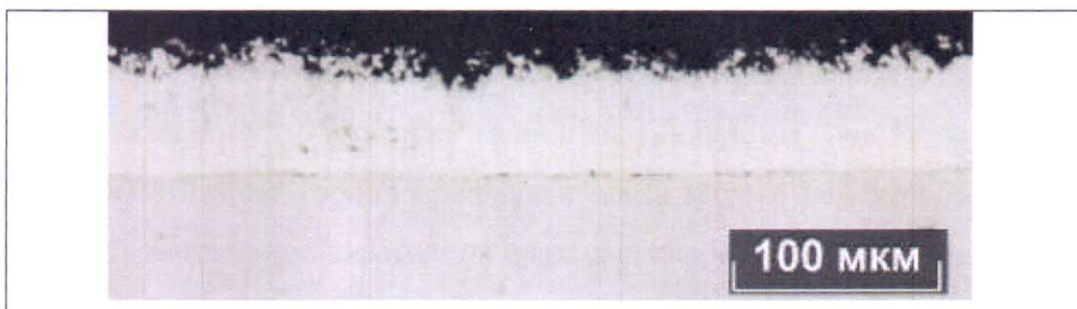


Рис. 3 Состояние материала элементов из горячеоцинкованной стали после 30 циклов испытаний в КСГ+КСТ

Анализ результатов исследования

Целью работы является исследование коррозионной стойкости и долговечности углеродистых сталей с горячим цинковым покрытием в контакте с элементами из оцинкованной и коррозионностойкой сталей неагрессивной, слабоагрессивной-1, слабоагрессивной-2, средне- и сильноагрессивной средах по СП 28.13330.2017.

При исследовании коррозионного поведения деталей, изготовленных из углеродистых сталей с горячими цинковыми покрытиями, проведены ускоренные циклические коррозионные испытания по методу одновременного воздействия нейтрального соляного тумана и сернистого газа. Оценку состояния деталей производили методами визуального и металлографического анализов.

Горячий способ нанесения покрытий позволяет получать гладкую поверхность деталей и одновременно обеспечить глубокую диффузию цинка в металл. Исследуемые цинковые покрытия обладают высокой адгезией за счет взаимной диффузии железа и цинка в поверхностных интерметаллидных фазах Zn-Fe, поэтому покрытия мало подвержены отслаиванию или скалыванию при ударах, механических нагрузках и деформациях обработанных изделий. Высокая адгезия увеличивает коррозионную стойкость покрытий. Защитное действие цинка в атмосфере связано с его способностью образовывать защитный слой, состоящий из

продуктов коррозии цинка. По мере формирования белой ржавчины защитный слой цинка постепенно уменьшается, чем толще первоначальный слой покрытия, тем дольше его защитное действие. В зонах, где покрытие повреждено, защита осуществляется в соответствии с механизмом катодной защиты.

Нанесение цинкового покрытия горячим способом подразумевает погружение деталей целиком в ванну с расплавленным металлом защитного покрытия. Форма профиля СН-100-5,8м ОС позволяет цинку проникнуть во все полости. В результате внутренняя поверхность профиля защищена цинковым покрытием наравне с внешней. Герметизация торцов профиля в таком случае нецелесообразна и даже может оказать негативное влияние на срок службы конструкции, так как профиль имеет перфорацию, через которую может попасть влага, а герметично закрытые торцы будут препятствовать свободному выходу жидкости и агрессивных веществ.

Как известно [В.Л. Розенфельд «Коррозия и защита металлов», Изд. «Металлургия», 1970], контакт коррозионностойких и углеродистых сталей является нежелательным из-за значительной разницы потенциалов и небольшой анодной поляризации железа. В исследуемых образцах цинк является промежуточным слоем при контакте оцинкованной и коррозионностойкой сталей. Следовательно, вероятность возникновения контактной коррозии между элементами мала. На скорость коррозии при контакте металлов с разными электрохимическими потенциалами влияет отношение площади контакта анода к катоду. В случае, когда более активный цинк (анод) имеет площадь превышающую площадь крепежных элементов из менее активной нержавеющей стали (катод), то влияние контакта металлов с разными потенциалами не оказывает значительного влияния на скорость протекания коррозии. В узле №1 отношение площади всех горячеоцинкованных элементов к общей площади крепежных элементов из нержавеющей стали более чем 7:1. На образцах после испытаний не обнаружено следов контактной коррозии. Сроки службы определены с учетом взаимодействия элементов с горячим цинковым покрытием с крепежными элементами из нержавеющей стали.

Агрессивность газовой среды определяли в соответствии с СП 28.13330.2017 (табл. 2), ISO 9223: 1992 и ISO 12944-2:1998a (табл. 3) для анализа коррозионной стойкости и долговечности оцинкованных сталей.

Таблица 2 – Группы агрессивных газов в зависимости от их вида и концентрации по СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии»

Наименование	Концентрация, мг/м ³ , для групп газов			
	A	B	C	D
Углекислый газ	До 2000	Св. 2000	-	-
Аммиак	До 0,2	Св. 0,2 до 20	Св. 20	-
Сернистый ангидрид	До 0,5	Св. 0,5 до 10	Св. 10 до 200	Св. 200 до 1000
Фтористый водород	До 0,05	Св. 0,05 до 5	Св. 5 до 10	Св. 10 до 100
Сероводород	До 0,01	Св. 0,01 до 5	Св. 5 до 100	Св. 100
Оксиды азота	До 0,1	Св. 0,1 до 5	Св. 5 до 25	Св. 25 до 100
Хлор	До 0,1	Св. 0,1 до 1	Св. 1 до 5	Св. 5 до 10
Хлористый водород	До 0,05	Св. 0,05 до 5	Св. 5 до 10	Св. 10 до 100

Таблица 3 – Степени коррозионной агрессивности атмосферы

СП 28.13330.2017 (СНиП 2.03.11-85)	По ГОСТ 9.039-74		ISO 9223: 1992		ISO 12944-2: 1998	
Наименование	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Не агрессивная	Не агрессивная	1	Очень низкая (внутри помещений)	C1	Очень низкая	C1
Слабо агрессивная	Мало агрессивная	2	Низкая (сельская)	C2	Низкая	C2
	Средне агрессивная	3	Средняя (пригородная)	C3	Средняя	C3
Средне агрессивная	Сильно агрессивная	4	Высокая (городская/ приморская)	C4	Высокая	C4
Сильно агрессивная	Очень сильно агрессивная	5	Очень высокая (промышленная)	C5	Очень высокая (промышленная)	C5-1
					Очень высокая (морская)	C5-M

Коррозионная стойкость цинка в атмосферных условиях зависит от следующих факторов: влажности, температуры и состава коррозионно-активных компонентов, основными из которых являются хлориды и сернистый газ. В условиях реальной эксплуатации деталей и конструкций из оцинкованных сталей со временем может происходить изменение практически всех факторов. Для получения расчетных сроков службы в конкретных условиях эксплуатации необходимо использовать усредненные данные скоростей коррозии цинка.

Коррозионная стойкость оцинкованной стали в атмосферных условиях определяется толщиной и качеством защитного покрытия, а также скоростью

образования защитной пленки продуктов коррозии цинка и ее устойчивостью во времени.

В средне- и сильноагрессивных средах за счет присутствия коррозионно-активных компонентов, таких как сернистого газа (SO_2) и хлоридов (Cl^-), происходит увеличение скоростей коррозии цинковых покрытий. Попадая на поверхность цинкового слоя, агрессивные компоненты переводят карбонатную пленку в растворимые соединения с образованием соединений $\text{Zn}(\text{OH})_2$ сульфатом ZnSO_4 или хлоридом ZnCl_2 , которые не обладают защитными свойствами, так как способствуют проникновению кислорода и влаги к поверхности металла.

Среды с повышенным содержанием сернистого газа и хлоридов вызывают усиленную коррозию цинкового покрытия при повышении влажности. При содержании в атмосфере SO_2 концентрацией 0,01% скорость коррозии цинка повышается от 1,5–2,0 мкм/год до 17 мкм/год при увеличении влажности от 40% до 100% соответственно. При увеличении содержания SO_2 скорость коррозии цинка возрастает.

По методике, разработанной в НИТУ МИСИС, проведена оценка срока службы горячего цинкового покрытия на стальных конструкционных деталях.

Коэффициент ускорения (K_y) для сред слабой, средней, сильной и очень сильной степеней агрессивности рассчитан по формуле (1). Известно, что состояние металла после испытания в камере соляного тумана (КСТ) в течение 30 суток соответствует состоянию металла после эксплуатации в реальных условиях в течение 20 лет (7300 сут).

$$K_y = 7300/30 = 243 \quad (1)$$

Сроки службы ($\tau_{\text{ср.сл.}}$, год) горячих цинковых покрытий рассчитаны исходя из толщины покрытия (h , мкм), скорости коррозии покрытия (V , мкм/сут) после ускоренных испытаний в испытательных камерах.

Расчет оценки сроков службы ($\tau_{\text{ср.сл.}}$) горячих цинковых покрытий проведен по формуле (2).

$$\tau_{\text{ср.сл.}} = (h \cdot K_y) / (V \cdot 365) \quad (2)$$

Результаты расчетных сроков службы горячих цинковых покрытий, толщиной не менее 55 мкм, в условиях эксплуатации по СП 28.13330.2017 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Сроки службы горячего цинкового покрытия на стальных деталях, года

Газообразная среда, классификация		СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003		
СП 28.13330.2017	ISO 12944-2:2017, ISO 9223-2017	сухая	норм.	влажная
Неагрессивная	C1	50	50	50
Слабоагрессивная I	C2	50	50	50
Слабоагрессивная II	C3	50	50	50
Среднеагрессивная	C4	50	42	35
Сильноагрессивная	C5	42	33	24

Таким образом, предлагаемые технические решения обеспечивают защиту от коррозии элементов при эксплуатации в условиях открытых слабо-, средне- и сильноагрессивных сред в соответствии с СП 28.13330.2017 (СНиП 2.03.11-85).

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований и оценки качества покрытий установлено, что детали с горячим цинковым покрытием, толщина которого составляет не менее 55 мкм, устойчивы к атмосферной коррозии и могут эксплуатироваться в средах средней, сильной и очень сильной агрессивности в контакте с крепежными элементами из горячеоцинкованной и коррозионностойких сталей:

Газообразная среда, классификация		СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003		
СП 28.13330.2017	ISO 12944-2:2017, ISO 9223-2017	сухая	норм.	влажная
Неагрессивная	C1	50	50	50
Слабоагрессивная I	C2	50	50	50
Слабоагрессивная II	C3	50	50	50
Среднеагрессивная	C4	50	42	35
Сильноагрессивная	C5	42	33	24

2. Защита участков поврежденного покрытия (мест реза, сколов и иных локальных повреждений) методом аэрозольного напыления цинка предотвратило появление следов коррозии.

3. Поверхность профилей с замкнутым прямоугольным сечением в исследованных узлах имеет равное защитное цинковое покрытие как снаружи, так и внутри и не требует герметизации торцов профилей.

4. При применении конструкций с покрытием горячий цинк в районах крайнего севера и приравненных к ним с высокой агрессивностью среды, но с длительным периодом отрицательных температур в течение года, срок службы может быть значительно выше. Так как при низких отрицательных температурах

скорость коррозии цинка близка к нулевым значениям, следовательно, коррозия цинкового покрытия возможна только в теплое время года.

5. Анализ результатов и выводы относятся только к испытанным деталям.

Отв. исп. Волкова О.В., каф. МЗМ
Тел.: 8(495) 951-22-34
e-mail: mail@expertcorr.misis.ru

Сброшоровано и пронумеровано

14 стр.

Проректор

Филиппов

