

РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

А. В. Барышников¹, И. В. Харламов²

¹ ООО АЦ «РИК», г. Барнаул

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Предлагается на основании разработанной авторами методики, при выборе рациональной конструктивной формы металлоконструкции (далее КФМК), учитывать различные варианты эксплуатации металлоконструкций (далее МК). Представлена методика расчета МК при четырех вариантах эксплуатации. Дополнены и предложены формулы расчета срока службы защитных покрытий МК с учетом поворота профилей относительно собственной оси и горизонта. Разработана методика расчета требуемых сечений МК при эксплуатации с допуском коррозионного износа материала МК.

Ключевые слова: Конструктивная форма, варианты эксплуатации металлоконструкций, срок службы защитного покрытия, расчет металлоконструкций.

Почти все МК эксплуатируются в агрессивных средах. Для определения рациональной КФМК с учетом эксплуатационных расходов необходимо учитывать воздействие агрессивной среды на МК.

В рамках разработанного метода выбора рациональной КФМК с учетом эксплуатационных расходов [1] предложены четыре возможных варианта эксплуатации металлоконструкций:

Первый – традиционный, предполагающий регулярное восстановление антикоррозионной защиты одновременно на всей поверхности МК после начала разрушения защитного покрытия в какой-либо точке конструктивных элементов. На наш взгляд этот вариант очень дорогостоящий.

Второй – с частично возобновляемой антикоррозионной защитой на отдельных участках элементов МК по мере разрушения на них защитных покрытий, позволяющий добиться сокращения эксплуатационных затрат за счет более полного использования срока службы антикоррозионной защиты;

Третий – без устройства антикоррозионной защиты в течение всего периода эксплуатации, что предполагает допустимость коррозии МК, но при этом снижаются эксплуатационные затраты за счет отсутствия работ по устройству антикоррозионной защиты, и уменьшения потерь от простоев производства. Однако, для обеспечения требуемого срока службы МК необходимо увеличивать сечения её элементов из-за воздействия на них агрессивной среды;

Четвертый – с устройством защитного покрытия на стадии строительства, и с последующей эксплуатацией МК без восстановления антикоррозионной защиты. При этом варианте эксплуатации, в отличие от третьего, потребуется меньшее увеличение сечений элементов МК.

Для определения рациональной КФМК с учетом эксплуатационных затрат необходимо учитывать расходы на возобновление защитного покрытия (для первого, второго вариантов эксплуатации), а также затраты на увеличение сечений для обеспечения требуемого срока службы конструкции при эксплуатации без защитного покрытия (третий и четвертый варианты эксплуатации).

В основу расчетов положены экспериментальные исследования И.И. Кошина на кафедре МК МИСИ им. В.В. Куйбышева под руководством Н.С. Стрелецкого [4]. В этих исследованиях для различных участков профилей были получены значения коррозионных потерь (рисунок 1). В дальнейшем эти результаты были неоднократно апробированы и подтверждены другими исследователями.

При первом варианте эксплуатации затраты на содержание в большей степени состоят из затрат на восстановление антикоррозионного покрытия. При этом возможны лакокрасочные (ЛКП), металлизированные (МП) и комбинированные (КП) защитные покрытия.

Продолжительность межремонтного периода ЛКП определяется с учетом конструкционного материала, способа подготовки поверхности, формы сечения элементов и сис-

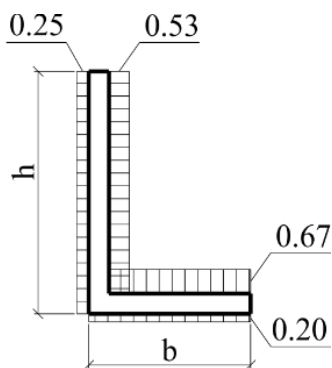


Рисунок 1 – Коррозионные потери на плоскостях уголка (грамм)

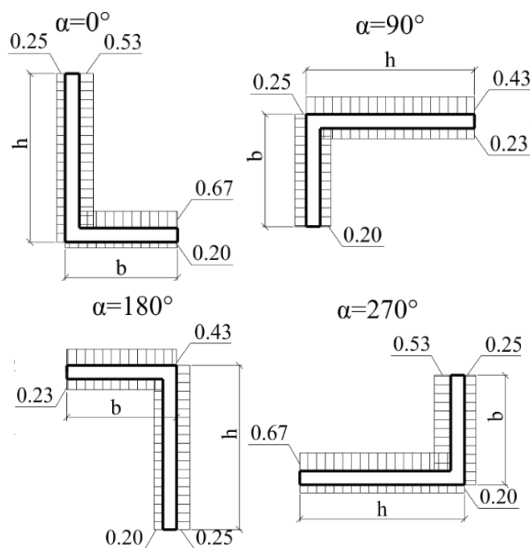


Рисунок 2 – Коррозионные потери $\Pi_j^i(\alpha, 0^\circ)$ на плоскостях уголка для различных углов поворота α относительно собственной оси (грамм)

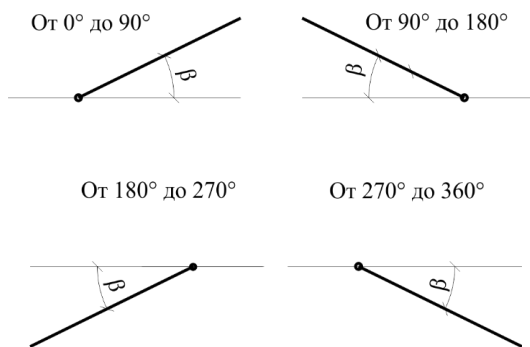


Рисунок 3 – Острый угол относительно горизонта $\beta = [0^\circ, 90^\circ]$

темы покрытия по формуле, предложенной Гипроцветметом и МИСИ [6]

$$t_{\text{служб}}^{\text{лк}} = T_3 \cdot K_m \cdot K_\phi \cdot K_{n,n} \cdot m_3, \quad (1)$$

где T_3 – срок службы покрытия на горизонтальном плоском элементе из малоуглеродистой стали, лет; K_m – коэффициент влияния коррозионной стойкости конструкционного материала; $K_{n,n}$ – коэффициент влияния подготовки поверхности; K_ϕ – коэффициент влияния КФМК на срок службы покрытия; m_3 – коэффициент условий работы защитного покрытия.

Промежуток времени, необходимый для достижения отказа защитных свойств определяется по формуле, предложенной Е.В. Гороховым [2]

$$T_3 = \frac{\Delta P(N)}{K \cdot K_a}, \quad (2)$$

где $\Delta P(N)$ – потери по массе от коррозии, г/м^2 ; K – средняя скорость коррозии, $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$; K_a – коэффициент влияния угла наклона элемента к горизонту.

При повороте профиля относительно собственной оси (угол α) (рисунок 2) и относительно горизонта (острый угол β) (рисунок 3) происходит изменение скорости коррозии по различным плоскостям. Так как в формулах (1) и (2) не учитывается угол поворота α профилей относительно собственной оси, нами предлагается ввести поправочный коэффициент $K_n(\alpha, \beta)$ для расчета срока службы защитного покрытия.

Результаты экспериментальных исследований кафедры МК МИСИ им. В.В. Куйбышева под руководством Н.С. Стрелецкого были получены только для углов $\alpha = 0^\circ$ и $\beta = 0^\circ$. С учетом формы поперечного сечения и возможных ориентаций сечений в пространстве предлагаем определять значения коррозионных потерь при повороте сечений на угол $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ (рисунок 2). При повороте сечения на промежуточные значения коррозионные потери предлагаем определять методом линейной интерполяции.

Так как срок службы защитного покрытия всего элемента в целом определяется минимальным сроком службы антикоррозионной защиты всех его плоскостей, то коэффициент K_n для профиля рассчитывается по плоскости с наибольшими коррозионными потерями.

Для профиля с наибольшими коррозионными потерями ($\Pi_{\text{max}} = 0,67$) скорость корро-

зии определяется степенью агрессивности среды, поэтому для него коэффициент скорости коррозии $K_n(\alpha, 0^\circ)$ должен быть равен 1. Значения коэффициентов скорости коррозии при повороте на угол α определяются по формуле

$$K_n(\alpha, 0^\circ) = \frac{P_{\max}(\alpha, 0^\circ)}{P_{\max}}, \quad (3)$$

где $P_{\max}(\alpha, 0^\circ)$ – наибольшие коррозионные потери профиля при повороте на угол α , грамм; $P_{\max}$ – наибольшие коррозионные потери всех профилей, грамм.

Полученные значения коэффициентов $K_n(\alpha, 0^\circ)$ при повороте на угол α представлены в таблице 1. Коэффициенты скоростей коррозии $K_n(\alpha, \beta)$ в зависимости от угла наклона к горизонту $\beta = [0^\circ, 90^\circ]$ определяются по формуле

$$K_n(\alpha, \beta) = K_n(\alpha, 0^\circ) + \frac{K_n^{\min} - K_n(\alpha, 0^\circ)}{90} \cdot \beta, \quad (4)$$

где $K_n^{\min}$ – коэффициент скорости коррозии плоскостей вертикальных элементов.

На основании анализа результатов исследований кафедры МК МИСИ им. В.В. Куйбышева под руководством Н.С. Стрелецкого коррозионных потерь для открытых вертикальных плоскостей элементов (рисунок 2) и формулы (3) коэффициент

$$K_n^{\min} = \frac{0,25}{0,67} = 0,37.$$

Так как коэффициент $K_n(\alpha, \beta)$ учитывает тип профиля и угол поворота относительно горизонта β , то при его использовании для расчета срока службы ЛКП по формулам (1) и (2) необходимо исключить коэффициенты K_a и K_ϕ .

Таблица 1 – Значение коэффициентов $K_n(\alpha, 0^\circ)$ скорости коррозии различных профилей при повороте на угол α

Профиль	Угол поворота α			
	0°	90°	180°	270°
Уголок	1,00	0,64	0,64	1,00
Двутавр	0,67	0,93	0,67	0,93
Швеллер	0,82	0,61	0,82	0,93
Тавр	0,84	1,00	0,64	1,00
Прямоугольная труба	0,64	0,64	0,64	0,64
Круглая труба	0,58	0,58	0,58	0,58

Тогда срок службы ЛКП покрытия нами предлагается рассчитывать по уточненной формуле

$$t_{\text{служ}}^{\text{ЛК}} = \frac{\Delta P(N) \cdot K_m \cdot K_{n,n} \cdot m_3}{K \cdot K_n(\alpha, \beta)}, \quad (5)$$

где $K_n(\alpha, \beta)$ – коэффициент скорости коррозии профиля при его повороте относительно собственной оси на угол α и относительно горизонта на угол β , определяемый по таблице 1 и формуле (4).

Срок службы МП предлагается рассчитывать с учетом полученного коэффициента $K_n(\alpha, \beta)$ по формуле

$$t_{\text{служ}}^{\text{М}} = t_{\text{служ}}^{\text{М,эл}} \cdot K_n(\alpha, \beta), \quad (6)$$

где $t_{\text{служ}}^{\text{М,эл}}$ – срок службы МП на основе цинка и алюминия по результатам исследований, проведенных в ЦНИИСК [5], лет.

Кикиным А.И. предлагается рассчитывать срок службы КП как сумму сроков службы ЛКП и МП, умноженную на 1,6 [3].

С учетом формул (5) и (6) срок службы КП можно определить по формуле

$$t_{\text{служ}}^{\text{КОМБ}} = 1,6 \cdot (t_{\text{служ}}^{\text{ЛК}} + t_{\text{служ}}^{\text{М}}), \quad (7)$$

где $t_{\text{служ}}^{\text{ЛК}}$ – срок службы ЛКП, определяемый по формуле (5), лет; $t_{\text{служ}}^{\text{М}}$ – срок службы МП, определяемый по формуле (6), лет.

Вторым вариантом предлагается эксплуатация с разбивкой на элементы МК и плоскости по группам восстановления. Элементы с одинаковым сроком службы защитного покрытия объединяются в отдельные группы. Каждая из групп будет восстанавливаться с периодичностью, равной минимальному сроку службы защитного покрытия всех плоскостей элементов, входящих в нее.

Для расчета срока службы защитного покрытия отдельных плоскостей элементов МК предлагается ввести коэффициент скорости коррозии $k_j^i(\alpha, \beta)$ (рисунок 4).

Он рассчитывается для каждого j -ого участка i -ой плоскости профиля при повороте на угол α и β аналогично коэффициенту $K_n(\alpha, \beta)$ для первого варианта эксплуатации, только по формулам

РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

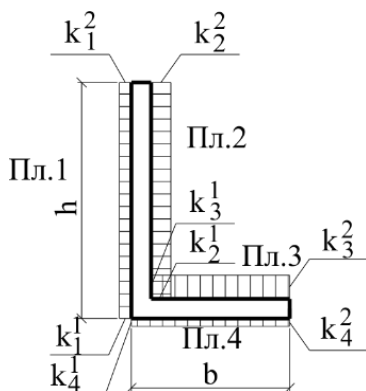


Рисунок 4 – Параметрическое описание скорости коррозии на плоскостях уголка

Таблица 2 – Значение коэффициентов $k_j^i(\alpha, 0^\circ)$ скорости коррозии уголка при повороте на угол α

Коэффициент	Угол поворота			
	0°	90°	180°	270°
k_1^1	0,37	0,64	0,37	0,30
k_1^2	0,37	0,64	0,37	0,30
k_2^1	0,79	0,34	0,30	1,00
k_2^2	0,79	0,34	0,30	1,00
k_3^1	1,00	0,30	0,34	0,79
k_3^2	1,00	0,30	0,34	0,79
k_4^1	0,30	0,37	0,64	0,37
k_4^2	0,30	0,37	0,64	0,37

$$k_j^i(\alpha, 0^\circ) = \frac{\Pi_j^i(\alpha, 0^\circ)}{\Pi_{\max}}, \quad (8)$$

$$k_j^i(\alpha, \beta) = k_j^i(\alpha, 0^\circ) + \frac{K_{\Pi}^{\min} - k_j^i(\alpha, 0^\circ)}{90} \cdot \beta \quad (9)$$

где $\Pi_j^i(\alpha, 0^\circ)$ – коррозионные потери j-ого участка i-ой плоскости профиля, грамм; $\Pi_{\max}$ – наибольшие коррозионные потери всех профилей, грамм.

Полученные значения коэффициентов $k_j^i(\alpha, 0^\circ)$, например для уголка, при повороте на угол α представлены в таблице 2.

Для второго варианта эксплуатации рассчитывать срок службы ЛКП на отдельных

плоскостях профилей нами предлагается определять по формуле

$$t_{\text{служб}}^{\text{ЛК}} = \frac{\Delta P(N) \cdot K_m \cdot K_{n,n} \cdot m_3}{K \cdot k_j^i(\alpha, \beta)}. \quad (10)$$

При третьем варианте эксплуатации порядок расчета МК должен учитывать увеличение сечений элементов МК на стадии проектирования для обеспечения прогнозируемого срока службы под действием агрессивной среды. Расчет производится в четыре этапа.

На первом этапе расчета требуется получить из значений коррозионных потерь в граммах, представленных на рисунке 1, значения скоростей коррозии на плоскостях элементов в мм/год при эксплуатации без защитного покрытия для заданной степени агрессивности и влажности. Для этого необходимо воспользоваться полученными ранее коэффициентами $k_j^i(\alpha, \beta)$, которые будут умножаться на численное значение фактической скорости коррозии.

На втором этапе расчета определяются потери сечений $A_{\text{пот}}$ от коррозии и геометрические характеристики профилей в любой момент эксплуатации. При неравномерном изменении сечений будет смещаться центр тяжести, что приведет к появлению эксцентриситетов. На рисунке 5 представлен общий случай неравномерного изменения геометрических характеристик сечения с появлением эксцентриситетов e_x , e_y , а также $e_{\text{кр}}$ относительно поперечного усилия F .

На третьем этапе расчета производится определение запаса несущей способности элементов МК на основании СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» и расчетной схемы до прогнозируемого периода эксплуатации или до тех пор, пока МК не перестанет удовлетворять требованиям недостижимости предельных состояний. При расчете необходимо учитывать изменение расчетной схемы с возникающими эксцентриситетами e_x , e_y , $e_{\text{кр}}$, дополнительные изгибающие моменты M_{ex} , M_{ey} , и крутящий момент $M_{\text{кр}}$, определяемые по формуле

$$\begin{cases} M_{ex} = N \cdot e_x \\ M_{ey} = N \cdot e_y \\ M_{\text{кр}} = F \cdot e_{\text{кр}} \end{cases} \quad (11)$$

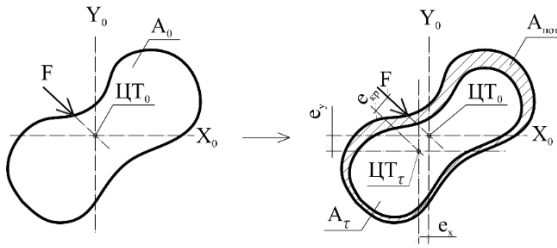


Рисунок 5 – Изменение расположения центра тяжести сечения, при потере площади (F , A_0 , A_τ , ЦТ_0 , ЦТ_τ – поперечное усилие, площади и центры тяжести сечения на этапе проектирования и на этапе эксплуатации в t лет соответственно)

где N – сжимающее или растягивающее усилие; F – поперечное усилие; e_x , e_y – эксцентриситеты относительно осей X и Y соответственно; $e_{\text{кр}}$ – эксцентриситет относительно поперечного усилия F .

На четвертом этапе расчета МК для тех элементов, которые не обеспечивают прогнозируемый период эксплуатации, необходимо произвести увеличение сечений, с возвратом ко второму этапу. Расчет повторяется до тех пор, пока не будет обеспечен запас несущей способности МК на требуемый срок службы с учетом коррозионных потерь. Для фасонных профилей увеличение сечений производится согласно сортаменту.

При четвертом варианте эксплуатации расчет МК производится аналогично третьему варианту, однако подбор необходимых сечений элементов производится на расчетный срок службы T_p^i , определяемый по формуле

$$T_p^i = T_n - T_n^i, \quad (12)$$

где T_n – прогнозируемый срок службы МК, лет; T_n^i – срок службы защитного покрытия, нанесенного на стадии строительства, для i -ого элемента МК, лет.

Выводы:

1. Предложены уточненные формулы расчета срока службы ЛКМ, МП, КП, учитывающие углы поворота элементов МК относительно собственной оси и горизонта.

2. Предложены формулы расчета срока службы защитного покрытия при эксплуатации МК с разбивкой на элементы и плоскости по группам восстановления (второй вариант эксплуатации).

3. Предложены методики расчета МК при эксплуатации с допуском коррозионного износа материала МК (третий и четвертый варианты эксплуатации), учитывающие изменение геометрической схемы конструкции в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников, А. В. Учет факторов и методика поиска рациональной конструктивной формы металлоконструкций с учетом приведенных затрат [Электронный ресурс] / А. В. Барышников, И. В. Харламов // X Всероссийская науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2013»: сборник научных статей. – Барнаул. – 2013. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/stro_y_konstr_tez_2013.pdf.
2. Горохов, Е. В. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / Е. В. Горохов, Я. Будка, М. Лубиньски и др.; под. ред. Е. В. Горохова – М. : Стройиздат, 1994. – 488 с.
3. Кикин, А. И. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А. И. Кикин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1984. – 3012 с.
4. Кошин, И. И. Экспериментальное изучение влияния конструктивной формы элементов стальных конструкций на стойкость против атмосферной коррозии / И. И. Кошин // Стальные конструкции, МИСИ им. В.В.Куйбышева. – М., 1956. – № 10. – С. 21-28.
5. Марутьян, С. В. Долговременная защита от коррозии стальных строительных конструкций / С. В. Марутьян // Промышленное и гражданское строительство. – 1997. – № 6. – С. 40-41.
6. Руководство по повышению долговечности строительных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах предприятий цветной металлургии / Гипроцветмет. – М. : МЦМ СССР, 1983. – 67 с.

Барышников А.В. – инженер-программист ООО АЦ «РИК», E-mail: Gepard.a@mail.ru.

Харламов И.В. – к.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: hiv@mail.altstu.ru.