

## ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ В МЕСТАХ СОЕДИНЕНИЯ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*А.П. Иванова, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина*

В статье анализируются причины, приводящие к разрушению многоэлементных металлических конструкций, внимание уделено влиянию вида деформации на коррозионный износ элементов таких конструкций и возможность их безаварийной эксплуатации. Со временем несущая способность конструкций снижается вследствие накопления повреждений или появления и развития дефектов, поэтому выявление резерва несущей способности становится важной практической задачей. Перспективность этого направления заключается в расширении возможностей прогнозирования долговечности конструкции применительно к условиям ее эксплуатации.

**Введение.** Среди строительных конструкций особое место занимают стержневые металлоконструкции, которые широко применяются в различных отраслях промышленности. Такие конструкции подвергаются воздействию квазистатических, циклических, динамических и случайных нагрузок, они эксплуатируются в условиях коррозионных сред и испытывают влияние перепада температур. Эти факторы приводят к уменьшению несущей способности и сокращению расчетного срока эксплуатации конструкций [1,2,5].

**Состояние вопроса.** Основные причины, приводящие к разрушению стержневых металлоконструкций - это дефекты монтажа или изготовления, использование металла с характеристиками ниже проектных значений, ошибки проекта и, главным образом, неполный учет возможных нагрузок и недостаточная система конструктивных связей. Примерно 60% аварий происходит во время строительства, когда не все элементы конструкции собраны и замкнуты в стыках и узлах (рис. 1.).

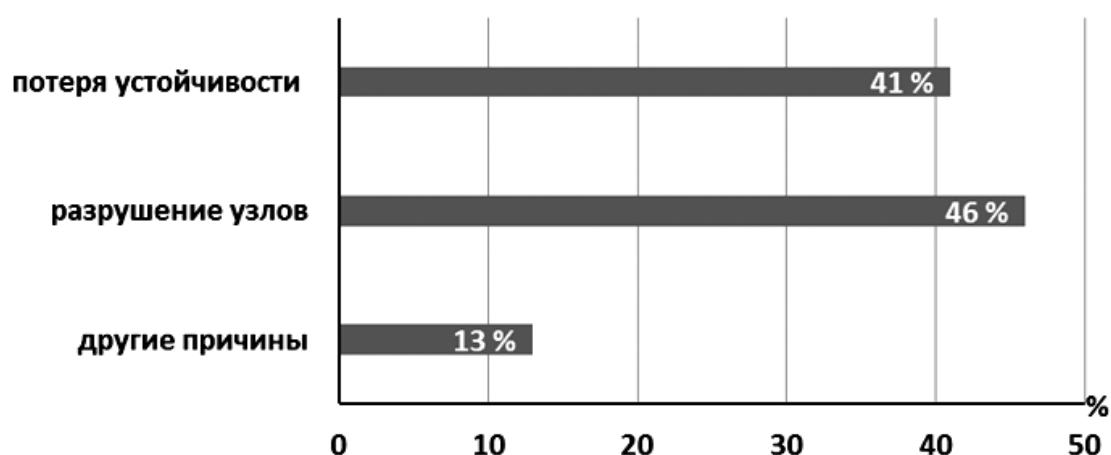


Рис. 1. Причины разрушения стержневых металлоконструкций

Анализ отказов в работе стальных конструкций с хрупким и квазихрупким разрушением их элементов свидетельствует о влиянии длительности эксплуатации конструкций на вероятность зарождения и развития хрупких трещин. Так, 50% всех отказов в работе происходит в первую зиму эксплуатации, 14% - во вторую, 8% - в третью зиму и т.д. До 80% всех отказов происходит за первые пять лет эксплуатации.

Повреждения конструкций по характеру влияния на несущую способность можно разделить на следующие виды:

- изменяющие геометрические характеристики поперечных сечений;
- изменяющие характер напряженно-деформированного состояния конструктивных

элементов;

- изменяющие конструктивную схему, вследствие нарушения связности между конструктивными элементами.

Обработка результатов обследования технического состояния металлических конструкций шахт Кривого Рога показала, что существует зависимость между видом деформации, испытываемой элементом конструкции и его коррозионным повреждением (рис. 3).

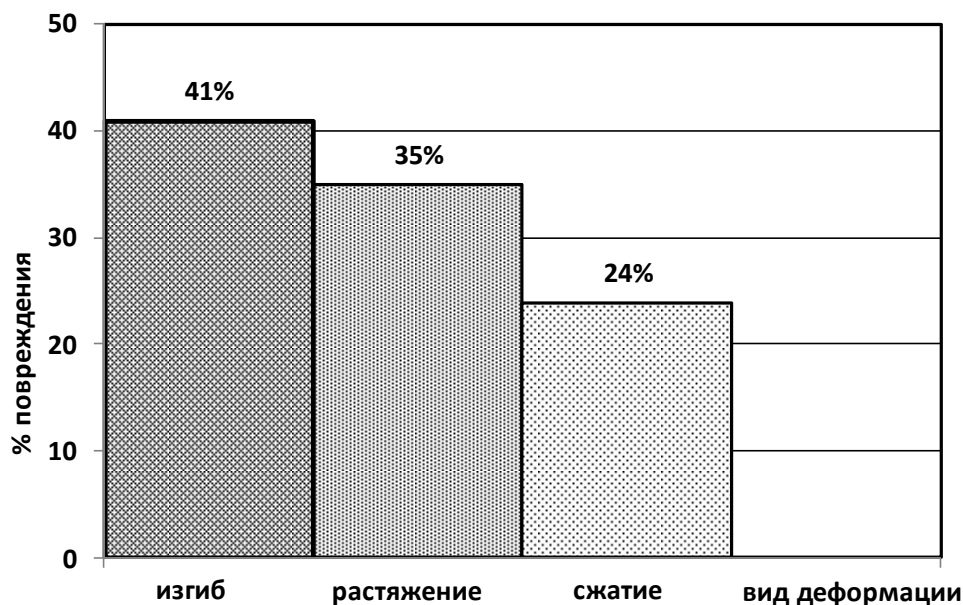


Рис. 2. Зависимость коррозионных повреждений от вида деформации

Максимальное количество повреждений получили изгибаемые стержни. Это объясняется тем, что при изгибе - поперечное сечение элемента в сжатой зоне уменьшается, а в растянутой увеличивается. Это касается и растянутых стержней. Можно предположить, что увеличение длины стержней приводит к тому, что увеличивается площадь контакта с агрессивной средой.

Применительно к металлическим конструкциям, понятие дефектность материала напрямую связано с коррозионным износом, который приводит к отказу отдельных элементов конструкций. Именно локальные повреждения иногда влекут за собой потерю несущей способности всей конструкции, а если элемент является основным и несущим, то может разрушиться весь объект.

**Постановка задачи.** В данной работе предлагается рассмотреть локальную коррозию, которая возникает в местах соединения отдельных ее элементов.

Соединение стержневых элементов могут осуществляться различными способами. Вне зависимости от конструктивных решений участок стержня в месте его соединения с другим стержнем или соединительным элементом может рассматриваться как фрагмент плосконапряженной пластины (ПНП), ослабленный отверстиями для крепежных элементов. Тогда разрушение конструкции может произойти не в каком-либо стержне в целом, а в месте его соединения, вследствие разрыва связей между элементами. Так как при проектировании используются, как правило, стандартные профили с установленными типоразмерами, то увеличение толщины без дополнительных технологических операций, возможно только при использовании профиля с большей толщиной сечения, а, следовательно, большего типоразмера и площади погонного метра. Очевидно, что такое решение задачи является не рациональным.

Представляется целесообразным определение долговечности как конструкции в целом, состоящей из стержней, работающих на растяжение или сжатие, так и отдельных участков стержней, как фрагментов ПНП, где поле напряжений имеет неоднородный характер.

В последнем случае решение осуществляется в рамках плоской задачи теории упругости.

**Результаты исследований.** Для решения задачи долговечности в качестве модельной конструкции рассмотрим шестнадцатистержневую плоскую ферму, геометрическая схема, граничные условия и условия нагружения для которой приведены на рис. 3.

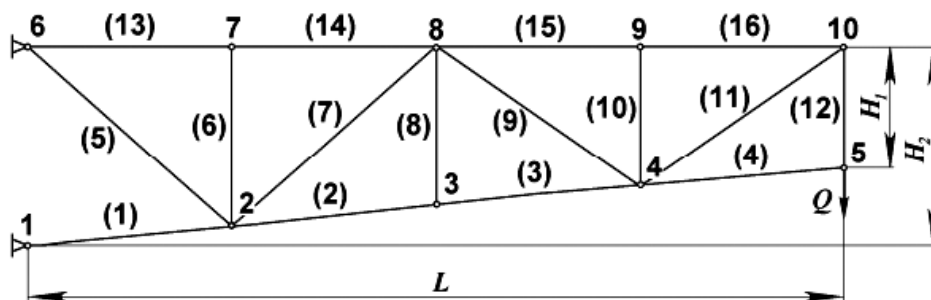


Рис. 3. Шестнадцатизлементная стержневая конструкция

Параметры конструкции и характеристики материала следующие:  $L = 600$  см,  $H_1 = 150$  см;  $H_2 = 250$  см,  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа;  $[\sigma] = 240$  МПа. Величина приложенной нагрузки  $Q = 15$  кН. Скорость коррозии  $v_0 = 0,1$  см/год,  $k = 0,005$  МПа<sup>-1</sup> - коэффициент модели коррозионного износа [6]. В таблице 1 приведены параметры элементов для приведенной расчетной схемы (рис. 1).

Таблица 1

сечение элементов нижнего пояса	сечение раскосов и элементы верхнего пояса	сечение стоек
неравнополочный угол №14	равнополочный угол №11	равнополочный угол №9

Долговечность фермы при этом составила 3,02 года. При решении данной задачи предполагалось, что коррозионный процесс в местах соединения стержней происходит так же, как и во всей конструкции в целом. Ниже предлагается учет локальной коррозии в местах соединения.

С целью исследования коррозионных процессов в местах соединений стержневых элементов, рассмотрим вариант крепления стержней фермы к фасонке с помощью болтов (рис. 4).

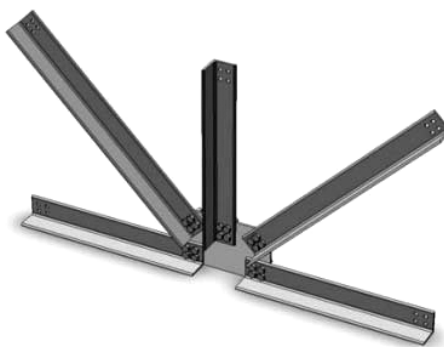


Рис. 4. Соединение элементов в узлах фермы:

Задача долговечности фермы с учетом локальной коррозии в местах соединения стержней включает в себя две расчетные схемы, связанные единой постановкой, но каждая из которых имеет свои особенности. Общим для них является наличие обратной связи в моделях расчета. Отличие же состоит в том, если число параметров описывающих процесс коррозии в элементах фермы конечно, то при моделировании этого процесса на участке стержня в месте его крепления, он может рассматриваться как фрагмент ПНП, где скорость коррозии зависит от напряжений. Так как напряженно-деформированное состояние существенно неоднородно по его области, число таких параметров стремится к бесконечности. Именно эта особенность и определяет отличие данного исследования от большинства известных работ.

Независимо от конструктивных решений, в этом случае возникает необходимость использования расчетной схемы ПНП. Наличие отверстий для соединяемых элементов обуславливает необходимость учета концентраторов напряжений, которые могут существенно повлиять на результат решения задачи в целом.

Алгоритм решения задачи долговечности ПНП.

Для решения задачи долговечности корродирующих конструкций традиционно используется метод конечных элементов (МКЭ). При его реализации для расчета ПНП вычислительный алгоритм строится на следующих гипотезах:

1. Механизм коррозии одинаков для всех точек конструкции и неравномерность процесса, если это не оговорено особо, вызывается только неравномерностью поля напряжений.
2. Существует некоторое эквивалентное напряжение, при котором коррозионный процесс в случае сложного напряженного состояния протекает с той же скоростью, что и при простом.
3. Влияние изменения геометрических характеристик на рост напряжений значительно превосходит влияние изменения внутренних силовых факторов.

В данной работе предлагается использовать треугольный конечный элемент (КЭ) переменной толщины с двенадцатью степенями свободы (рис. 5), подробное описание которого приведено в работе [4]. Это дает возможность построить более точную модель коррозионного процесса, использующую второй порядок аппроксимации функции толщины.

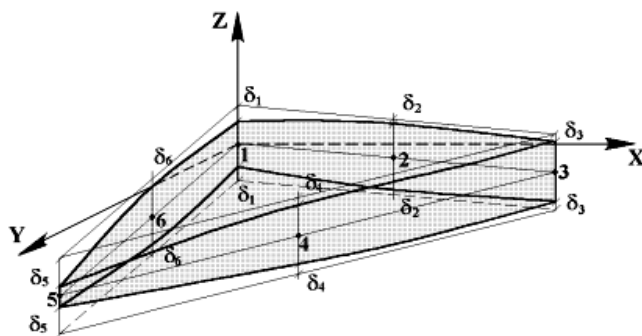


Рис. 5. Треугольный КЭ переменной толщины с двенадцатью степенями свободы

Модель коррозионного износа, где в качестве изменяющихся геометрических параметров принимаются толщины элементов в узловых точках, имеет вид:

$$\frac{d[H]}{dt} = -v_0(1 + k \cdot (t)), [H]_{t=0} = [H]_0, \quad (6)$$

где  $[H]$  – матрица  $N \times n$  геометрических характеристик элементов конструкции,  $N$  – количество КЭ в модели конструкции,  $n$  – количество параметров, определяющих геометрические размеры элемента (для предложенного КЭ  $n=6$ ),  $\sigma_{eq}$  – абсолютное значение эквивалентного напряжения.

Для модели (6) в работе [3] была получена аналитическая формула долговечности плосконапряженного элемента, подверженного коррозионному износу:

$$t = \frac{h_0}{v_0} \cdot \sigma_{eq} \cdot \left[ k \cdot \ln \frac{\sigma_{eq0} \cdot (1 + k \cdot \sigma_{eq})}{\sigma_{eq} \cdot (1 + k \cdot \sigma_{eq0})} + \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq0}}{\sigma_{eq} \cdot \sigma_{eq0}} \right] \quad (7)$$

В качестве эквивалентного напряжения принимается комбинация максимального главного напряжения  $\sigma_1$  и интенсивности напряжений  $\sigma_{int}$  (эффективные напряжения по Мизесу):

$$\sigma_{eq} = \sigma_{int} + \omega \cdot (\sigma_1 - \sigma_{int}), \quad (8)$$

где  $\omega$  – константа,  $\omega \in [1; 0]$ . В данном случае:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (9)$$

$$\sigma_{int} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (10)$$

Для случая расчетной схемы ПНП при вычислении долговечности также применяется полуаналитический алгоритм решения СДУ, использующий формулу (7).

Фрагмент стержня углового профиля вблизи соединения рассмотрим как ПНП, ослабленную круговыми вырезами под соединительные элементы (рис. 6).

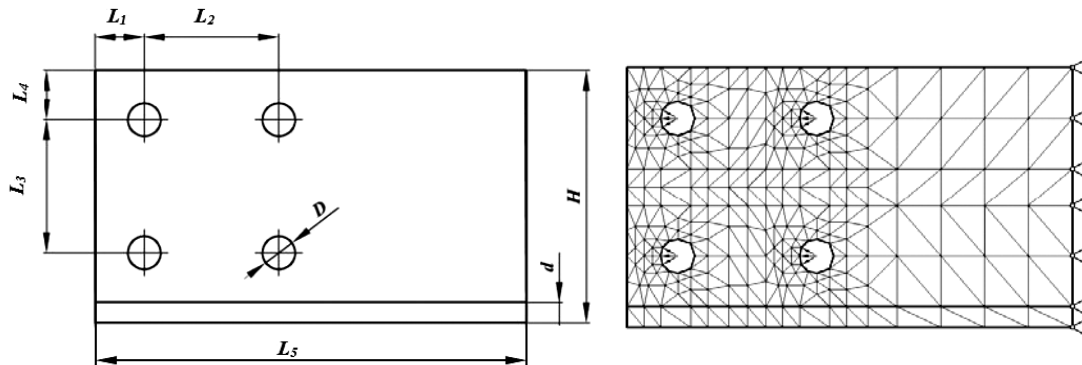


Рис. 6. Расчетная схема и конечно-элементная модель ПНП (299 узлов, 513 КЭ)

Геометрические размеры для фрагмента уголка №11:  $L_1 = L_4 = 1,95$  см,  $L_2 = L_4 = 6,3$  см,  $L_5 = 18$  см,  $H = 11$  см,  $D = 1,3$  см,  $d = 0,8$  см. Предельно допустимое значение напряжений  $[\sigma] = 240$  МПа. Конечно-элементная модель пластины представлена на рис. 6.

Для расчета мест соединений стержневых элементов, необходимо знать значения внутренних усилий, возникающих в элементах фермы. Для численной иллюстрации в каждой из четырех групп стержневых элементов выбирались стержни, в которых внутренние усилия (по абсолютной величине) были максимальны (см. рис. 1):  $P_{н.п.} = 3,65$  кН,  $P_{в.п.} = 3,65$  кН,  $P_c = 3,65$  кН. В таблице 2 приведены результаты расчета долговечности фрагментов стержневых элементов в местах их соединения.

Таблица 2.

Номер стержневого элемента	Тип сечения	Долговечность, лет
Нижний пояс (элемент1)	Неравнополочный уголок №14/9 (h=1,0 см)	2,104
Верхний пояс (элемент13)	Равнополочный уголок №11 (h=0,8 см)	1,178

Стойки (элемент12)	Равнополочный уголок №9 (h=0,8 см)	1,722
Раскосы (элемент11)	Равнополочный уголок №11 (h=0,8 см)	1,870

Из приведенных результатов следует, что игнорирование локальной коррозии в местах соединений стержней приводит к существенному завышению расчетного значения долговечности, полученного из решения предыдущей задачи (3,02 года).

Разрушение конструкции происходит, таким образом, не вследствие исчерпания несущей способности каким-либо ее элементом, а при разрыве связей между отдельными стержнями, в то время как их запас несущей способности еще значителен.

#### **Выводы.**

1. Значительное разрушающее воздействие на стержневые металлоконструкции конструкции оказывают условия эксплуатации и локальные повреждения. При этом лишь часть воздействий, приводящих к разрушениям, учитывается действующей нормативной базой. В связи с этим актуальной является задача более глубокого изучения поведения стержневых металлоконструкций в условиях нерегламентированных нормами воздействий, в том числе при частичном повреждении и разрушении отдельных элементов.

2. Результаты исследований позволили сделать вывод о том, что при расчете долговечности корродирующих стержневых конструкций для получения достоверной оценки их долговечности необходимо, наряду с расчетной схемой самой системы, использовать также расчетную схему ПНП для моделирования процесса коррозии в местах соединений. Использование только расчетной схемы приводит к существенному завышению ее долговечности.

3. Одним из путей повышения эффективности расчета стержневых конструкций является возможность установить зависимость между временем эксплуатации, параметрами нагружения и агрессивной среды и текущим состоянием какого-либо элемента конструкции. Перспективность этого направления заключается в расширении возможностей прогнозирования долговечности конструкции применительно к условиям ее эксплуатации.

#### **Список литературы.**

1. Беляев Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Беляев Б.И., Корниенко В.С. – М.: Стройиздат, 1968. – 209с.
2. Долинский В.М. Расчёт элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии / Долинский В.М. // Исследования по теории оболочек. – 1976. – № 7. – С. 37–42.
3. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах / Зеленцов Д.Г. Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.
4. Зеленцов Д.Г., Радуль О.А. Модифицированный треугольный конечный элемент переменной толщины в задачах моделирования коррозионных процессов в плосконапряженных пластинах / Д.Г. Зеленцов, А.А. Радуль // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. - №4. – С. 139 – 143.
5. Наумова Г.А. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений / Наумова Г.А. Овчинников И.Г. – Саратов: СГТУ, 2000. – 227 с.
6. Овчинников И.Г. Моделирование кинетики коррозии металлоконструкций с использованием банка математических моделей коррозии / И.Г. Овчинников, Н.Б. Кудайбергенов, М.С. Дворкин // Проблемы повышения надежности и долговечности конструкций зданий и сооружений: сб. трудов. – Шымкент: КазХТИ. – 1993. – С. 9–25.