

УДК 624:620.193

А.П. ИВАНОВА, канд. техн. наук, доц., Л.В. ФЕСЬКОВА, аспирант,
О.И. ТРУФАНОВА, аспирант, ГВУЗ «Национальный горный университет»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОРРОДИРУЮЩИХ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Балочные и стержневые элементы широко применяются в различных металлоконструкциях, которые эксплуатируются в агрессивной среде. Основной характеристикой коррозионного процесса является скорость его протекания, на которую большое влияние оказывает напряженное состояние конструкции или ее элементов. Применительно к таким конструкциям, понятие «дефектность материала» напрямую связано с коррозионным износом. Существующие подходы к решению задач прогнозирования долговечности корродирующих элементов металлоконструкций, испытывающих деформацию изгиба, имеют ряд недостатков. Использование упрощенных моделей корродирующей поверхности приводит к увеличению размерности задачи метода конечных элементов (МКЭ) и размерности системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих коррозионный процесс, также существует проблема точности решения, так как отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору параметров численных процедур. При прогнозировании безаварийной работы корродирующих конструкций задача долговечности решается на каждой итерации поиска оптимального решения. В данной работе проведено моделирование поведения элементов балочных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных условиях. Уделено внимание влиянию вида деформации на коррозионный износ элементов. Предложены пути повышения эффективности решения задач напряженно-деформированного состояния и долговечности корродирующих балочных элементов металлоконструкций. Рациональные параметры численных процедур определены с применением нейронных сетей, что позволяет получить решение с погрешностью, не превышающей предельно допустимую величину с минимальными вычислительными затратами.

Ключевые слова: коррозионный износ, напряжение, модель, прочность, балочный конечный элемент, параметр поврежденности, нейронная сеть.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Коррозия является одним из наиболее весомых факторов, вызывающих разрушение металлических конструкций. Воздействие агрессивной среды приводит к возникновению наведенной (изменяющейся во времени) неоднородности геометрических и, в некоторых случаях, механических свойств по области конструкции [1].

Основной характеристикой коррозионного процесса является скорость его протекания, на которую большое влияние оказывает напряженное состояние конструкции или ее элементов. Обработка результатов обследования технического состояния металлических конструкций зданий и сооружений шахт ПАО «Криворожский железорудный комбинат»; металлических конструкций литейного и плавильного цехов ПАО «Никопольский завод водотрубной арматуры» показала, что существует зависимость между видом деформации, испытываемой элементом конструкции и его коррозионным повреждением. Максимальное количество поврежденных оказалось среди элементов, испытывающих деформацию изгиба - 41%, растяжения -35% и сжатия - 24% [2]. Все сказанное определяет актуальность проблемы моделирования коррозионных процессов с целью разработки эффективных численных алгоритмов решения задач напряженно-деформированного состояния и долговечности балочно-стержневых металлических конструкций.

Анализ исследований и публикаций. Балочные и стержневые элементы широко применяются в различных металлоконструкциях. Применительно к таким конструкциям, понятие «дефектность материала» напрямую связано с коррозионным износом [3]. Коррозионные повреждения влекут за собой потерю несущей способности части конструкции, а если элемент является основным и несущим, то может разрушиться весь объект [4].

Существующие подходы к решению задач прогнозирования долговечности [5] корродирующих элементов металлоконструкций, испытывающих деформацию изгиба, имеют ряд недостатков [6]. Использование упрощенных моделей корродирующей поверхности, приводит к увеличению размерности задачи метода конечных элементов (МКЭ) и размерности системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих коррозионный процесс, также существует

проблема точности решения, так как отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору параметров численных процедур.

Постановка задачи. Перечисленные выше проблемы становятся более актуальными при прогнозировании безаварийной работы корродирующих конструкций, когда задача долговечности решается на каждой итерации поиска оптимального решения. В этом случае вычислительные затраты могут оказаться неоправданно высокими, а точность решения не обеспечена. Повысить эффективность решения таких задач предлагается следующими способами:

построение матрицы жесткости для модифицированного конечного элемента (КЭ) на основе усовершенствованной модели корродирующей поверхности;

снижение размерности СДУ, описывающей изменение геометрических характеристик конструкции во времени;

определение таких параметров численных процедур, при которых решение получается с погрешностью, не превышающей заданную величину.

Результаты исследований. Существующие модели коррозионного износа можно классифицировать следующим образом (рис. 1)



Рис. 1. Модели коррозионного износа

В качестве модели коррозионного износа балки принимаем модель Долинского [7]

$$d\delta/dt = v_0(k\sigma),$$

где δ - глубина коррозии, v_0 - скорость коррозии при отсутствии напряжений (химическая составляющая коррозионного процесса), σ - абсолютное значение эквивалентного напряжения, k - коэффициент, учитывающий влияние напряжения на скорость коррозии.

На размерность СДУ большое влияние оказывает неравномерность поля напряжений по области конструкции. В известных алгоритмах расчета балочных конструкций, использующих МКЭ, напряжения считаются постоянными по длине КЭ и вычисляются в его центре тяжести. Следовательно для точного моделирования процесса коррозии необходимо увеличивать количество КЭ, что приводит к увеличению размерности задачи.

Рассмотрим элемент изгибаемой балки двутаврового поперечного сечения (рис. 2). Первоначальные размеры двутавра B_0, T_0, D_0, H_0 .

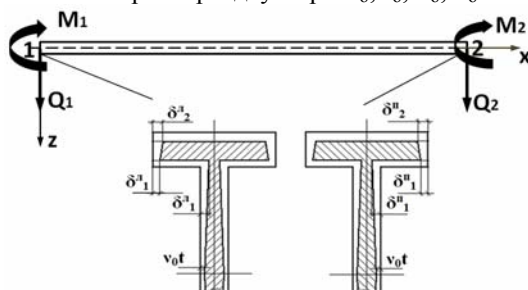


Рис. 2. а - конечный элемент изгибаемой балки двутаврового сечения с 4-мя степенями свободы M_1, M_2 - изгибающие моменты в узлах 1 и 2, соответственно; Q_1, Q_2 - поперечная сила в узлах 1 и 2; δ_1 и δ_2 - значения глубин коррозии в узлах 1 и 2, индекс «л» соответствует узлу 1, а индекс «n» - узлу 2, $v_0 t$ - коррозия в течение времени

Примем следующее допущение: изменение изгибающего момента по длине элемента - линейное. Закон изменения глубины коррозии

запишем в виде

$$\delta_1(x) = \delta_1^l + \frac{x}{l}(\delta_1^n - \delta_1^l), \quad \delta_2(x) = \delta_2^n + \frac{x}{l}(\delta_2^l - \delta_2^n), \quad (1)$$

где δ_1 и δ_2 - значения глубин коррозии в узлах 1 и 2, индекс «л» соответствует узлу 1, а индекс «n» - узлу 2.

Выражения для изменяющихся, вследствие коррозии в течение некоторого времени ($v_0 t$),

размеров двутаврового сечения B, T, D, H запишем следующим образом

$$\delta_o = \nu_o t; d_1(t) = \frac{\delta_1^n(t) - \delta_1^i(t)}{2l}; d_2(t) = \frac{\delta_2^n(t) - \delta_2^i(t)}{2l}; H(t) = H_o - 2\delta_2^n;$$

$$B(t) = B_o - \frac{\delta_o - 3\delta_2^n}{2}; D(t) = D_o - \frac{\delta_o - 3\delta_1^i}{2}; G(t) = H_o - 2T_o + 2\delta_1^i.$$

С учетом этих выражений получим момент инерции двутаврового сечения, как функции координаты и времени

$$I(x, t) = \frac{1}{12}(B - 3d_2x) \cdot [(H - 4d_2x)^3 - (G + 4d_1x)^3] + \frac{1}{12}(D - 3d_1x) \cdot (G + 4d_1x)^3. \quad (2)$$

Представим выражение (2) в виде полинома четвертой степени

$$I(x, t) = I_o + Ax + Bx^2 + Cx^3 + Dx^4, \quad (3)$$

где $I_o = \frac{1}{12}[B(t) \cdot (H(t)^3 - G(t)^3) + G(t)^3 D(t)]$;

$$A = -B(t) \cdot (H(t)^2 \cdot d_2 + G(t)^2 \cdot d_1) - \frac{1}{4}d_2 \cdot (H(t)^3 - G(t)^3) + G(t)^2 \cdot d_1 \cdot D(t) - \frac{1}{4}d_1 \cdot G(t)^3;$$

$$B = 4B(t) \cdot (H(t) \cdot d_2^2 + G(t) \cdot d_1^2) + 3d_2 \cdot (H(t)^2 \cdot d_2 + G(t)^2 \cdot d_1) + 4G(t) \cdot d_1^2 \cdot D(t) - 3d_1^2 \cdot G(t)^2;$$

$$C = -\frac{16}{3}B(t) \cdot (d_2^3 + d_1^3) - 12d_2 \cdot (H(t) \cdot d_2^2 - G(t) \cdot d_1^2) + \frac{16}{3}d_1^3 \cdot D(t) - 12d_1^3 \cdot G(t); D = 16 \cdot [d_2(d_2^3 + d_1^3) - d_1^4].$$

Дальнейшая процедура построения элементов матрицы жесткости аналогична описанной в [8].

Следует отметить, что выражения для элементов матрицы жесткости балочного КЭ переменной жесткости не зависят от вида поперечного сечения, если его можно представить в виде совокупности прямоугольных фрагментов (рис. 3).

Поведение корродирующих конструкций может быть исследовано путем численного решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (4), описывающих процесс коррозии в их элементах

$$(dA/dt) = \psi[\sigma(A)]; A_{t=0} = A_o, \quad (4)$$

где A - элемент матрицы $[A]_{n \times n}$ изменяющихся параметров КЭ; ψ - некоторая функция напряжений, N - размерность задачи МКЭ, n - количество параметров, определяющих геометрические размеры элемента.

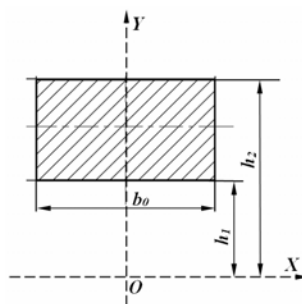


Рис. 3. Прямоугольный фрагмент сечения

Численное решение задачи Коши

$$A_{ij}^s = A_{ij}^{s-1} + \Delta t^s \left[(1 - \omega) \cdot \Psi_{ij} + \omega \cdot \left(\Psi_{ij} + \frac{\Delta t^s}{2\omega} \Psi_{ij} \right) \right]; i = \overline{1, N}; j = \overline{1, n}$$

Решение задачи можно представить в виде схемы (рис. 4).

В данной схеме:

блок (А) является модулем решения задачи напряженно - деформированного состояния (НДС), в результате чего формируется

вектор напряжений в элементах конструкции;

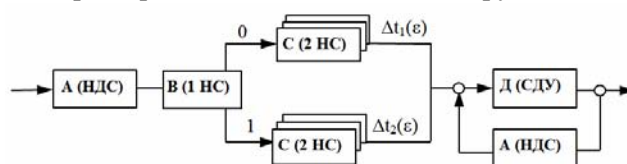


Рис. 4. Схема решения задачи

блок (В) определяет, с использованием нейронной сети 1, какие именно ограничения (о них будет сказано ниже) вступают в силу;

блоки (С) определяют, с использованием нейронной сети 2, параметры численного решения СДУ (4) для каждого из ограничений.

На основании информации о геометрических характеристиках сечения элемента, начальных напряжений в нем, скорости коррозии и заданной точности, определяется значение шага интегрирования, которое обеспечивает заданную точность.

блоки (Д) и (А) выполняют решение задачи Коши для СДУ (4).

Для балочных конструкций необходимо учесть следующие особенности:

коэффициент слитности сечения (отношение периметра к площади) значительно выше, чем у стержней кольцевого сечения с той же площадью, что приводит к увеличению скорости роста напряжений [9];

сечения прокатных профилей предполагают возможность разрушения элемента вследствие нарушения его сплошности [10].

До настоящего времени вид активных ограничений определялся в процессе решения задачи (рис. 4), поэтому параметры численного решения СДУ выбирались независимо от вида активного ограничения.

Это приводило к избыточным итерациям и не всегда обеспечивало требуемую точность решения.

Для повышения эффективности вычислительного алгоритма и упрощения его логики целесообразно определить вид активного ограничения до решения задачи расчёта долговечности.

Для этого предлагается использовать две нейронные сети: для определения вида ограничения (рис. 5а) и параметров численного решения СДУ для каждого из ограничений (рис. 5б).

Входные параметры сетей следующие: N - номер прокатного профиля, v_0 - скорость корро-

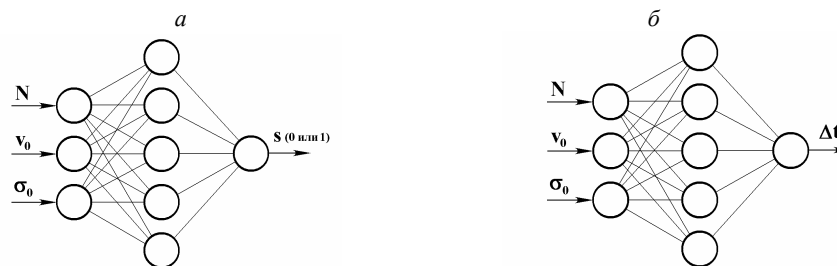


Рис. 5. Архитектура нейронных сетей для определения: а - вида ограничений; б - параметров численного решения СДУ для каждого из ограничений

зии, σ_0 - начальное напряжение.

На основании анализа факторов, влияющих как на вид активного ограничения, так и на точность решения СДУ, входными параметрами сетей приняты: номер прокатного профиля N , скорость коррозии v_0 и начальное напряжение σ_0 .

Вид ограничения («0» - по сплошности и «1» - по прочности) определяется нейронной сетью с пороговой функцией активации выходного элемента, рациональное значение параметра численного решения Δt - сетью с сигмоидальной функцией.

Обучение нейронных сетей осуществлялось с помощью генетического алгоритма и алгоритма обратного распространения ошибки.

В качестве модельной предлагается решение задачи НДС и долговечности статически неопределимой стальной двутавровой балки (рис. 6), нагруженной сосредоточенной силой Q и изгибающим моментом M , которая находится в агрессивной среде.

Расчетные данные: $M=50000$ Н×см; $Q=5000$ Н; $E=2,1 \times 10^5$ МПа – модуль упругости стали; $[\sigma] = 240$ МПа; параметры коррозионного износа: $v_0=0,1$ см/год; $k=0,003$ МПа⁻¹

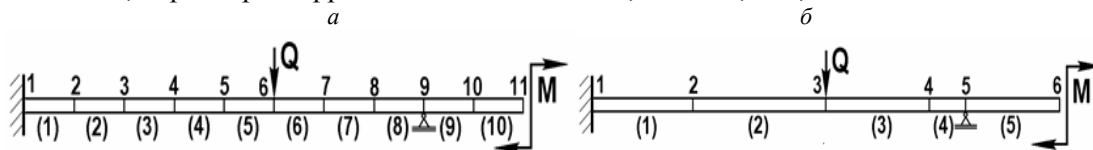


Рис. 6. Конечно-элементная модель статически неопределимой двутавровой балки:
а - десятиэлементная балка; б - пятиэлементная балка

Если изменение изгибающего момента по длине носит линейный характер, то достаточно одного КЭ переменной жесткости.

Для решения задачи НДС и долговечности статически неопределимой двутавровой балки модифицированные КЭ с переменной жесткостью, в отличие от известных, позволяют учесть изменение геометрических характеристик по длине элемента, а также снизить размерность задачи МКЭ (см. рис. 6).

Результаты решения задачи представлены в табл. 1.

Результаты решения задачи

Номер двутаврового профиля	Тип активного ограничения	Начальные напряжения σ_0 , МПа	Шаг интегрирования Δt , лет	Долговечность t^* , лет	Количество итераций n
10	1	85,50	0,129	1,455	12
10	1	97,10	0,138	1,306	10
12	1	89,93	0,141	1,435	11
12	0	78,07	0,999	1,233	2
14	1	87,49	0,148	1,508	11

Выводы. Приведенный в статье алгоритм решения задачи прогнозирования долговечности с использованием нейросетевой модели определения вида активного ограничения и шага интегрирования, в отличие от других алгоритмов, позволяет получить решение задачи НДС и долговечности, не только с заранее заданной точностью расчета, но и существенно повысить его эффективность.

Список литературы

1. **Зеленцов Д.Г.** Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. - Днепропетровск: УГХТУ, 2002. - 168 с.
2. **Иванова А. П.** К вопросу прогнозирования долговечности многоэлементных стержневых металлических конструкций /Иванова А. П. // Уголь Украины. Научно-технический, производственный и экономический журнал. Вып. 1 - 2 (697 - 698). - Киев, 2015. - С. 50 - 53.
3. **Расторгуев Б.С.** Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2003, №4. - С. 45^18.
4. **Райзер В.Д.** Теория надежности в строительном проектировании / Райзер В.Д. - М.: АСВ, 1998, - 304 с.
5. **В.В. Хворост.** Дослідження міцності і надійності конструктивних елементів об'єктів, розташованих на поверхні гірничопромислових підприємств / Вісник Криворізького технічного університету. - Кривий Ріг: КНУ. - Вип. 37, 2014. - С. 31-35.
6. **Александров А. В.** Роль отдельных элементов стержневой системы при потере устойчивости // Вестн. МИИТ. -2001.-№5.-С.46-50.
7. **Овчинников И Г.** Банк математических моделей коррозионного износа, применяемых для прогнозирования поведения металлоконструкций / **Овчинников И. Г., Дворкин М. С, Сабитов Х. А** // Проблемы прочности материалов и конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами: Межвуз. научн. сб. -Саратов: СПУ, 1993. -С. 141 -150.
8. **Зеленцов Д.Г.** Балочный конечный элемент переменной жесткости для расчета конструкций, подверженных коррозионному износу / **Зеленцов Д.Г.** // Системні технологи. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 6 (17). - Дніпропетровськ, 2001. - С. 64 - 70.
9. **Наумова Г.А.** Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений / **Наумова Г.А.** // Саратов: СГТУ, 2000. – 227 с.
10. **Иванова А.П.** Живучесть и разрушение многоэлементных конструкций / **Иванова А.П.** // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції «Техногенні катастрофи, моделі, прогноз, запобігання»- НГУ, Дніпропетровськ, 2013-С 64- 73.

Рукопись поступила в редакцию 17.04.15

УДК 622.7.09: 620.113

С. Н. ДАЦУН аспирант, ГВУЗ «Национальный горный университет»

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОБЫ ПРИ ПОКУСКОВОМ ОПРОБОВАНИИ

В статье представлен новый метод нахождения минимальной массы пробы, таким образом, вопрос минимизации пробы влечет за собой минимизацию расходов на опробование и контроль технологических показателей обогащательных процессов. В данной работе осуществлена попытка учесть показатели раскрытия ценного компонента и текстурно-структурных признаков руды для определения минимальной массы пробы руды. Как следует из анализа работ по опробованию массивов полезных ископаемых, одним из важнейших показателей опробования является количество кусков массива, которые необходимо отобрать в пробу. Это количество, в первую очередь, зависит от соотношений точности, которую требуется обеспечить и точности отбора, или неоднородности распределения компонентов. Найдены зависимости минимально и максимально возможного содержания ценного минерала в частицах определенного размера и определенной формы. Форма учета этой зависимости представлена в виде отношения погрешности измерения к заданной погрешности. В формулу это отношение вошло как произведение. Особое внимание уделяется точному определению минимального объема минерала. Таким образом, на основании расчетов по