УДК 629.46.015

С.А. КОСТРИЦА (ДНУЖТ)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПУТЁМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Железнодорожный транспорт является одной из важнейших отраслей экономики большинства развитых стран мира и его успешная деятельность во многом зависит от состояния используемого тягового подвижного состава. Его текущие и внеплановые ремонты приводят к значительным дополнительным материальным затратам, а дефекты его несущих конструкций, кроме того, существенно влияют на безопасность движения, т.к. могут привести к возникновению аварийных ситуаций.

Современный этап развития железнодорожного транспорта характеризуется значительным увеличением скоростей движения, как во внутригосударственном, так и международном сообщениях. Что в свою очередь требует модернизации существующих и создания новых современных конструкций подвижного состава железных дорог с улучшенными технико-экономическими характеристиками, а также повышенными характеристиками надежности и безопасности в эксплуатации.

Решение задачи по повышению безопасности и эксплуатационной надежности, как существующих конструкций подвижного состава железных дорог, так и вновь проектируемых, требует привлечения современных методов проектирования и оценки прочности несущих элементов инженерных конструкций, которые за последнее время получили значительное развитие.

В настоящее время выбор рациональных параметров конструкций подвижного состава железных дорог осуществляется, в основном, путем вариантного проектирования. В процессе проектирования размеры несущих элементов назначаются конструктором на основе опыта проектирования аналогичных конструкций. Затем производятся корректировки размеров элементов по результатам расчетов на прочность и испытаний опытных образцов таким образом, чтобы действительные напряжения в основных несущих элементах были близки к допускаемым.

Такой способ выбора рациональных параметров, в значительной степени основанный на личном опыте и интуиции проектировщика, позволяет рассмотреть ограниченное число вариантов, и при этом может оказаться, что конструкции с оптимальными параметрами находятся в числе нерассмотренных.

Задача определения оптимальных параметров конструкций подвижного состава может быть решена путем применения оптимального проектирования, базирующегося на методах математического программирования.

В настоящее время существует большое количество методов оптимального проектирования, которые условно можно разделить на две основные группы – методы безусловной и условной оптимизации.

Как одни, так и другие методы нашли широкое применение при оптимизации инженерных конструкций в различных отраслях машиностроения.

Рассматриваемый в данной статье метод проекций градиента (МПГ) /1,2/, относящийся методам условной оптимизации, в сочетании с моделированием конструкции при помощи метода конечных элементов обладает достаточной универсальностью, т.к. позволяют непосредственно учесть ограничения, накладываемые на параметры конструкции и требования к режиму ее работы. Однако при решении задач оптимизации сложных механических систем такое сочетание методов (МПГ и МКЭ) может привести к определенным трудностям, которые связаны, прежде всего, с отсутствием аналитической зависимости напряжений в несущих элементах при действии определенной нагрузки от параметров конструкции. Поэтому, в работе предлагается некоторая модернизация метода проекции градиента, позволяющая использовать МКЭ в процессе оптимизации.

В большинстве задач оптимизации конструкций поведение механической системы описывается совокупностью переменных, называемых переменными состояния. Конструктор не может непосредственно управлять переменными состояния – перемещениями и напряжениями, но может воздействовать на эти величины, меняя значения переменных проектирования.

Введем обозначения:

Z -вектор размерности n переменных состояния;

X - вектор размерности m переменных проектирования.

Тогда функция цели, представляющая собой объем оптимизируемых элементов, будет иметь вид:

$$F(X) = f(x_1, x_2, \ldots . x_m), \qquad (1)$$

где $x_1, x_2, ...x_m$ – компоненты вектора *X*, являющиеся размерами оптимизируемых элементов.

Так как для моделирования поведения конструкции будем использовать метод конечных элементов, то уравнение состояния можно записать как:

$$K(X) \cdot Z = Q, \tag{2}$$

где *K(X)* - глобальная матрица жесткости ансамбля конечных элементов конструкции; *Q* – вектор приведенных нагрузок в узлах конечноэлементной модели.

Ограничения могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} &\psi_i(X,Z) = \frac{[s_i]}{s_i(X,Z)} - 1 \geq 0, && i = 1, l_1, \\ &\beta_i(X) = 0, && i = 1, l_2, \\ &a_i < x_i < b_i, && i = 1, l_3, \end{aligned} \tag{3}$$

где $[s_i]$, $s_i(X, Z)$ – нормативные и текущие значения параметров состояния в *i*-м элементе конструкции (напряжения, прогибы);

$\beta_i(X)$ - функции, задающие связь между параметрами оптимизации (например, высота конструктивного элемента должна находиться в определённом соотношении с его шириной);

a_i, b_i- ограничения на значения параметров проектирования;

l_1, l_2, l_3 – соответственно количество ограничений на параметры состояния, количество функций, связывающих оптимизируемые параметры вектора *X* и количество ограничений на значения параметров проектирования.

Применим метод проекции градиента для оптимизации параметров конструкции с уравнением состояния (2) при ограничениях (3). Под оптимальными параметрами будем понимать те значения компонентов вектора *X*, при которых функция (1) достигает минимума.

При использовании метода проекции градиента, основываясь на локальном поведении функции цели и функций, задающих ограничения, на каждом шаге оптимизации определяется направление поиска. Приращение вектора X на i-м шаге в найденном направлении дает новое приближение к оптимальной конструкции:

$$X_i = X_{i-1} + \delta X_i.$$

При этом основной отличительной чертой рассматриваемого метода является то, что на каждом шаге итераций функция цели $F(X)$ уменьшается, а ограничения не нарушаются.

Вектор δX – приращений параметров проектирования определяется из соотношения:

$$\delta X = -t\delta X_1 + \delta X_2,$$

где δX_2 – вектор, задающий необходимую коррекцию невязок в ограничениях; δX_1 – вектор, представляющий собой направление спуска для целевой функции; t – параметр шага.

Вывод выражений для определения δX_1 и δX_2 приведен в работе /1/, поэтому заметим лишь, что в эти выражения входят: вектор ξ - градиент функции цели и матрица η столбцами которой являются градиенты функций, задающих ограничения.

Исходя из определений вектора ξ и матрицы η, можем записать следующие аналитические выражения:

$$\xi = \frac{\partial F(X)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(X)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial F(X)}{\partial x_2} \\ \dots \\ \frac{\partial F(X)}{\partial x_m} \end{bmatrix}; \eta = \frac{\partial \psi(X, Z)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial \psi_{l_i}}{\partial x_1} \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \psi_{l_i}}{\partial x_2} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \psi_1}{\partial x_m} & \dots & \frac{\partial \psi_{l_i}}{\partial x_m} \end{bmatrix}.$$

Вычисление матрицы η является наиболее трудоемкой операцией в алгоритме метода проекции градиента, так как при решении практических задач оптимизации конструкции получить аналитические выражения $\psi(X, Z)$, а следовательно и для $\dfrac{\partial \psi (X, Z)}{\partial X}$, как правило, не удается. Поэтому предлагается численное определение коэффициентов матрицы η с использованием известного соотношения для вычисления частных производных от функции многих переменных:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial x_j} = \frac{\psi_i (x_1, x_2, ..., x_j + \Delta x_j, ..., x_m) - \psi_i (x_1, x_2, ..., x_j, ..., x_m)}{\Delta x_j}$$

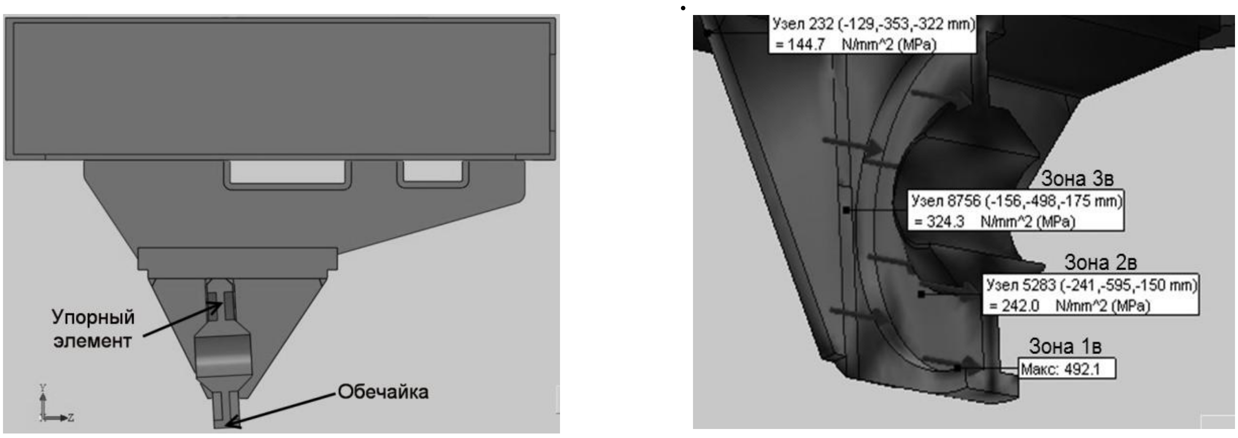
Таким образом, если, например, параметрами состояния являются напряжения в элементах исследуемой конструкции, то на каждом шаге процесса оптимизации для вычисления компонентов матрицы η сначала определяются напряжения σ_i^0 при исходных значениях параметров оптимизации. Затем дается приращение j-му параметру, и вновь производится расчет конструкции и определяются напряжения σ_i^1 при измененном значении j-го параметра. Соответствующий компонент матрицы η определяется из соотношения:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial x_j} = \frac{\sigma_i^1 - \sigma_i^0}{\Delta x_j} \lambda,$$

где λ - нормирующий множитель.

Основным недостатком изложенного способа вычисления градиентов функций, задающих ограничения по прочности является необходимость многократного расчета конструкции по МКЭ. Однако при определенном виде нагружения прочность конструкции в целом обусловлена прочностью нескольких, наиболее нагруженных элементов. Поэтому при проведении практических оптимизационных расчетов число функций, задающих ограничения по прочности, а следовательно и размерность матрицы η будут небольшими.

Предлагаемая методика в части определения градиентов функций задающих ограничения по прочности была применена, например, при модернизации узла крепления наклонной тяги электровоза 2ЕЛ5 производства ОАО «ХЛ « Луганскteпловоз », вызванной его недостаточной прочностью при ударных нагрузках. Конструктивная схема и конечно-элементная модель указанного узла приведена на рис. 1



а) б)

Рис. 1. Вид сбоку (а) и конечно-элементная модель (б) узла крепления наклонной тяги

На рис. 1,б также приведены значения эквивалентных напряжений (МПа) по IV-й теории прочности в наиболее нагруженных точках исследуемого элемента при действии нагрузок, соответствующих первому расчётному режиму /3/. Из приведенных результатов видно, что при данном виде нагружения максимальные напряжения имеют место в обечайке упорного элемента и составляют 492 МПа, что превышает предел текучести 345 МПа для стали 09Г2С из которой она изготовлена.

С целью оценки влияния размеров конструктивных элементов узла крепления наклонной тяги на его напряженное состояние, по приведенной выше методике, был получен градиент функции максимальных напряжений. При этом в качестве варьируемых параметров принимались: толщина упорного элемента (x_1), толщина (x_2) и ширина (x_3) обечайки.

В результате проведенных расчётов оказалось, что компоненты градиента функции максимальных напряжений составляют:

$$\frac{\partial \sigma_{max}}{\partial X} = \{0,38;0,59;0,72\}$$

На основании полученных данных было принято решение о необходимости увеличения ширины обечайки. Сравнительные результаты расчётов исходной и модернизированной конструкций узла наклонной тяги при действии нагрузок соответствующих I-му и II-му расчётным режимам приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные результаты расчётов узла наклонной тяги

Режим нагружения	Конструкция кронштейна	Сила в наклон. тяге, кН	Напряжения в МПа		
			Зона 1	Зона 2	Зона 3
I-й расчетный режим	Исходная	-626	**492**	242	324
	Модернизированная	-626	**248**	107	100
II -й расчетный режим	Исходная	-106	81,7	52	54
	Модернизированная	-106	41	17,7	16,6

Анализ данных приведенных в таблице позволяет сделать вывод о том, что прочность модернизированного узла крепления наклонной тяги электровоза 2ЕЛ5 обеспечена.

Библиографический список

1. Хог Е. Прикладное оптимальное проектирование [Текст] / Е. Хог, Я. Арора. – М.: Мир, 1983. – 480 с.
2. Реклейтіс Г. Оптимизация в технике [Текст] / Г. Реклейтіс, А. Рейвіндран, К. Регсдел. – М.: Мир, 1986. – 320 с.
3. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520мм, - М., ВНИИЖТ, 1998 г.