

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

УДК 629.4.02/46

Д.Г. Бейн, М.А. Булычев

СОКРАЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТОРЦЕВЫХ СТЕН ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Предложен сокращенный алгоритм структурно-параметрической оптимизации торцевых стен грузовых вагонов. Приведен пример оптимизации торцевой стены полувагона модели 12-119 по предложенному алгоритму. Показана эффективность предлагаемого алгоритма по сравнению с результатами отдельно проводимой параметрической оптимизации.

Ключевые слова: грузовой вагон, структурная оптимизация, параметрическая оптимизация, метод конечных элементов, расчет на прочность.

Известно, что сочетание параметрической и структурной оптимизации приводит к лучшему результату. Применительно к вертикальным торцевым стенам кузовов грузовых вагонов цель структурной оптимизации заключается в определении количества подкрепляющих стержневых элементов (вертикальных стоек, горизонтальных поясов), а также координат их размещения в конструкции. Кроме этого, при структурной оптимизации находится оптимальный тип профиля упомянутых несущих элементов.

Следовательно, для решения задачи структурной оптимизации торцевой стены необходимо найти экстремум функционала

$$F(n_i; x_i; f_i), \quad (1)$$

где n_i – число однотипных несущих элементов; x_i – координаты их размещения в пространстве; f_i – функции, определяющие характер поперечных сечений несущих элементов.

В качестве функционала F может быть принят суммарный объем металла несущих элементов или себестоимость. В этом случае экстремумом функционала F , который необходимо определить, является минимум.

На n_i, x_i, f_i должны быть наложены ограничения, обеспечивающие работоспособность вагона. Это, прежде всего, конструктивные ограничения на габаритные размеры несущих элементов, влияющие на их взаимную увязку и на концентраторы напряжений. Должно быть также наложено ограничение по прочности несущих элементов. Однако ограничение по прочности, если одновременно проводится структурная и параметрическая оптимизация, может быть учтено при параметрической оптимизации.

Одновременное выполнение структурной и параметрической оптимизации затруднительно. Под термином «одновременное» здесь понимается выполнение и параметрической, и структурной оптимизации на каждой итерации многоитерационного процесса оптимизации. В связи с отмеченным до настоящего времени структурную оптимизацию выделяют в отдельный самостоятельный этап, а по полученной оптимальной структуре проводится параметрическая оптимизация. Из работ в этой области фундаментальными являются работы В.П. Лозбинева, Ф.Ю. Лозбинева, И.Н. Серпика.

На практике для получения оптимальной структуры используется метод избыточной структуры. Такой вариант структуры подвергается параметрической оптимизации без ограничения на минимальные значения жесткостных характеристик. По идее метода, при параметрической оптимизации отдельные несущие элементы вырождаются, а оставшиеся определяют оптимальную структуру.

Здесь, однако, возникает следующее ограничение. Чтобы отдельные элементы выродились, к ним не должна быть приложена нагрузка. В противном случае под действием

приложенной нагрузки в элементе возникнут напряжения, и при параметрической оптимизации жесткостные характеристики сечения не смогут стать близкими к нулю из-за ограничения по прочности. Следовательно, вырождения элемента не произойдет.

Применительно к торцевым стенам грузовых вагонов важно знать, какая эксплуатационная нагрузка вызывает наибольшие напряжения в несущих элементах. В работе [1] показано, что применительно к полувагонам такой нагрузкой является продольная сила, возникающая при одностороннем ударе в автосцепку. Указанная сила воздействует на всю поверхность торцевой стены, поэтому метод избыточной структуры для оптимизации торцевых стен полувагонов, думкаров и крытых вагонов неприменим.

Отсюда возникает следующее затруднение: необходимо определить, какой тип подкрепления обшивки (подкрепление только вертикальными стойками (рис. 1 а), подкрепление только горизонтальными поясами (рис. 1 б), комбинированное подкрепление (рис. 1 в)) позволит получить наименьшую металлоемкость (с учетом результатов параметрической оптимизации).

При этом также следует учесть, что при увеличении количества подкрепляющих элементов и совместной параметрической оптимизации возможно снижение массы.

Следовательно, требуется иной способ определения оптимальной структуры торцевой стены.

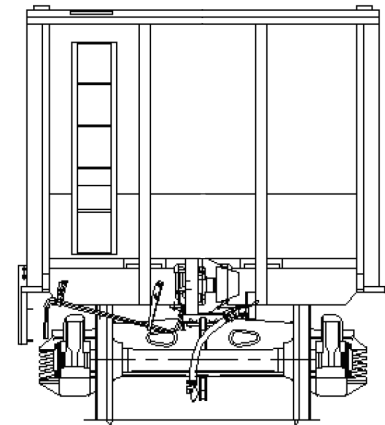
Сокращенный алгоритм структурно-параметрической оптимизации торцевой стены. В связи с большой трудоемкостью прочностных расчетов всех вариантов структуры на практике может быть полезен сокращенный алгоритм оптимизации.

Данное название отражает суть алгоритма: за основу конструкции принимается ближайший по габаритным размерам вагон-аналог, и направление поиска оптимальной структуры определяется исходными данными.

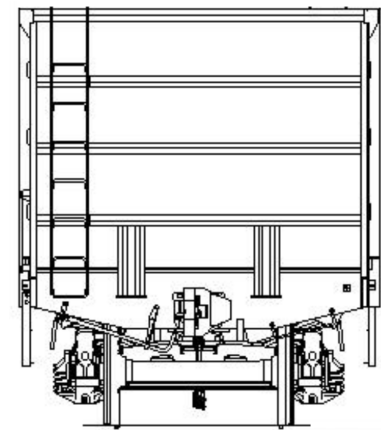
Для новой конструкции первоначально принимаются структура и параметры стены вагона-аналога. Проводится расчет торцевой стены по методу конечных элементов (МКЭ) на односторонний удар в автосцепку.

Затем подкрепляющие элементы обшивки (пояса, стойки) выделяются в оптимизационные группы.

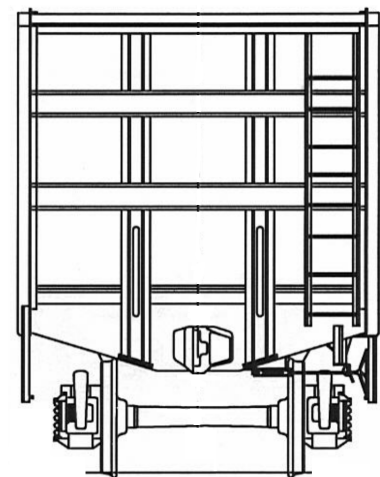
Для каждой оптимизационной группы отдельно определяется среднее расчетное напряжение:



а)



б)



в)

Рис. 1. Варианты структуры торцевых стен полувагонов: а - подкрепление вертикальными стойками; б - подкрепление горизонтальными поясами; в - комбинированное подкрепление

$$\sigma_{cp}(n) = \frac{\sum_{n=1}^k (\sigma_n M_n)}{\sum_{n=1}^k M_n},$$

где $\sigma_{cp}(n)$ – среднее расчетное напряжение; σ_n – максимальное нормальное напряжение в несущем элементе n ; k – количество несущих элементов в группе; M_n – масса несущего элемента n .

Затем определяется среднее допускаемое напряжение подкрепляющих элементов обшивки (стоек или поясов):

$$[\sigma_{cp}(n)] = \frac{\sum_{n=1}^k ([\sigma_n] M_n)}{\sum_{n=1}^k M_n},$$

где $[\sigma_{cp}(n)]$ – приведенное нормальное напряжение; $[\sigma_n]$ – допускаемое напряжение для материала несущего элемента n .

Далее определяем

$$\Delta\sigma = [\sigma_{cp}(n)] - \sigma_{cp}(n).$$

Затем находим коэффициент

$$K = \frac{\Delta\sigma}{[\sigma_{cp}(n)]} 100\%.$$

Определяем лишнюю ($K > 0$) или недостающую ($K < 0$) массу Δm группы несущих элементов:

$$\Delta m = \frac{\sum_{n=1}^k M_n}{100} K.$$

Сравниваем Δm и массу M_n одного несущего элемента (стойки или пояса).

Если

$$|\Delta m| < M_n, \tag{2}$$

количество подкрепляющих элементов не меняется, проводится параметрическая оптимизация.

Если $|\Delta m| \geq M_n$, меняется количество подкрепляющих элементов: для $\Delta m > 0$ назначается

$$n^{i+1} = n^i - \frac{\Delta m}{M_n},$$

где n^i , n^{i+1} – количество подкрепляющих элементов (стоек или поясов) на текущей и последующей итерации; i – номер текущей итерации;

для $\Delta m < 0$ назначается

$$n^{i+1} = \frac{\Delta m}{M_n} + n^i.$$

Количество элементов изменяется до тех пор, пока не начнет выполняться условие (2).

При вводе подкрепляющих элементов в структуру торцевой стены ширина (высота) каждого участка обшивки между элементами стены назначается одинаковой, чтобы обеспечить равномерное подкрепление обшивки.

При изменении количества вертикальных стоек

$$B^{i+1} = \frac{B_{mc} - 2B_{yc} - n^i B_{ec}}{n^i + 1},$$

где B^{i+1} – ширина каждого участка обшивки между вертикальными стойками; B_{mc} – ширина торцевой стены; B_{yc} – ширина сечения угловой стойки; B_{ec} – ширина сечения вертикальной стойки.

При изменении количества горизонтальных поясов

$$H^{i+1} = \frac{H_{mc} - H_{no} - H_{eo} - n^i H_{zn}}{n^i + 1},$$

где H^{i+1} – высота каждого участка обшивки между горизонтальными поясами; H_{no} – высота сечения нижней обвязки; H_{eo} – высота сечения верхней обвязки; H_{zn} – высота сечения горизонтального пояса.

После определения количества несущих элементов проводится параметрическая оптимизация конструкции торцевой стены с полученной структурой.

Так как подкрепляющие элементы торцевой стены воспринимают изгибную нагрузку, в сочетании с указанным методом структурной оптимизации удобно использовать метод пересчета для параметрической оптимизации.

После расчетов на прочность для соответствующей группы несущих элементов определяется коэффициент

$$\varphi_n^i = \frac{\sigma_{n \max}^i}{[\sigma_{n \max}]},$$

где φ_n^i – коэффициент нагруженности несущего элемента; $\sigma_{n \max}^i$ – максимальные нормальные напряжения в группе несущих элементов; $[\sigma_{n \max}]$ – допускаемые напряжения в несущем элементе группы для соответствующего расчетного режима.

Далее определяются новые расчетные моменты сопротивления:

$$W_{Xn}^{i+1} = \varphi_n^i W_{Xn}^i,$$

где W_{Xn}^{i+1} – расчетный момент сопротивления стержневых элементов n -й оптимизационной группы относительно горизонтальной оси для последующей итерации; W_{Xn}^i – момент сопротивления стержневых элементов n -й оптимизационной группы относительно горизонтальной оси на предыдущей итерации.

Для несущих элементов каркаса по найденным расчетным моментам сопротивления подбираются стандартные профили. При этом должны обеспечиваться следующие условия:

$$W_{XnCT}^{i+1} \geq W_{Xn}^{i+1},$$

$$F_{CEЧnCT}^{i+1} \rightarrow \min,$$

где W_{XnCT}^{i+1} – момент сопротивления стандартного профиля n -й оптимизационной группы для последующей итерации; $F_{CEЧnCT}^{i+1}$ – площадь поперечного сечения стандартного профиля n -й оптимизационной группы для последующей итерации.

Параметрическая оптимизация прекращается, когда начинают выполняться условия

$$\sigma_i - [\sigma] \leq 0, \quad \frac{\sigma_i}{[\sigma]} = 0,9 \div 1.$$

Блок-схема сокращенного алгоритма оптимизации представлена на рис. 2.

Сокращенный алгоритм позволяет получить оптимизированный вариант торцевых стен со всеми структурами, представленными на рис. 1.

Прочность обшивки обеспечивается посредством оптимизации формы подкрепляющих элементов. Для корректного определения напряжений в обшивке подкрепляющие элементы торцевой стены можно моделировать по методике, изложенной в работе [2].

Так как в сокращенном алгоритме за основу принимается структура торцевой стены вагона-аналога, интервал поиска локального экстремума функционала (1) меньше, чем при проектировании полностью новой конструкции, что снижает вероятность нахождения глобального экстремума.

Пример применения сокращенного алгоритма оптимизации. Рассмотрим пример оптимизации торцевой стены по сокращенному алгоритму.

В качестве объекта моделирования была принята конструкция торцевой стены полувагона модели 12-119, которая состоит из обшивки толщиной 4 мм, двух угловых стоек из швеллера №12, двух гнутых корытообразных поясов 250x109x9мм, нижней обвязки из уголка 160x100x10мм, двух коротких стоек из швеллера №16 и сварной верхней обвязки, состоящей из гнутого элемента 160x145x90x6мм и листа толщиной 5 мм.

Габаритные размеры стены - 2930x2035 мм. Грузоподъемность вагона - 69 т.

Продольная нагрузка на торцевую стену от силы инерции груза при одно-стороннем ударе в автосцепку определялась по методике [3] (35% от грузоподъемности с учетом ускорения 3,5g). Продольная сила в металлоконструкции стены учитывалась путем ввода ускорения $a=3,5g$. Нагрузка прикладывалась равномерно распределенной по всей поверхности боковой стены.

Расчеты проводились на пластинчато-стержневой модели консольной части кузова (до шкворневого сечения), учитывающей влияние жёсткости боковых стен и хребтовой балки.

В данной работе ограничимся определением оптимального количества и параметров горизонтальных поясов. (Отметим, что одновременно можно определять количество и параметры вертикальных полустоек.) Поиск оптимальных сечений ограничим сортаментом катаных швеллеров. Допускаемые напряжения примем 290 МПа.

В результате расчета напряжения в верхнем поясе составили 698 МПа, в нижнем - 348 МПа.

В соответствии с предложенным алгоритмом определяем среднее расчетное напряжение:

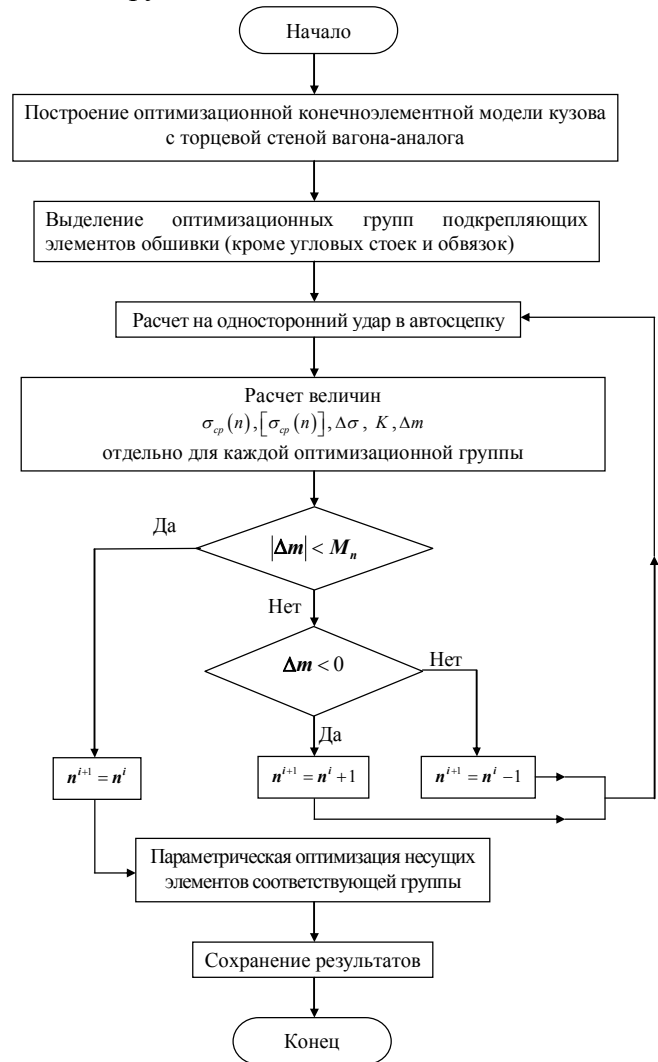


Рис. 2. Блок-схема сокращенного алгоритма структурно-параметрической оптимизации торцевых стен грузовых вагонов

$$\sigma_{cp}(n) = \frac{\sum_{n=1}^k (\sigma_n M_n)}{\sum_{n=1}^k M_n} = \frac{698 \cdot 81,44 + 348 \cdot 81,44}{81,44 + 81,44} = 523 \text{ МПа.}$$

Среднее допускаемое напряжение

$$[\sigma_{cp}(n)] = \frac{\sum_{n=1}^k ([\sigma_n] M_n)}{\sum_{n=1}^k M_n} = \frac{290 \cdot 81,44 + 290 \cdot 81,44}{81,44 + 81,44} = 290 \text{ МПа.}$$

Далее определяем

$$\Delta\sigma = [\sigma_{cp}(n)] - \sigma_{cp}(n) = 290 - 523 = -233 \text{ МПа.}$$

Затем находим

$$K = \frac{\Delta\sigma}{[\sigma_{cp}(n)]} 100 = \frac{-233}{290} 100 = -80,34 \%$$

Так как $K < 0$, масса конструкции недостаточна.

Определяем недостающую массу группы несущих элементов:

$$\Delta m = \frac{\sum_{n=1}^k M_n}{100} K = \frac{81,44 + 81,44}{100} (-80,34) = -130,86 \text{ кг.}$$

Сравниваем Δm и массу M_n одного несущего элемента (пояса):

$$|\Delta m| = 130,86 > M_n = 81,44.$$

Так как $|\Delta m| \geq M_n$, меняется количество подкрепляющих элементов. Для $\Delta m < 0$ означается

$$n^{i+1} = \frac{\Delta m}{M_n} + n^i = \frac{130,86}{81,44} + 2 = 3,6.$$

Округляя, получаем новое количество поясов: $n^{i+1} = 4$ шт.

Перестраиваем конечноэлементную модель и заново проводим расчет на прочность (вторая итерация).

Напряжения в поясах: 481, 442, 326, 113 МПа.

Значения расчетных параметров обеих итераций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения количества поясов торцевой стены

№ итерации	$\sigma_{cp}(n)$, МПа	$[\sigma_{cp}(n)]$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа	K , %	Δm , кг	n^i , шт	n^{i+1} , шт
1	523	290	-233	-80,34	-130,86	2	4
2	340	290	-50	-17,24	-56,16	4	-

Из расчетов видно, что на второй итерации

$$|\Delta m| = 56,16 < M_n = 81,44,$$

поэтому увеличение количества поясов прекращается. Окончательное количество поясов – 4 шт.

Для найденного количества поясов проводим параметрическую оптимизацию методом пересчета.

Результаты параметрической оптимизации приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты параметрической оптимизации

№ итерации	σ , МПа	$[\sigma]$, МПа	$\varphi_n^i = \frac{\sigma_{n\max}^i}{[\sigma_{n\max}]}$	W_{Xn}^i , см ³	W_{Xn}^{i+1} , см ³	W_{XnCT}^{i+1} , см ³	№ швеллера для $i+1$	Масса 1 пояса, кг
1	481	290	1,66	102,6	170,3	192	22П	61,5
2	349	290	1,2	192	230,4	242	24П	70,3
3	302	290	1,04	242	251,7	265	24а	75,6
4	290	290	1,0	265	265	265	-	-

По данным табл. 2 видно, что на итерации №4 получен оптимальный (по заданным условиям поиска) профиль пояса торцевой стены – катанный швеллер №24а.

В результате оптимизации суммарная масса оптимизируемой группы несущих элементов (поясов) увеличилась со 162,9 кг (2 исходных профиля) до 302,4 кг (4 оптимальных профиля). Полученная разница составляет 139,5 кг.

Для исходного варианта конструкции недостающая масса $|\Delta m| = 130,86$ кг.

Масса оптимизированного варианта торцевой стены превышает недостающую массу на 6%, что объясняется ограниченным интервалом поиска для параметрической оптимизации (рассматривались только катаные швеллеры).

Анализ влияния структурной оптимизации на металлоемкость. Для определения влияния структурной оптимизации на металлоемкость торцевой стены были сопоставлены результаты параметрической оптимизации кузова с исходной структурой и торцевой стены с оптимальной структурой (результаты представлены выше) с учетом напряжений в обшивке.

Для торцевой стены с 2 поясами оптимальным сечением (по заданным условиям поиска) является швеллер №30.

Максимальные эквивалентные напряжения в обшивке толщиной 4 мм для оптимизированной торцевой стены с 4 поясами составляют $\sigma_{\text{экр}} = 250$ МПа $< [\sigma] = 290$ МПа.

Максимальные эквивалентные напряжения в обшивке толщиной 4 мм для торцевой стены с 2 поясами составляют $\sigma_{\text{экр}} = 800$ МПа $> [\sigma] = 290$ МПа.

Следовательно, в кузове с исходной структурой минимальная толщина листа должна быть 7 мм для обеспечения прочности: $\sigma_{\text{экр}} = 280$ МПа $< [\sigma] = 290$ МПа.

На рис. 3 представлена диаграмма сопоставления масс оптимизируемых элементов (поясов) с учетом металлоемкости обшивки торцевой стены.

Таким образом, эффективность предлагаемого сокращенного алгоритма обоснована.

Выводы:

1. В работе предложен сокращенный алгоритм структурно-параметрической оптимизации торцевых стен грузовых вагонов. Предложенный алгоритм удобен при проектировании конструкции на основе вагона-аналога.

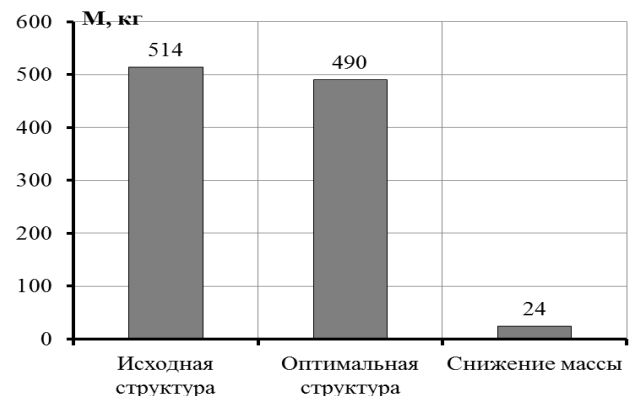


Рис.3. Сопоставление масс горизонтальных поясов и обшивки торцевых стен с исходной и оптимизированной структурой

2. Приведен пример структурной и параметрической оптимизации торцевой стены по сокращенному алгоритму. Получено оптимальное количество горизонтальных поясов для полувагона грузоподъемностью 69 т.

3. Проанализировано влияние структурной оптимизации по сокращенному алгоритму на металлоемкость. Показана эффективность указанного алгоритма по сравнению с результатами отдельно проводимой параметрической оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шавекина, О.Г. Оптимизация торцевых стен грузовых вагонов открытого типа / О.Г. Шавекина// Вестн. Брян.гос.техн.ун-та. – 2013. - №2. – С. 80-84.
2. Бейн, Д.Г. Оптимизация кузовов грузовых вагонов открытого типа с несущим полом:автореф.дис. ...канд.техн.наук / Д.Г. Бейн. – Брянск: БГТУ, 2011. – 20 с.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных).–М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 320 с.

Материал поступил в редколлегию 31.01.14.