

УДК 629.05.539.4

В.П. Лозбинев

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВОВ ВАГОНОВ

Рассмотрены факторы, определяющие работоспособность несущих элементов кузовов вагонов. Предложены новые подходы к оценке напряжённого состояния кузовов вагонов, устойчивости несущих элементов. Показана важность оценки живучести несущих элементов.

Ключевые слова: кузов вагона, несущая конструкция, прочность, устойчивость, живучесть, несущие элементы, работоспособность.

На работоспособность несущих систем кузовов вагонов влияют следующие факторы:

- прочность;
- устойчивость сжатых несущих элементов;
- сопротивление усталости;
- живучесть.

Для оценки прочности в настоящее время повсеместно используется метод конечных элементов (МКЭ). Он имеет не только многие преимущества, но и недостатки. Недостаточно корректно сформированная расчётная схема МКЭ может привести к значительной погрешности расчёта. Поэтому сохраняют актуальность приближённые проектировочные расчёты, в частности расчёт кузова вагона как балки на двух опорах, который базируется на гипотезе плоских сечений.

В кузовах грузовых вагонов прогибы хребтовой балки значительно больше прогибов боковых стен. После изгиба кузова его сечение не остаётся плоским, так как сечение хребтовой балки поворачивается на больший угол, чем сечение остальной части кузова. Чтобы учесть эту особенность при расчёте кузова как балки, можно воспользоваться методом чередования основных систем, разработанным профессором Е.Н. Никольским.

В первой основной системе (рис. 1) по длине кузова вводится множество абсолютно жёстких рамок, соединённых с кузовом связями. Эти рамки обеспечивают при изгибе кузова плоские сечения, что делает возможным расчёт кузова как балки на двух опорах.

Во второй основной системе (рис. 1) связи вводятся по продольным обвязкам рамы. Её необходимо рассчитывать как на заданную нагрузку, так и на смещение связей, найденное расчётом первой основной системы. Профессор Е.Н. Никольский доказал, что чередование расчётов по упомянутым двум основным системам даёт точный результат. Для практической реализации метода чередования основных систем необходима методика расчёта второй основной системы. Предлагается следующая методика. Во второй основной системе хребтовая балка вначале отделяется от кузова. Связи по продольным обвязкам смещаются на величину, полученную расчётом первой основной системы. Чтобы прогибы хребтовой балки стали такими же, как прогибы боковых стен, к отделённой от кузова хребтовой балке прикладывается корректирующая нагрузка. Она меньше нагрузки на весь кузов, так как жёсткость хребтовой балки меньше жёсткости всего кузова. После приложения этой нагрузки напряжённое состояние кузова станет таким же, как в первой основной системе.

Остаётся дополнительно рассчитать вторую основную систему на разность фактической и корректирующей нагрузок. При этом расчётная схема может быть принята в виде, показанном на рис. 2. Дополнительный расчёт по этой схеме уточняет расчёт кузова как балки на двух опорах.

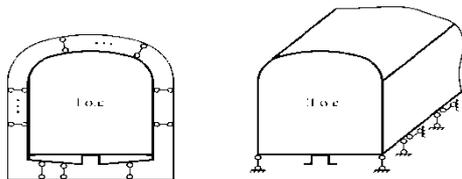


Рис. 1. Основные системы метода чередования основных систем

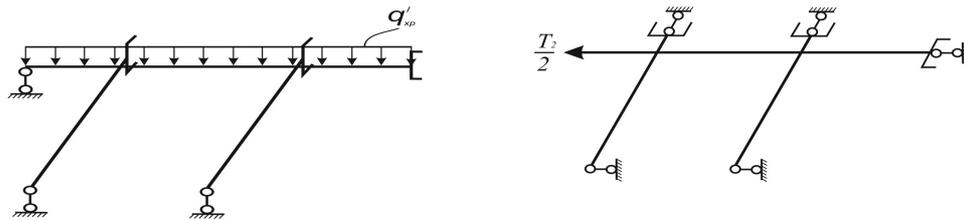


Рис. 2. Расчётные схемы второй основной системы

В таблице приведены результаты расчёта напряжений в нижней точке сечения хребтовой балки кузова четырёхосного полувагона грузоподъёмностью 75 т (постройки Уралвагонзавода) по первому режиму «Норм для расчета на прочность и проектирования механической части новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм» при растягивающих усилиях по осям автосцепки [1]. Из таблицы видно, что результирующие напряжения в нижней точке сечения хребтовой балки посередине кузова с учётом уточнения расчёта по второй основной системе больше, чем напряжения из расчёта кузова как балки, в 1,95 раза. Следовательно, расчёт кузова как балки необходимо уточнять его расчётом по второй основной системе.

Таблица

Результаты расчёта напряжений в нижней точке сечения хребтовой балки кузова

Вид нагрузки	Напряжения σ , мм/м ²		
	По I основной системе	По II основной системе	Результирующие
Вертикальная	12,5	44,0	56,5
Продольная	104	67,0	171,0
По первому режиму «Норм...»	116,5	111,0	227,5

Вторым фактором, влияющим на работоспособность несущей системы кузова, является потеря устойчивости обшивки кузова. Чтобы устранить потерю устойчивости, обшивку, как известно, подкрепляют гофрами.

«Нормы...» допускают потерю устойчивости плоских участков обшивки между гофрами. Эти участки частично выключаются из работы, поэтому при расчете кузова обшивка редуцируется (не учитываются выключенные из работы участки обшивки). С этой целью геометрические характеристики сечения кузова при его расчёте как балки рассчитываются для поперечного сечения, у которого сохранены лишь участки обшивки между гофрами, равные 20 толщинам обшивки (от кромки каждого гофра или обвязки).

Следует отметить, что при расчёте по МКЭ редуцирование обшивки не применяется, что может внести погрешность в расчёт напряжений.

Процесс потери устойчивости обшивки протекает в следующей последовательности. Вначале теряют устойчивость плоские участки обшивки между соседними гофрами. Затем теряет устойчивость наиболее сжатый гофр. Если стойки и дуги кузова достаточно жёсткие, произойдёт выпучивание гофра на участке между соседними дугами или стойками (местная потеря устойчивости). При малой жёсткости стоек или дуг может выпучиваться наиболее сжатый гофр по всей длине кузова (общая потеря устойчивости). Для снижения металлоёмкости местная потеря устойчивости является предпочтительной. Поэтому при проектировании целесообразно обеспечить жёсткость дуг и стоек выше критического значения, определяемого по формуле [2]

$$K_{кр} = \frac{2\pi^2 EI_{гофр}}{a^3} \left(1 + \cos \frac{\pi}{n+1}\right),$$

где $EI_{гофр}$ – изгибная жёсткость гофра с учётом прилегающих к нему плоских участков обшивки шириной 20δ (δ – толщина обшивки); a – расстояние между осями соседних дуг или стоек; n – число дуг или стоек.

Фактическая жёсткость $K_{ф}$ должна быть больше $K_{кр}$.

Для вычисления $K_{ф}$ можно приложить к дуге или стойке в зоне наиболее сжатого гофра единичную силу и от неё найти прогиб Δ .

$$K_{ф} = 1/\Delta.$$

В «Нормах...» для анализа устойчивости несущей системы кузова предусмотрены расчёты панелей обшивки крыши, боковых стен и гофров (по аналогии с расчётами в судостроении).

С учётом изложенного задачу анализа устойчивости можно упростить следующим образом: обеспечить при проектировании жёсткость дуг и стоек выше критической; рассчитать максимальные сжимающие напряжения в наиболее нагруженном гофре; вычислить критические напряжения по формуле

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 KI_{гоф}}{a^2 F_{гоф}}, \quad (1)$$

где $F_{гоф}$ – площадь поперечного сечения гофра с прилегающими плоскими участками обшивки шириной 20δ .

При выполнении условия $\sigma_{сж\max} < \sigma_{кр}$ не будет развиваться процесс потери устойчивости обшивки и будет обеспечена её работоспособность.

Исследования показали, что формула (1) применима и в том случае, когда имеется начальная технологическая изогнутость гофра. Таким образом, нет необходимости вычислять $\sigma_{кр}$ по формулам, приведённым в «Нормах...» для подкреплённых панелей и оболочек.

Частым фактором потери работоспособности несущих элементов кузова является появление и развитие трещин. Так, после деповского ремонта полувагона число заделок стоек боковых стен, получивших повреждения в виде трещин по сварным швам, доходит до 70 % в течение 8 месяцев эксплуатации [4].

Обычно появление трещин объясняют недостаточным сопротивлением усталости. Однако расчёты на сопротивление усталости показывают, что усталостные трещины не должны возникать. Объяснить это противоречие можно наличием в зоне сварных швов начальных трещиноподобных дефектов в виде подрезов швов, инородных включений, непроплавления кромок свариваемых деталей и т.п.

При наличии дефектов сварных швов трещина уже имеется, следовательно, на её рост требуется меньше времени. В этом случае для обеспечения работоспособности несущей системы необходимо при проектировании добиться, чтобы начальные трещины не росли. Обеспечить это можно на базе теории механики разрушения. Трещина не будет расти, если коэффициент интенсивности напряжений будет меньше порогового значения, определяемого экспериментальным путём.

Коэффициент интенсивности напряжений рассчитывается по формуле [3]

$$K = \sigma \sqrt{\pi l_0},$$

где σ – максимальные растягивающие напряжения в несущем элементе под действием эксплуатационных нагрузок; l_0 – начальная длина трещины.

Можно добиться, чтобы трещина не росла, путём обеспечения малой длины начальной трещины l_0 . Исследования показали, что l_0 должна быть меньше 1 мм. При изготовлении или ремонте вагонов обеспечить такую малую длину начальных трещин затруднительно. Поэтому, как показывает опыт эксплуатации вагонов, трещины растут.

На рост трещин влияют величина амплитуды динамических растягивающих напряжений и число циклов нагрузок. Для грузовых вагонов число циклов вертикальных и боковых нагрузок превышает число циклов продольных нагрузок более чем в 600 раз.

Данный факт позволяет сделать следующий вывод: целесообразно при проектировании обеспечить такие параметры несущих элементов, при которых циклы вертикальных и боковых нагрузок не будут приводить к росту трещин. Для этого необходимо, чтобы максимальные растягивающие напряжения от вертикальной и боковой нагрузок по III режиму «Норм...» были меньше повреждающих, определяемых по формуле [3]

$$\sigma_{\text{повр}} = \frac{K_{\text{срн}}}{\sqrt{\pi l_0}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{срн}}$ – пороговый коэффициент интенсивности напряжений.

Однако под действием совместных циклов продольных нагрузок и такого же количества вертикальных нагрузок трещины могут расти. Срок роста трещин определяет живучесть несущей системы.

Живучесть обеспечивается, если срок роста трещины превышает срок до деповского ремонта вагона, когда трещины будут устранены. Следует учесть, что повреждающие напряжения, определяемые по формуле (2), изменяются в связи с ростом трещины.

К моменту деповского ремонта можно рассчитать результирующую длину трещины по следующей формуле из линейной механики разрушения:

$$l_{0\text{рез}} = \frac{\Delta K^4 \cdot 10^5}{N l \cdot 2,5 \sigma_{\pm}^4 + \Delta K^4 \cdot 10^5}, \quad (3)$$

где l – допустимая длина трещины к моменту деповского ремонта (по «Нормам...» $l = 10$ мм); ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений (для стали 09 Г2Д, наиболее используемой в вагостроении, $\Delta K = 25$ МПа · м^{1/2}); N – число циклов продольных растягивающих сил по оси автосцепки (к моменту первого деповского ремонта $N = 52500$); σ_{\pm} – амплитуда циклических напряжений от продольных нагрузок, приведённая к эквивалентному по повреждаемости симметричному циклу ($\sigma_{\pm} \approx 0,75 \sigma$, где σ – максимальное растягивающее напряжение от продольной нагрузки по III режиму «Норм...»).

После вычисления $l_{0\text{рез}}$ по формуле (3) можно по формуле (2) определить напряжения, которые следует рассматривать в качестве допускаемых при расчёте кузова на вертикальную нагрузку по III режиму. При этом циклы вертикальных и боковых нагрузок станут неповреждающими и живучесть будет обеспечена. Внеплановые ремонты кузовов вагонов не потребуются.

Итак, для обеспечения в процессе проектирования работоспособности несущих систем кузовов вагонов целесообразно использовать для расчёта общих напряжений в несущих элементах кузова приведённые выше две основные системы. Это позволяет учесть ослабленную работу плоских участков обшивки между гофрами, а также уточнить расчёт. Для расчёта местных напряжений целесообразно выделять из несущей системы интересные узлы и рассчитывать их методом конечных элементов.

Проверку устойчивости можно выполнять путём рассмотрения устойчивости наиболее сжатого гофра обшивки. Для обеспечения устойчивости необходимо при проектировании обеспечить жёсткость дуг и стоек боковых стен выше критической жёсткости.

Чтобы избежать внеплановых ремонтов из-за трещин в несущих элементах кузовов, необходимо обеспечить живучесть несущей системы. Для этого целесообразно назначать размеры несущих элементов так, чтобы в них растягивающие напряжения от вертикальной и боковой нагрузок были меньше повреждающих. Величину повреждающих напряжений можно определить по изложенной в настоящей статье методике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозбинев, В.П. Проектировочные расчёты для проверки несущей способности кузовов вагонов: учеб. пособие / В.П. Лозбинев, А.А. Лагутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 103 с.
2. Суслов, В.П. Строительная механика корабля и основы теории упругости / В.П. Суслов, Ю.П. Кочанов, В.Н. Спихтаренко. – Л.: Судостроение, 1972. – 479 с.
3. Азовский, А.П. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений / А.П. Азовский, В.Н. Котуранов, В.П. Лозбинев, М.Н. Овечников. – М.: Маршрут, 2005. – 490 с.
4. Воронин, Н.Н. Анализ повреждаемости и оценка работоспособности несущих сварных конструкций грузовых вагонов: автореф. дис.... д-ра техн. наук / Н.Н.Воронин. – М., 1994. – 48 с.

Материал поступил в редколлегию 17.03.15.