

ОСОБЕНОСТИ ПРИ ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ВАГОНЕН КОШ С НОСЕЩА ОБШИВКА

Добринка АТМАДЖОВА

atmadzhova@abv.bg

*Добринка Атмаджова, доц. д-р инж., Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, катедра
“Транспортна техника”, ул. “Гео Милев” 158, София 1574,*

БЪЛГАРИЯ

Резюме: В статията се разглеждат методики за анализ напрегнатото състояние и устойчивостта на носещите елементи от съвременни конструкции вагонни кошове, представляващи тънкостенни подпярни черупки, с отчитане огъвания на обшивката от технологичен характер.

Ключови думи: железопътен подвижен състав, вагон, кош, обшивка.

ВЪВЕДЕНИЕ

Носещата конструкция на коша на вагона се явява специфичен обект на изследване. Страничните стени включват тънка обшивка, подпярна в надлъжно направление от гофри, а в напречно от колони (греди). Покрива се явява тънкостенни цилиндрични черупки подкрепени от дъги. Рамата на коша включва мощна гредова система и често съдържа носещ лист на пода [4]. При проектирането на вагонни кошове възниква необходимостта от определяне напрегнатото състояние и устойчивостта на коша при наличието на носеща обшивка.

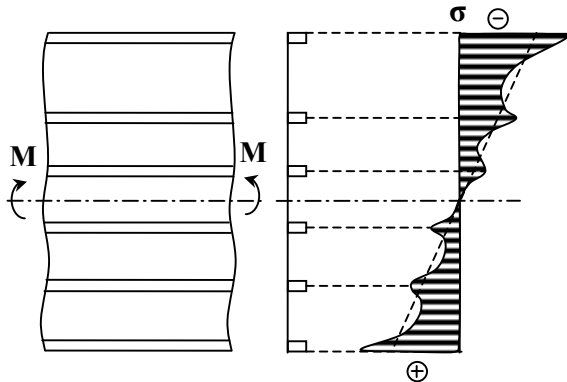
Целта на настоящата разработка е разглеждане на някои особености при определяне напрегнатото състояние и устойчивостта на вагонен кош с носеща обшивка с отчитане наличие на огъване на обшивката от технологичен характер.

1. МЕТОДИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ВАГОННИ КОШОВЕ

Основателя на научната школа по анализ напрегнатото състояние на конструкциите на вагонни кошове от тип подпярни черупки е

проф. Е.Н.Никольский [3]. Разработените от него методи за проектиране на вагонни кошове са основани на теорията на еластичността и теорията на черупките. Обаче методите на теорията на еластичността и теорията на черупките са сложни и трудоемки и тяхното приложение при пресмятане на тънкостенни конструкции, особено имащите начални технологични огъвания, са често практически невъзможни. В настояще време в изчисленията широко се използва метода на крайните елементи (МКЕ) отличаващ се с проста реализация и универсалност. При съпоставяне на данните от изчисленията и от експериментите в редица случаи напреженията в носещите елементи на коша значително се различават от фактическите. Това може да се обясни с особеността на носещата система на вагонния кош. Изследванията на работата на подкрепяни тънкостенни черупки на огъване в тяхната равнина показват, че тънкия лист не се деформира съвместно с подкрепящите го елементи, а частично и степента на неговото участие намалява с отдалечаването от подкрепящите елементи. На фиг.1 схематично е показана диаграма на огъващите напрежения на тънка подкрепена черупка.

Такова явление при отсъствие на начално изкривяване на листа произтича в процеса на нарастване на натоварването вследствие прехода на първоначалната равнинна форма на листа към криволинейна и особено с голяма значимост се проявява при наличие на неравности от технологичен характер.



фиг.1 Схема на диаграма на огъващите напрежения на тънка подкрепена черупка, подложена на огъване.

Значително увеличение на напреженията произтича и в следствие местното огъване на надлъжни греди (пояси), наличие на изрези за прозорци, врати, клапи и др.

Тънката обшивка на някои конструкции вагонни кошове, включва гофри и има начални огъвания, обусловени от технологията на изработване им. Равнинните участъци на обшивката между гофрите губят устойчивост и се изкривяват, при което те работят отслабено и се появяват допълнителни напрежения на огъване. Обшивката се включва неравномерно в носещата способност в близост на подпирашите елементи и далеч от тях.

Най-разпространените методи за изчисляване коша на вагони е изчисляване кош от гредова система по силов метод и по МКЕ [2,4]. Тези методи са реализирани и в програмни продукти като SAP2000 и др. Обшивката и нейната отслабена работа в отделни участъци се отчита чрез включване в напречното сечение на гредовите елементи части от обшивката с ширина равна на $40 \cdot \delta$, където δ – дебелина на обшивката. Останалата част на обшивката не се отчита, т.е. в пресмятанята се въвежда редуцирана а не реалната обивка. При използване на МКЕ гредовите подкрепящи елементи (колони, греди, дъги, напречници и др.) в изчислителната схема се въвеждат като самостоятелни елементи. Обшивката при тези

модели представлява крайни елементи – пластини [1]. Възниква въпроса отчитане отслабената работа на части от обшивката.

2. ОСОБЕНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА КОШ С НОСЕЩА ОБШИВКА

Огънатата обшивка в следствие загуба на устойчивост или от технологично естество ще има намалена коравина на опън-натиск в сравнение с неогънатата обшивка.

Съществуват две възможности за отчитане в МКЕ отслабената работа на обшивката:

- чрез използване на пластини моделиращи обшивката между съседните гофри, и

- чрез използване на пластини които представляват панели от обшивката включващи гофрите и равнинните участъци между гофрите.

2.1. Пластини моделиращи обшивка

В случаят на пластини моделиращи обшивката за получаване параметрите на пластините на опън-натиск по направление на гофрите, частта от обшивката между гофрите и съседните напречни подпирашци елементи се заменя с ортотропна пластина с модул E_1 равен на модула на материала, а материала, а дебелината на обшивката се определя от равенството на коравината на опън по направление на товарите и приведената дебелина e :

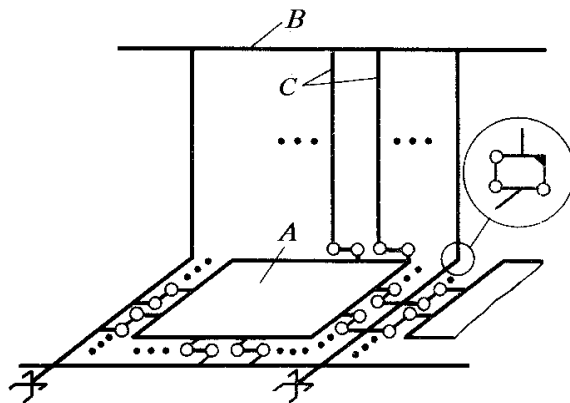
$$\text{- при } 40 \cdot \delta < b_1 \quad \delta_t = \frac{40 \cdot \delta^2}{b}$$

$$\text{- при } 40 \cdot \delta \geq b_1 \quad \delta_t = \frac{\delta \cdot b_1}{b}$$

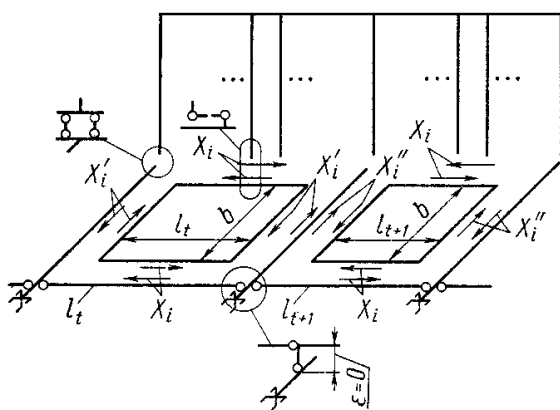
където: δ – дебелината на обшивката; b – разстояние между осите на съседните гофри; b_1 – ширина на обшивката между съседните гофри. Модула в направление перпендикулярно на оста на гофрите E_2 се определя с отчитане еластичността на гофрата в напречно направление. Отделя се равна единична ширина с дължина l и дебелина δ в направление перпендикулярно на оста на гофите. Отделянето на тази ивица от обшивката натоварена от единични сили се приравнява със същата по размери ортотропна пластина с аналогично натоварване.

Ако в изчислителната схема панела от обшивката между съседните гофри напречни подкрепящи греди се представя от няколко крайни елемента – пластини, то коравината на пластините се приема равна на характеристиките на ортотропни пластини, заменящи целия панел от обшивката.

В нормите при проектирането на вагони се препоръчва в сечението на гредите или колони да се включи част от обшивката с ширина $40.\delta$. Така например обшивката на рамата от коша на открит товарен вагон се включва в изчислителната схема (фиг.2) във вид на правоъгълни панели А с помощта на непрекъснато разпределени връзки. Към гредите В, изобразяващи странични стени, на панелите А се присъединяват чрез непрекъснати, абсолютно твърди греди (колони) С.



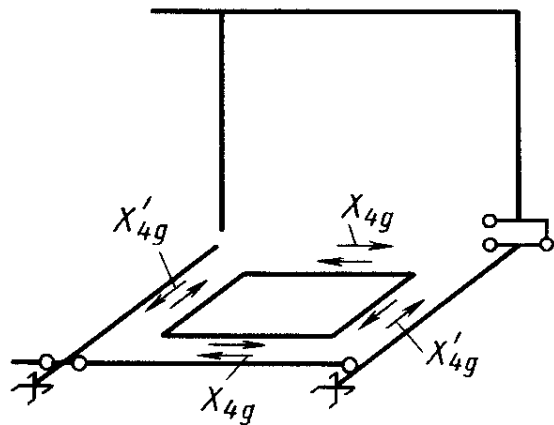
Фиг.2 Изчислителна схема на кош с носеща обшивка на рамата



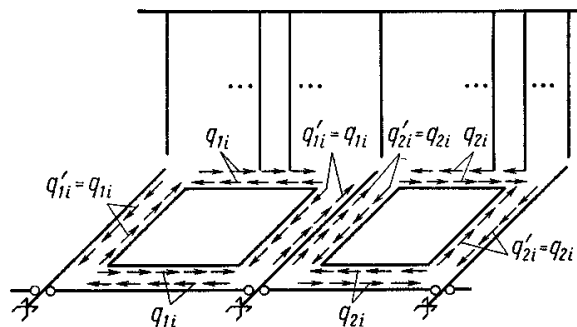
Фиг.3 Схема на разположение на неизвестните сили на кош с носеща обшивка на рамата

На фиг. 3 и 4 са изобразени неизвестните сили за съответните участъци, а на фиг.5 – разделението на тангенциалните сили на

взаимодействие между обшивката и гредите от рамата в основната система.



Фиг.4 Схема на разположение на неизвестните сили на кош с носеща обшивка на рамата за десен краен участък



Фиг.5 Схема на тангенциалните сили на взаимодействие между обшивката и гредите от рамата в основната система

Матрицата на податливостта U за гредова система се определя по формулата:

$$(1) \quad U = \frac{1}{E_0 J_0} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_t \\ \vdots \\ u_h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ t \\ \vdots \\ h \end{pmatrix}$$

където елементите u_t представляват матрица ред и съдържат три елемента:

$$(2) \quad u_t = \|a_t, h_{1t}, \eta_{2t}\|,$$

$$\text{като } a_t = \frac{\ell_t E_0 J_0}{6E_t J_{te2}}; \quad h_{1t} = \frac{J_{te2}}{J_{te1}}; \quad \eta_{2t} = \frac{J_{te2}}{J_{te3}}$$

Приведените характеристики J_{te1} , J_{te2} , J_{te3} на сеченията на гредите на участък t се изчисляват по формулите:

$$(3) \quad J_{te1} = \left[\frac{3}{\ell_t^3} \int_0^{\ell_t} \frac{(\ell_t - x)^2}{J_t(x)} dx \right]^{-1}$$

$$(4) \quad J_{te2} = \left[\frac{6}{\ell_t^3} \int_0^{\ell_t} \frac{(\ell_t - x)x}{J_t(x)} dx \right]^{-1}$$

$$(5) \quad J_{te3} = \left[\frac{3}{\ell_t^3} \int_0^{\ell_t} \frac{x^2}{J_t(x)} dx \right]^{-1}$$

където: ℓ_t – дължина на участъка t ; $J_t(x)$ – геометрична характеристика на напречното сечение на гредата на участъка t ; E_t – модул на еластичност на материала на гредата на участъка t ; $E_0 J_0$ – произволно число, обикновено приемано за равно на коравината на огъване на един от участъците на гредите.

При наличие на обшивка като насещ елемент от рамата на коша елементите u_t (за участъци A – панели от обшивката от фиг. 14 $8g + 4 \leq t \leq 9g + 3$) се изчисляват по следните формули:

$$(6) \quad \mathbf{u}_t = \|\mathbf{a}_t, 1, 1\|, \quad a_t = \frac{\ell_t \cdot E_0 \cdot J_0}{6E_t \cdot J_t},$$

където:

$$(7) \quad E_t = G = \frac{E}{2(1 + \mu)}; \quad J_t = \delta_t \cdot b$$

като δ_t – дебелина на обшивката в участъка t , то за a_t получаваме:

$$(8) \quad a_t = \frac{(1 + \mu) \ell_t \cdot E_0 \cdot J_0}{E \cdot \delta_t \cdot b}$$

При този подход не се отчитат напрежения от огъване на гофрите.

2.2 Пластини, представляващи панели от обшивката, включващи гофри и равнинни участъци от обшивката между гофрите

Коравината на панела от обшивката на опън-натиск по направление на гофрите ще зависи от началното огъване на обшивката. За панели при които гофрите и участъците на обшивката между гофрите е огъната, коравината ще бъде по-малка от тази при неогънати. Приведената дебелина на еквивалентната пластина се определя по формулата:

$$(9) \quad \delta_t = \delta \frac{F_p}{F_n}$$

където δ – дебелина на обшивката на вагона; F_p – площ на напречното сечение на една гофра и прилежащ редуциран участък от обшивката (по $20 \cdot \delta$ от всяка страна); F_n – площ на напречното сечение на една гофра с прилежащ нередуциран участък от обшивката (от едната страна на гофрата).

Модул E_1 се приема равен на модула на материала на обшивката. Модулът E_2 (аналогично на случай т.2.1.), е необходимо да се определи, отчитайки напречната еластичност на гофрата.

Необходимо е да се отбележи, че съществуват два равностойни способа за привеждане на гофрираните панели от обшивката към ортотропен материал. В първия способ наличието на гофри се отчита по пътя на въвеждане на приведена дебелина. Във втория способ дебелината се приема за равна на дебелината на обшивката, а наличието на гофри се отчита с въвеждането на приведен модул E_1 , който се приема по-голям от модула на материала на обшивката. При тези два способа се обезпечава еднаква коравина на панелите от обшивката при опън-натиск по направление на гофрите. При еднакви премествания във възлите, двата способа ще дадат различни напрежения. Вторият способ води до завишаване на напреженията, тъй като преместванията ще бъдат умножени с модулите $E_1 > E_m$ (E_m – модул за материала). Привеждането на гофрираната обшивка към ортотропен модел е необходимо да става по първия способ.

Изложените способности не отчитат началното огъване на гофрите.

С достатъчна за практиката точност може да се счита, че формата на началното огъване в участъка между съседните греди или дъги е синусоидална. За различните гофри от панелите на обшивката максималната

амплитуда на огъване може да бъде различна, поради което е целесъобразно привеждането ѝ към еквивалентна с постоянно огъване по цялата ширина на панела. Еквивалентната амплитуда се определя от равенството:

$$(10) \quad by_{\text{екв}} = \int_0^b y_{\text{max}} \cdot \sin \frac{\pi}{b} x \cdot dx,$$

то, за еквивалентната амплитуда получаваме:

$$(11) \quad y_{\text{екв}} = \frac{2}{\pi} y_{\text{max}}$$

където: y_{max} – максимална амплитуда на синусоидално огъване за гофри от панела на обшивката.

Нека разгледаме пояс от ортотропна пластина, заменяща гофриран панел. Пояса с единична широчина е отрязан по направление на гофрите и считаме, че има синусоидално огъване с максимална амплитуда $y_{\text{екв}}$.

Удължението на огънатия пояс от единична сила ще бъде:

$$(12) \quad \Delta = \int_0^{\ell} \frac{12M_i^2}{E_m \cdot \delta_t^3} dx + \int_0^{\ell} \frac{N_i^2}{E_m \cdot \delta_t} dx$$

където M_i и N_i – съответно значенията на огъващия момент и нормалната сила в i -тото сечение.

При условие, че $N_i = 1$, $M_i = 1 \cdot y_i = 1 \cdot y_{\text{екв}} \cdot \sin \pi / \ell$, то за удължението получаваме:

$$(13) \quad \Delta = \frac{\ell}{E_m \cdot \delta_t} \left(1 + \frac{6 \cdot y_{\text{екв}}^2}{\delta_t} \right)$$

Удължението на ортотропната пластина с такива размери от еденечен товар е:

$$(14) \quad \Delta_1 = \frac{\ell}{E_1 \cdot \delta_t}$$

Приравнявайки зависимости (13) и (14) за модула в надлъжно направление E_1 получаваме:

$$(15) \quad E_1 = E_m \frac{\delta_t^2}{\delta_t^2 + 6y_{\text{екв}}^2}$$

За модула E_2 поради малката твърдост на гофрите в напречно направление може да бъде пренебрегнат.

Еластичните характеристики на еквивалентната ортотропна пластина, заменяща в изчислителния модул реална панела с гофри с начално огъване при опън-натиск ще бъдат:

- по направление на гофрите – модул E_1 , определен по зависимост (15) и приведената дебелина δ_t по израз (9);

- по направление перпендикулярно на гофрите - модул E_2 , отчитащ напречната еластичност на гофрите.

Коефициента на Поасон при опън по направление на гофрите е $\mu_x = 0,3$, а в перпендикулярно направление се определя от отношението:

$$(16) \quad \mu_y = \mu_x \frac{E_2}{E_1}$$

Доколкото панелите от обшивката са подлагани не само на опън-натиск, но и на огъване е необходимо определянето на еквивалентните характеристики на ортотропната пластина, заменяща фактическата обшивка огъната по технологични причини.

Тъй като наличието на огъване по технологични причини не влияе на коравината на обшивката при огъване, еквивалентните характеристики на ортотропния панел може да бъдат приети такива, както при неогънатите панели [1].

Ортотропният модел на панел от обшивката дава приближени стойности на напреженията. За по-точно определяне на напреженията е целесъобразно да се направят допълнителни изчисления. По данните от изчисленията по МКЕ (напреженията във възлите на конкретна пластина) се определят нормалните усилия в краищата на гофрата, а именно:

$$(17) \quad \sigma_x = \frac{N}{F_2} + \frac{M_{\text{ог}} + N \cdot y_{\text{max}}}{W_2}$$

където F_2 и W_2 – съответно съпротивителен момент на гофра с редуциран участък от обшивката (обшивка с ширина 2δ от всяка страна на гофрата).

Такъв подход позволява уточнение на напреженията във върховете на гофрите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерната особеност на носещите системи на съвременни вагонни кошове, представляващи тънкостенни подпярни черупки, се явява наличието на начално огъване на обшивката, обословено от технологиата на производство. Равнинните участъци от обшивката между гофрите губят устойчивост и частично се изключват от работа. Отчитането на отбелязаните особености, определянето на напрегнатото състояние на коша на вагона на базата на теорията на еластичността и теорията на черупките става практически невъзможно.

Анализа на напрегнатото състояние и устойчивостта на носещите елементи от коша на вагона може да се реализира с помощта на МКЕ, при използване на изчислителна схема, в която панелите от обшивката на коша на вагона се представят във вид на ортотропни пластини, характеристиките на които се

определят съобразно зависимостите и препоръките в настоящата разработка.

Настоящата разработка открива допълнителни възможности за усъвършенстване анализа на напрегнатото състояние и устойчивостта на носещата конструкция от коша на вагона с отчитане огъвания по обшивката от технологичен характер.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Лозбинев В. П., Проектирование и оптимизация несущих систем кузовов вагонов, Брянск, БГТУ, 1997.

[2] Лозбинев В. П., Развитие методики анализа напряженного состояния и устойчивости несущих элементов кузовов вагонов, вестник БГТУ №1, 2004.

[3] Никольский Е. Н. Оболочки с вырезами типа вагонных кузов. М., Машгиз, 1963.

[4] Шадур Л. А. Расчет вагонов на прочность, изд. Машиностроение, М., 1971.

PECULIARITIES WITH COMPUTATION OF A CAR BODY OF BEARING SHELL

Dobrinka Atmadzhova

Assoc. Prof. Dobrinka Atmadzhova, PhD, Higher School of Transport, 158 Geo Milev Street, Sofia
BULGARIA

Abstract: *The paper presents the methods of analyzing the stressed condition and the stability elements of modern car body structures presenting thin-walled supported shells with taking into consideration shell bending of technological nature*

Key words: *rolling stock, wagon, car body, shell.*