

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.4: 539.3

М. О. БОНДАРЕНКО, студентка НТУ «ХП»

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВАГОНІВ І МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ

В статті розглянуто існуючі типи залізничних вагонів та їх класифікації залежно від призначення. Проаналізовано основні вузли конструкцій вагонів, загальні для всіх типів. Акцент зроблено на функціях та умовах роботи цих вузлів. Також в статті мова йде про аналітичні методи розрахунку елементів конструкцій вагонів на міцність, які є основою для обґрунтування їх раціональних параметрів. Зроблено огляд нормативного документу, яким треба керуватися при розрахунку вагонів на міцність, при чому особливу увагу приділено розрахунковим режимам. Наведені теоретичні відомості про метод скінченних елементів, що рекомендується для оцінки напружено-деформованого стану елементів і вузлів вагона, зокрема, його розрахункові формули. Визначено найбільш актуальні задачі сучасної галузі вагонобудування, які будуть розв'язуватися надалі.

Ключові слова: пасажирський вагон, вантажний вагон, конструкція вагону, оцінка міцності, розрахункові режими, навантаження, метод скінченних елементів, розрахункове рівняння, напружено-деформований стан, допустимі напруження.

Вступ. Залізничний транспорт є провідним видом пасажирських і вантажоперевезень в багатьох великих і малих країнах світу. Так, в Україні на залізничний транспорт припадає 60 % всіх перевезень.

Вимога сучасності – збільшення швидкостей, навантажень, довговічності та надійності рухомого складу. Залізничні вагони, як важлива ланка цього виду транспорту, потребують постійного вдосконалення. Тому важливим етапом розв'язання цих задач є аналіз конструкцій вагонів, опис якого є **метою** та змістом статті із подальшим спрямуванням на аналіз питань міцності їх елементів.

Постановка задачі. У статті ставиться задача провести аналіз конструкції та методів розрахунку елементів залізничних вагонів на міцність.

Аналіз стану питання. Типи залізничних вагонів. Взагалі, залежно від роду виконуваної перевізної роботи вагони поділяються на дві основні групи – пасажирські та вантажні; по осності – двовісні, трьохвісні, чотиривісні, шестивісні, восьмивісні; по матеріалу і конструкції кузова – металеві, зварні і т.д.; по габариту рухомого складу – вагони габариту Т, Тц, Тпр та ін; за місцем експлуатації – вагони загальномережевого транспорту і вагони промислового транспорту.

В книзі [1] наведено загальні відомості про устрій залізниць: про вагонний парк і конструктивні особливості вантажних і пасажирських вагонів. Парк пасажирських вагонів включає в себе цільнометалеві чотирихвісні вагони для перевезення пасажирів (рис. 1), поштові вагони, ресторани, багажні та вагони спеціального призначення. Пасажирські вагони обладнані пристроями освітлення, опалення та вентиляції. Вантажні вагони

класифікують на криті вагони, платформи, піввагони, цистерни, ізотермічні вагони та вагони спеціального призначення. Криті вагони призначені для перевезення вантажів, які потребують захисту від атмосферного впливу.

Вони мають металевий кузов із засувними дверима в обох бокових стінах (рис. 2, а). На платформах перевозять довгомірні, масивні і великовагові вантажі. Платформи обладнують невисокими відкидними металевими бортами і пристосуваннями для установки стійок, необхідних при перевезенні колод, стовпів, дощок тощо (рис. 2, б).

Піввагони призначені для перевезення камяного вугілля, лісу, металів та інших сипучих та штучних вантажів, які не потребують захисту від атмосферних опадів. Кузов піввагону не має даху, що забезпечує зручність завантаження і розвантаження (рис. 2, в). Рідкі вантажі (нафта, бензин, кислоти, масло, гас тощо) перевозять у цистернах. Цистерна - це спеціальний металевий зварний резервуар циліндричної форми, що має у верхній частині люки для наливання вантажу, очищення та ремонту (рис. 2, г).



Рис. 1 – Пасажирський вагон



а



б



в



г

Рис. 2 – Вантажні вагони

а – критий вагон; б – платформа; в – піввагон; г – цистерна

Ізотермічні вагони використовуються для транспортування швидкопсувних вантажів таких, як жива риба, молочні та інші продукти.

Вагони спеціального призначення призначені для вантажів, що потребують особливих умов перевезення, наприклад, скота або масивних і великовагових машини й устаткування.

Аналіз конструктивних рішень та компоновок вагонів. Незважаючи на різноманіття конструкцій вагонів, вони складаються із чотирьох основних вузлів, що мають певне і однаково важливе функціональне значення: кузов, ходові частини, ударно-тягові прилади та автогальма [2].

Кузов – головний для всіх вагонів вузол, який визначає тип конструкції. Він є найбільш матеріаломістким та складний у виготовленні. Умови роботи кузова важкі, адже в експлуатації він сприймає всі види навантажень, а також зазнає кліматичного впливу.

Ходові частини – другий основний вузол вагонів. Їх функціональне призначення полягає у забезпеченні безпечної взаємодії вагона із залізничним шляхом в усьому діапазоні швидкостей руху, передбаченому технічним завданням.

Умови роботи деталей ходових частин ще більш складні, ніж у кузовів вагонів. Через них здійснюється передача навантажень від вагону на елементи шляху.

Ударно-тягові прилади відносяться до третього вузла вагонів. Їх функціональне призначення полягає в тому, щоб забезпечувати зчеплення одиниць рухомого складу між собою, утримувати їх на певній відстані одна від одної, передавати поздовжні тягові та стискаючі зусилля, що виникають у потязі.

Умови роботи ударно-тягових приладів характеризуються високою динамічною навантаженістю їх деталей, яка призводить до зносу і руйнування останніх.

Автогальмівне обладнання належить до четвертого основного вузла вагону. Його призначення – забезпечувати можливість регулювання швидкостей руху поїздів та їх зупинки.

Умови роботи елементів конструкцій, які забезпечують гальмування, як і всіх інших вузлів вагонів, також важкі. Вони піддаються впливу кліматичних факторів, різноманітних видів механічних навантажень, які виникають при русі, а вузли тертя зазнають термічного навантаження високого рівня.

Тож при проектуванні вагонів повинні бути виконані вимоги по забезпеченню функціонального призначення його вузлів. Актуальність у цьому питанні розрахунків на міцність не викликає сумнівів, оскільки вони є основою для обґрунтування раціональних параметрів елементів рухомого складу та підвищення їх технічних характеристик. Завдяки аналітичним розрахункам можна судити про надійність майбутнього виробу на стадії його проектування.

Аналіз методів розрахунків вагонів. Великий об'єм теоретичних відомостей про методи розрахунків вагонів на міцність представлено в другому та третьому виданнях книги Л. А. Шадура [3, 4].

Сили, що діють на вагон, поділяють на 4 основні групи: 1) вертикальне навантаження; 2) бокове навантаження; 3) поздовжнє навантаження; 4) самоврівноважені сили – від розпору сипучих вантажів.

При оцінці міцності вагонів керуються Нормами [5]. Згідно з цим нормативним документом дія експлуатаційних навантажень та їх величини визначаються трьома розрахунковими режимами.

За I розрахунковим режимом розглядається відносно рідке поєднання екстремальних навантажень. В експлуатації він відповідає для вантажних вагонів осаджуванню і рушанню великовагового потягу з місця, співударянню вагонів при маневрах, у тому числі при спуску з гірок, екстренне гальмування в поїздах при малих швидкостях руху, для пасажирських вагонів – аварійне співударянню при маневрах, або зіткнення вагонів в позаштатних ситуаціях, а також аварійний ривок (поштовх) вагона при проходженні у вантажному поїзді.

За III розрахунковим режимом розглядається відносно часте можливе поєднання помірних за величиною навантажень, характерне для нормальної роботи вагона в рухомому потязі. В умовах експлуатації III режиму відповідає випадок руху вагона в складі поїзда по прямолінійних і криволінійних ділянках колії та стрілочних переводах з допустимою швидкістю при періодичних службових регулювальних гальмуваннях, періодичних помірних ривках і поштовхах, штатній роботі механізмів і вузлів вагона.

II додатковий спеціальний розрахунковий режим встановлюється для окремих типів вагонів як поєднання навантажень, характерне для цих вагонів (наприклад, при вантажно-розвантажувальних роботах, ремонті і т.п.). Необхідність розрахунку по II режиму встановлюється в технічному завданні.

В Нормх зазначено, що розрахунок елементів конструкції вагона, метою якого є визначення напружень, треба виконувати методами опору матеріалів, будівельної механіки і теорії пружності. Оцінку напружено-деформованого стану елементів і вузлів вагона рекомендується проводити числовим методом скінченних елементів (МСЕ). МСЕ є універсальним і дає змогу розв'язувати задачі з урахуванням усіх особливостей геометрії, навантажень та граничних умов.

Матеріали досліджень методом скінченних елементів. Корисним посібниками для оволодіння теоретичними основами є роботи [6,7]. В них здійснюється виклад теоретичних основ МСЕ – інтерполяція даних, вибір апроксимуючих функцій, модифікація крайових умов. А найголовніше – в

них є пояснення впливу різних чинників на обчислювальну ефективність методу скінченних елементів.

Розрахункове рівняння МСЕ для статичних задач має вигляд:

$$[K] \cdot \{u\} = \{P\}, \quad (1)$$

де $[K]$ – загальна матриця жорсткості скінченно-елементної моделі;

$\{P\}$ – загальний вектор заданих зовнішніх вузлових сил;

$\{u\}$ – загальний вектор вузлових переміщень.

Компоненти вектора сил $\{P\}$ можуть породжуватися зосередженими силами, тепловими навантаженнями, тиском і силами інерції.

Разом із тим система розв'язувальних лінійних алгебраїчних рівнянь (1) слідує із лінійних диференціальних рівнянь теорії пружності, а саме: співвідношень Коші [8]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

де u_k – компоненти вектора переміщень точок пружного тіла;

ε_{kl} – компоненти тензора деформацій;

З закону Гука:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (3)$$

де σ_{kl} – компоненти тензора напружень; C_{klqp} – компоненти тензора пружних констант того чи іншого матеріалу;

З рівнянь рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i = 0; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4)$$

де F_k – компоненти вектора просторово розподілених сил.

У співвідношеннях (2 – 4) використовується правило підсумовування компонент векторів та тензорів за індексами, що повторюються.

На додаток до системи рівнянь (2 – 4), що діють в області Ω , яку займає досліджуваний об'єкт, на його поверхні S справедливі крайові умови:

$$u_i|_{S_u} = u_i^* ; \sigma_{ij} \nu_j|_{S_\sigma} = g_i ; i, j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

де S_u, S_σ – частини поверхні S , на яких задані відповідно переміщення та поверхневі навантаження.

Система рівнянь (2 – 5) є лінійною, і завдяки цьому її дискретизований варіант (1) теж є системою лінійних рівнянь.

З прикладами виконання дослідження напружено-деформованого стану різних елементів конструкції вагонів за допомогою методу скінченних елементів можна ознайомитись у статтях [9 - 12]. Зокрема, в статтях [9] та [10] мова йде про особливості моделювання впливу експлуатаційних навантажень на рами тепловозів.

Результати досліджень. При розрахунку обчислюються еквівалентні напруження, які не повинні перевищити допустимі, встановлені для відповідного розрахункового режиму.

Основна вимога при розрахунку на міцність за I режимом – не допустити появи залишкових деформацій (ушкоджень) у вузлі або деталі. Тому допустимі напруження по цьому режиму вибираються близькими до межі текучості або межі міцності матеріалу з урахуванням характеру дії навантаження (квазістатичне, ударне тощо) і властивостей матеріалу.

Основна вимога при розрахунку за III режимом – не допустити втомного руйнування вузла або деталі. Допустимі напруження за цим режимом обираються виходячи з меж витривалості матеріалу з урахуванням спільної дії квазістатичних, вібраційних та ударних навантажень, впливу корозії тощо.

Висновки. Як свідчить практика, в умовах роботи вагони все ж таки отримують ушкодження. Це пояснюється кількома можливими причинами.

По-перше, умови експлуатації вагонів погіршилися порівняно з 1996 роком, коли були прийняті норми розрахунку.

По-друге, хоча сьогодні для виконання розрахунків вагонів і використовують широко обчислювальні машини, сучасні методи геометричного моделювання та потужні системи автоматизованого проектування, при побудові математичних, геометричних та числових моделей все ще приймають багато спрощень. Треба відмітити, що при некоректній розрахунковій моделі метод скінченних елементів може не тільки не уточнити результати, але і призвести до ще більшої похибки, ніж традиційні схеми для ручних розрахунків, які базуються на методі сил. Потрібно, щоб модель якомога точно копіювала фізичні процеси та стани, що спостерігаються і зафіксовані.

Тож актуальними є задачі уточнення розрахункових навантажень, вдосконалення методів розрахунку, а також і самих конструкцій вагонів. Це є напрямком подальших досліджень, які буде висвітлено у наступних публікаціях.

Список літератури: 1. Вагоны. Под ред. В. В. Лукина – М. : Маршрут, 2004. – 424 с. 2. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений. Под ред. В. Н. Котуранова – М. : Маршрут, 2005. – 490 с. 3. Расчет вагонов на прочность. Вершинский С. В. и др. Изд 2-е. Под ред. Л. А. Шадура. – М. : Машиностроение, 1971. – 432 с. 4. Вагоны : Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Л. А. Шагур, И. И. Челноков, Л. Н. Никольский, Е. Н. Никольский, В. Н. Котуранов, П. Г. Проскурнев, Г. А. Казанский, А. Л. Спиваковский, В. Ф. Девятков; Под ред. Л. А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1980. – 439 с. 5. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М : ГосНИИВ-ВНИЖТ, 1996. – 317 с. 6. Галлагер Р. Метод скінченних елементів. Основи : Пер. з англ. – М. : Мир, 1984. – 428 с. 7. Стренг Г., Фікс Дж. Теорія методу скінченних елементів. М. : Мир, 1977. – 351 с. 8. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М. : Мир, 1987. – 542 с. 9. Орлов Е. А. Моделирование воздействия эксплуатационных нагрузок на рамы тепловозов : методы, модели, специализированная САПР// Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип. „Машиноведение и САПР”. – 2006. – No.24. – С.103-112. 10. Васильева Т. А. Совершенствование методов расчета элементов машин с длительным сроком работы при действии многокомпонентной нагрузки // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип. „Машиноведение и САПР”. – 2006. – No.22. –С.27-32. 11. Орлов Е. А. Параметрический подход к моделированию динамики железнодорожных экипажей // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип. „Машиноведение и САПР”. – 2007. – No.33. – С.77-87. 12. Овечников Н. Н. и др. Расчет несущего кузова тепловоза как стержневой системы с использованием ЭЦВМ // Тр. ВНИТИ.– Вып..129. –1968. – С.3-39.

Bibliography (transliterated): 1. Vagony. Pod red. V. V. Lukina – М. : Marshrut, 2004. – 424 s. 2. Vagony. Osnovy konstruirovaniya i jekspertizy tehnicheskikh reshenij. Pod red. V. N. Koturanova – М. : Marshrut, 2005. – 490 s. 3. Raschet vagonov na prochnost. Vershinskij S. V. i dr. Izd 2-e. Pod red. L. A. Shadura. – М. : Mashinostroenie, 1971. – 432 s. 4. Vagony : Uchebnik dlja vuzov zh.-d. трансп. / L. A. Shadur, I. I. Chelnokov, L. N. Nikolskij, E. N. Nikolskij, V. N. Koturanov, P. G. Proskurnev, G. A. Kazanskij, A. L. Spivakovskij, V. F. Devjatkov; Pod red. L. A. Shadura. – 3-e izd., pererab. i dop. – М. : Transport, 1980. – 439 s. 5. Normy dlja rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh). – М : GosNIIV-VNIZhT, 1996. – 317 s. 6. Gallager R. Metod skinchennih elementiv. Osnovi : Per. z angl. – М. : Mir, 1984. – 428 s. 7. Streng G., Fiks Dzh. Teorija metodu skinchennih elementiv. М. : Mir, 1977. – 351 s. 8. Vasidzu K. Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti. – М. : Mir, 1987. – 542 s. 9. Orlov E. A. Modelirovanie vozdejstvija jekspluatacionnyh nagruzok na ramy teplovozov : metody, modeli, specializirovannaja SAPR// Visnik NTU „HPI”. Tem. vip. „Mashinovedenie i SAPR”. – 2006. – No.24. – S.103-112. 10. Vasileva T. A. Sovershenstvovanie metodov rascheta jelementov mashin s dlitelnyim srokom raboty pri dejstvii mnogokomponentnoj nagruzki // Visnik NTU „HPI”. Tem. vip. „Mashinovedenie i SAPR”. – 2006. – No.22. –S.27-32. 11. Orlov E. A. Parametricheskij podhod k modelirovaniju dinamiki zheleznodorozhnyh jekipazhej // VisnikNTU „HPI”. Tem. vip. „Mashinovedenie i SAPR”.–2007.– No.33.– S.77-87. 12. Ovechnikov N. N. i dr. Raschet nesushhego kuzova teplovoza kak sterzhnevoj sistemy s ispolzovaniem JeCVM // Tr. VNITI.– Vyp..129. –1968. – S.3-39.

Надійшла (received) 01.02.2014