

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.46.02

О. В. ФОМІН¹, А. А. СТЕЦЬКО^{2*}, В. Є. ОСЬМАК³

¹Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@list.ru, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (063) 243 97 47, ел. пошта stetsko.anton@mail.ru, ORCID 0000-0002-9232-2968

³Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 220 27 56, ел. пошта vic5@ukr.net, ORCID 0000-0003-2459-554X

РОЗПОДІЛЕНЕ ЗОВНІШНЄ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ВАГОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ НАВИВАННЯ

Мета. Робота передбачає висвітлення особливостей та результатів проведеного авторами дослідження з визначення можливості та доцільності створення попередньо напружено-деформованого стану вантажних вагонів методом навивання з метою поліпшення їх міцнісних характеристик. Також необхідним є представлення теоретичного обґрунтування ефективності застосування даного методу для вагонних конструкцій та відповідного прикладу для вагона-цистерни. **Методика.** Проведене дослідження базується на результатах аналізу відомих робіт із теми, математичному обґрунтуванні та комп'ютерному моделюванні. При розрахунках складових рухомого складу використані сучасні загальноприйняті методики. **Результати.** Авторами з'ясовано, що метод навивання для створення попередньо напружено-деформованого стану є ефективним та доцільним для застосування в конструкціях рухомого складу залізниць та, зокрема, у вантажних вагонах. Конструкції вантажних вагонів із попередньо напружено-деформованим станом характеризуються рядом міцнісних переваг, серед яких можна виділити покращення роботи зі сприйняття експлуатаційних навантажень та збереження ресурсу. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано удосконалення несучої здатності конструкцій вантажних вагонів шляхом створення її складових у спрямованому напружено-деформованому стані. Також вперше запропоновано застосування розподіленого зовнішнього поверхневого зміцнення методом навивання для створення попередньо напружено-деформованого стану конструктивних елементів вантажних вагонів. Розглянуто способи навивання для конструкцій вантажних вагонів та їх впровадження. **Практична значимість.** В результаті проведених досліджень розроблено ряд технічних рішень із удосконалення конструкцій вантажних вагонів та контейнера-цистерни, що було запатентовано. В статті частково наведено відповідні рішення для вагона-цистерни. Практичне впровадження таких рішень дозволить суттєво поліпшити техніко-економічні та експлуатаційні показники вагонних конструкцій.

Ключові слова: залізничний транспорт; вантажний вагон; спрямований напружено-деформований стан; несучі системи; навивання; контейнер-цистерна

Вступ

Вітчизняний залізничний транспорт відіграє виключну роль у національній економіці, є основою виробничих зв'язків між окремими регіонами та країнами. Це визначає особливі вимоги [10–12] до сучасного рухомого складу, най-

більш чисельна та вагома частка якого належить вантажним вагонам.

Головним несучим елементом вантажних вагонів є рама [5, 7, 9, 13], як основні складові елементи якої можна виділити: хребтову, проміжні та поздовжні, шворневі, лобові (кінцеві) балки. Результати аналізу перспективних для

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вагонобудування профілів [5, 11] та досвіду інших галузей машинобудування [5, 10] вказали на доцільність розгляду питання впровадження труб круглого перерізу як несучих складових вагонів.

У роботі [12] наведені результати та особливості виконаних досліджень з впровадження труб круглого перерізу як складових елементів кузовів вантажних вагонів, які підтвердили правильність та перспективність такого напрямку.

Проблемами поліпшення несучих конструкцій вагонів займалося багато наукових шкіл та вчених (Лазарян В. А., Бубнов В. М., Манашкін Л. А., Блохін Є. П., Данович В. Д., Савчук О. М., Богомаз Г. І., Науменко Н. Ю., Філіпов В. М., Горобець В. Л., Пшінько О. М., Барбас Й. Г. та інші).

Водночас одним з ефективних методів вдосконалення конструкції вантажних вагонів вважається створення попередніх напружень, що досягаються навиванням високоміцного дроту, скловолокна або стрічки на їх несучі елементи, що виконані з порожнистих замкнутих профілів [2]. При цьому в стінках (несучих елементах) створюються зусилля, зворотні за знаком до робочих. У цьому випадку спостерігається перерозподіл напружень, що можна корисно використати при проектуванні зниження товщини стінки і створенні більш міцної та з збільшеним ресурсом конструкції за рахунок вирівнювання кільцевих і поздовжніх напружень [3].

Спосіб створення попередніх напружень широко застосовується в апаратах високого тиску [1, 3, 4, 6]. Однак аналіз літератури свідчить, що науково-технічна проблема застосування попереднього напруження в несучі системи вантажних вагонів не обґрунтована та не досліджена.

Мета

Мета роботи полягає в дослідженні можливості та доцільності створення спрямованого попередньо напружено-деформованого стану елементів вантажних вагонів методом навивання з метою поліпшення їх міцнісних характеристик.

Методика

Навивання дроту посилює конструкцію, тим самим підвищуючи ефективність її використання за рахунок зниження собівартості виготовлення та експлуатації шляхом: зниження її

матеріалоемності, підвищення вантажопідйомності, ремонтпридатності та корозійної стійкості при виконанні умов міцності та експлуатаційної надійності.

Навивання обмотки на циліндричні оболонки найбільш ефективна у випадках, коли оболонка сприймає внутрішній надлишковий тиск. До того ж, при заданому робочому тиску за допомогою відповідного армування можна істотно знизити витрати металу. Як обмотка можуть застосовуватися високоміцний сталевий дріт або стрічка, а також склонитки, що навиваються в один або кілька шарів. Внутрішню оболонку можна виготовляти з листів сталі, алюмінієвих або титанових сплавів.

Основна ідея такої конструкції – за допомогою високоміцної попередньо розтягнутої обмотки перерозподілити зусилля в конструкції таким чином, щоб розвантажити внутрішній шар (зробити його більш тонким) із менш міцного матеріалу і в разі використання алюмінієвих або титанових сплавів – більш дорогого матеріалу.

Навивати дріт або стрічку можна або в кільцевому напрямку, або по спіралі під кутом до повздовжньої осі оболонки. При навиванні напруженої арматури по спіралі зменшуються не тільки кільцеві, й повздовжні навантаження у внутрішній оболонці від розрахункових навантажень. Цей спосіб доречний для котлів вагонів-цистерн та контейнерів-цистерн, в яких одночасно можуть бути перенапружені і сферичні днища [2, 8], а також перспективних несучих систем вантажних конструкцій із порожнистих замкнутих профілів. Внутрішня оболонка може слугувати основою для навивання і мати мінімальну товщину, що визначається умовою забезпечення стійкості її при навиванні першого шару і корозійною стійкістю матеріалу в разі агресивності робочого середовища. Товщина обмотки при цьому вийде достатньо великою.

Технологічно найбільш простий спосіб кільцевого навивання, коли витки вкладаються щільно один до одного або розташовуються з деяким кроком. Але тоді зменшуються тільки кільцеві навантаження по внутрішній оболонці. Оскільки в циліндричному резервуарі при внутрішньому тиску кільцеві напруження в 2 рази більші, ніж повздовжні, то за допомогою кільцевої обмотки можна отримати рівномірну

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в обох напрямках конструкцію. В цьому випадку мінімальна товщина оболонки визначається її міцністю в поздовжньому напрямку, оскільки обмотка в цьому напрямку не працює. Необхідна товщина обмотки виходить значно менше, ніж товщина оболонки. Із зазначеного можна зробити висновок, що кільцевим навиванням можна зменшити вагу внутрішньої оболонки в 2 рази (не враховуючи вагу обмотки). Більшого ефекту можна досягти, якщо оболонка буде виконана з матеріалу з меншим модулем пружності, ніж обмотка.

Роботу циліндричної оболонки з навиванням, як і роботу будь-якої попередньо-напруженої конструкції, можна розділити на два етапи. Перший визначається початковими напруженнями, що з'являються в оболонці після навивання на неї обмотки з попереднім напруженням. Другий етап характеризується роботою попередньо-напруженого резервуара на внутрішній тиск.

Розрахунок такої конструкції полягає у відповідному підборі фізико-механічних характеристик матеріалів обох шарів і їх товщини, а також вибору величини попереднього напруження (і, у разі потреби, кута намотування), щоб при досягненні робочого тиску у всіх елементах конструкції був забезпечений заданий запас міцності при мінімальній вартості конструкції [2].

Розглянемо напружений стан циліндричної оболонки з обмоткою, що піддається дії внутрішнього тиску p на бічну поверхню і поздовжньої сили N_x (рис. 1) (для замкнутого резервуара вона визначається тиском на днище). Товщина оболонки постійна по довжині. Обмотка рівномірно розподілена вздовж твірної. Розрахункова товщина її визначається площею поперечного перерізу витків, що приходяться на одиницю довжини оболонки (або кількості матеріалу на 1 см^2 поверхні оболонки при косій навивці). Передбачається, що товщина оболонки і обмотки малі порівняно з радіусом, тому конструкцію можна вважати тонкостінною [2, 8].

Вводимо такі позначення: r – радіус оболонки; δ_1 – товщина оболонки; δ_2 – товщина обмотки, рівна $\delta_2 = f/t$, де f – площа поперечного перерізу витка; t – крок витків; E_1, μ – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки; E_2 – модуль пружності матеріалу обмотки.

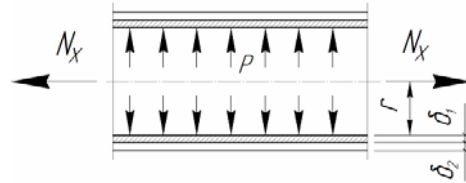


Рис. 1. Розрахункова схема циліндричної оболонки з обмоткою

Fig. 1. Diagram of cylindrical shell with winding

Якщо на оболонку навивати дріт з заданим (контрольованим) напруженням σ_k , то після навивання напруження в ній виявиться меншим внаслідок пружної деформації оболонки. Напруження в конструкції внутрішньо урівноважені – це зусилля, що приходиться на одиницю довжини оболонки, рівні і протилежні за знаком відповідному зусиллю в обмотці. Передбачається, що під дією обмотки в оболонці виникають тільки пружні деформації.

Виріжемо двома кільцевими і двома поздовжніми перерізами одиничний елемент оболонки і позначимо зусилля, що діють в ньому в загальному випадку після навивання так, як показано на рис. 2.

При кільцевому навиванні можна записати

$$N_{01} - N_{02} = 0$$

або

$$\sigma_{01}\delta_1 - \sigma_{02}\delta_2 = 0,$$

де N_{01} і N_{02} – кільцеві зусилля в оболонці і обмотці; σ_{01} – кільцеве напруження в оболонці; σ_{02} – напруження в обмотці.

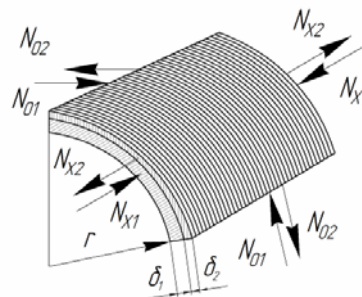


Рис. 2. Одиничний елемент, вирізаний із циліндричної оболонки з обмоткою

Fig. 2. A single element cut from cylindrical shell with winding

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В загальному випадку спірального навивання обмотки в оболонці з'являються початкові зусилля в кільцевому і повздовжньому напрямках:

$$\left. \begin{aligned} N_{01} - N_{02} &= 0 \\ N_{x1} - N_{x2} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

При одношаровому навиванні напруження в оболонці досягають заданого значення попереднього навантаження σ_{01} , якщо напруження в шарі обмотки відповідно до (1) буде дорівнювати:

$$\sigma_{02_1} = \sigma_{01} \frac{\delta_1}{\delta_{21}}, \quad (1)$$

де σ_{01} – напруження в оболонці при навиванні першого шару обмотки; σ_{02_1} і δ_{21} – напруження і товщина навитого шару обмотки.

Розглянемо процес навивання одного шару ($i = 1$). Складемо рівняння, в якому потенціальна енергія деформації попередньо розтягнутої обмотки до її навивання прирівнюється до потенціальної енергії металевої оболонки першого шару після навивання:

$$\frac{[\sigma_{02_1}]^2}{2E_2} \delta_2 = \frac{\sigma_{02_1}^2}{2E_2} \delta_2 + \frac{\sigma_{01}^2}{2E_1} \delta_1.$$

Виражаючи величину σ_{01} через σ_{02_1} за рівнянням рівноваги (1), отримаємо формулу для визначення напружень в навитому шарі дроту залежно від створюваного (контрольованого) напруження $[\sigma_{02_1}]$:

$$\sigma_{01} = \frac{[\sigma_{02_1}]}{\sqrt{1 + \frac{E_2 \delta_2}{E_1 \delta_1}}} = \frac{[\sigma_{02_1}]}{\sqrt{1 + \lambda}},$$

де $1/\sqrt{1 + \lambda}$ – коефіцієнт ослаблення напружень в дроті, що показує величину втрат попереднього напруження від пружного обтиску оболонки. Він залежить від співвідношення жорсткості оболонки і обмотки.

При дії внутрішнього тиску оболонка і обмотка в кільцевому напрямку працюють разом. В оболонці попереднє напруження (стиск) поступово зменшується до нуля, а потім з'являється

розтяг. В обмотці напруження від внутрішнього тиску додаються до початкових розтягуючих. Повздовжні зусилля при кільцевому навиванні сприймаються тільки оболонкою.

Вважаючи, що оболонка попередньо-напружена кільцевою обмоткою навантажена рівномірним внутрішнім тиском p на бічній поверхні і повздовжньою розтягуючою силою N_x (рис. 1), то отримаємо рівняння рівноваги системи в кільцевому і повздовжньому напрямках:

$$\sigma_1 \delta_1 + \sigma_2 \delta_2 = pr; \quad (2)$$

$$\sigma_x \delta_1 = \frac{N_x}{2\pi r}, \quad (3)$$

де σ_1 і σ_x – кільцеве і повздовжнє напруження в оболонці; σ_2 – кільцеве напруження в обмотці.

Характер зміни кільцевих напружень в оболонці і обмотці зі збільшенням тиску p наведений на рис. 3 [2].

Через те, що при дії внутрішнього тиску оболонка і обмотка деформуються разом і деформації їх пружні, маємо умову рівності кільцевих деформації обох шарів:

$$\left[(\sigma_1 - \mu \sigma_x) - \sigma_{01} \right] \frac{1}{E_1} = (\sigma_2 - \sigma_{02}) \frac{1}{E_2}, \quad (4)$$

(величини напружень беруться зі своїми знаками).

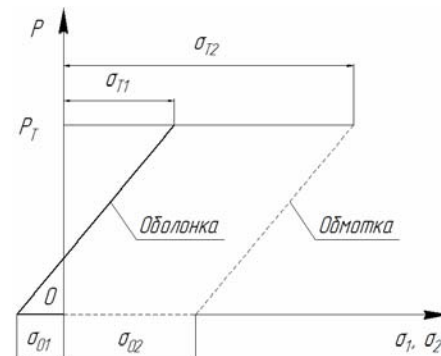


Рис. 3. Діаграма роботи попередньо-навантаженої оболонки під внутрішнім тиском в пружній стадії

Fig. 3. Diagram of the pre-loaded shell under internal pressure in the elastic stage

До цих рівнянь потрібно додати рівняння рівноваги оболонки в кільцевому напрямку в стадії попереднього напруження

$$\sigma_{01} \delta_1 + \sigma_{02} \delta_2 = 0. \quad (5)$$

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В результаті сумісного розв'язання рівнянь (2)–(5) можна визначити невідомі значення кільцевих напружень в оболонці і обмотці:

$$\sigma_1 = \frac{pr + \mu \frac{N_x}{2\pi r} m \frac{\delta_2}{\delta_1}}{\delta_1 + m\delta_2} - \sigma_{02} \frac{\delta_2}{\delta_1}, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{mpr - \mu \frac{N_x}{2\pi r} m}{\delta_1 + m\delta_2} + \sigma_{02}, \quad (7)$$

де $m = E_2/E_1$.

Для замкнутого резервуара $N_x = p\pi r^2$ формули (6) і (7) матимуть вигляд:

$$\sigma_1 = \frac{pr \left(1 + \frac{\mu}{2} m \frac{\delta_2}{\delta_1}\right)}{\delta_1 + m\delta_2} - \sigma_{02} \frac{\delta_2}{\delta_1}; \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{mpr \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}{\delta_1 + m\delta_2} + \sigma_{02}. \quad (9)$$

Як видно з наведених формул, розподілення навантажень в шарах резервуара і його міцність залежать від багатьох факторів: співвідношення товщин оболонки і обмотки, модулів пружності матеріалів m , які використовуються, попереднього навантаження (а також кута нахилу витків до осі резервуара при спіральній обмотці). Виходячи з цього, можна спроектувати резервуар таким чином, що при заданих навантаженнях кільцеві і повздожні напруження в оболонці будуть однакові. Це досягається створенням необхідного попереднього напруження. Значення його може бути отримане з формули (8) враховуючи (6) і (8) за умови $\sigma_1 = \sigma_x$:

$$\frac{\sigma_{01} = \delta_1 - m\delta_2(1 - \mu)}{\sigma_1 \delta_1 + m\delta_2}. \quad (9)$$

Якщо попереднє напруження перевищує величину (9), то при заданому внутрішньому тиску оболонка виявиться більш напруженою в повздожньому напрямку, ніж в кільцевому.

Таким чином, тільки за допомогою попереднього напруження можна зробити циліндричний резервуар рівномірним і подолати важли-

вий недолік всіх циліндричних оболонок, у яких при внутрішньому тиску кільцеві напруження в 2 рази більше, ніж у повздожніх.

Робота конструкції вважається пружною до моменту появи пластичних деформації в оболонці. При цьому обмотка продовжує працювати пружно, оскільки вона, як правило, виконується з більш міцного матеріалу. Якщо в формулі (8) прийняти кільцеві напруження в оболонці рівними межі текучості матеріалу σ_T , то можна отримати значення внутрішнього тиску, що відповідає кінцю пружної роботи оболонки:

$$p_T = \frac{\sigma_{T1} + \sigma_{01}}{r} \frac{\delta_1 + m\delta_2}{1 + \frac{\mu}{2} m \frac{\delta_2}{\delta_1}}.$$

В розрахунках попередньо-напружених конструкцій методом граничних станів напружень в усіх елементах при розрахункових навантаженнях не повинні перевищувати розрахункових опорів матеріалів, що використовуються (у разі потреби з врахуванням коефіцієнтів умов роботи). Розрахункові опори листового прокату, з якого виготовляють оболонки, наведені у відповідних ГОСТах. За розрахунковий опір розтягненню високоміцного сталюого дроту відповідно до СНиП II-V.3-72 приймають значення тимчасового опору розриву дроту, що встановлене ГОСТами, розділене на коефіцієнт безпеки по матеріалу 1,6. Позначаємо їх відповідно R_1 і R_2 .

На основі вищенаведеного з виразів (2)–(5) можна отримати формули для визначення потрібних товщин оболонки і обмотки при заданому внутрішньому тиску:

$$\delta_1 = \frac{pr}{R_1} \frac{k - m \left(\frac{\sigma_{01}}{R_1} + 1 \right) + \mu m \frac{\sigma_x}{R_1}}{\left(k - m \right) \left(\frac{\sigma_{01}}{R_1} + 1 \right) + \mu m \frac{\sigma_x}{R_1}}; \quad (10)$$

$$\delta_2 = \frac{pr}{R_1} \frac{\frac{\sigma_{01}}{R_1}}{\left(k - m \right) \left(\frac{\sigma_{01}}{R_1} + 1 \right) + \mu m \frac{\sigma_x}{R_1}}, \quad (11)$$

де $k = R_2 / R_1$.

Ці формули дають залежність товщин від

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

попереднього напруження. Величину його назначають виходячи з конкретних умов з врахуванням потреб забезпечення стійкості оболонки під час навивання. Якщо необхідно отримати однакову міцність в кільцевому і повздожньому напрямках резервуара, тобто найбільш економічну, то попереднє напруження із (10) і (11) в припущенні $\sigma_x = R_1$ дорівнює:

$$\frac{\sigma_{01}}{R_1} = \frac{k - m(1 - \mu)}{k + m},$$

і залежить від співвідношення фізико-механічних властивостей матеріалів оболонки і обмотки.

Результати

Ефективність впровадження зазначеного вище математичного апарату було використано та попередньо перевірено для наведених на рис. 4 конструктивних складових рухомого складу. При цьому застосовувались сучасні загальноприйняті методи та інженерне програмне забезпечення. Попередньо з'ясовано, що застосування запропонованого методу попередньо напружено-деформованого стану дозволить покращити динамічні та статичні міцнісні якості конструкцій в середньому на 15 %.

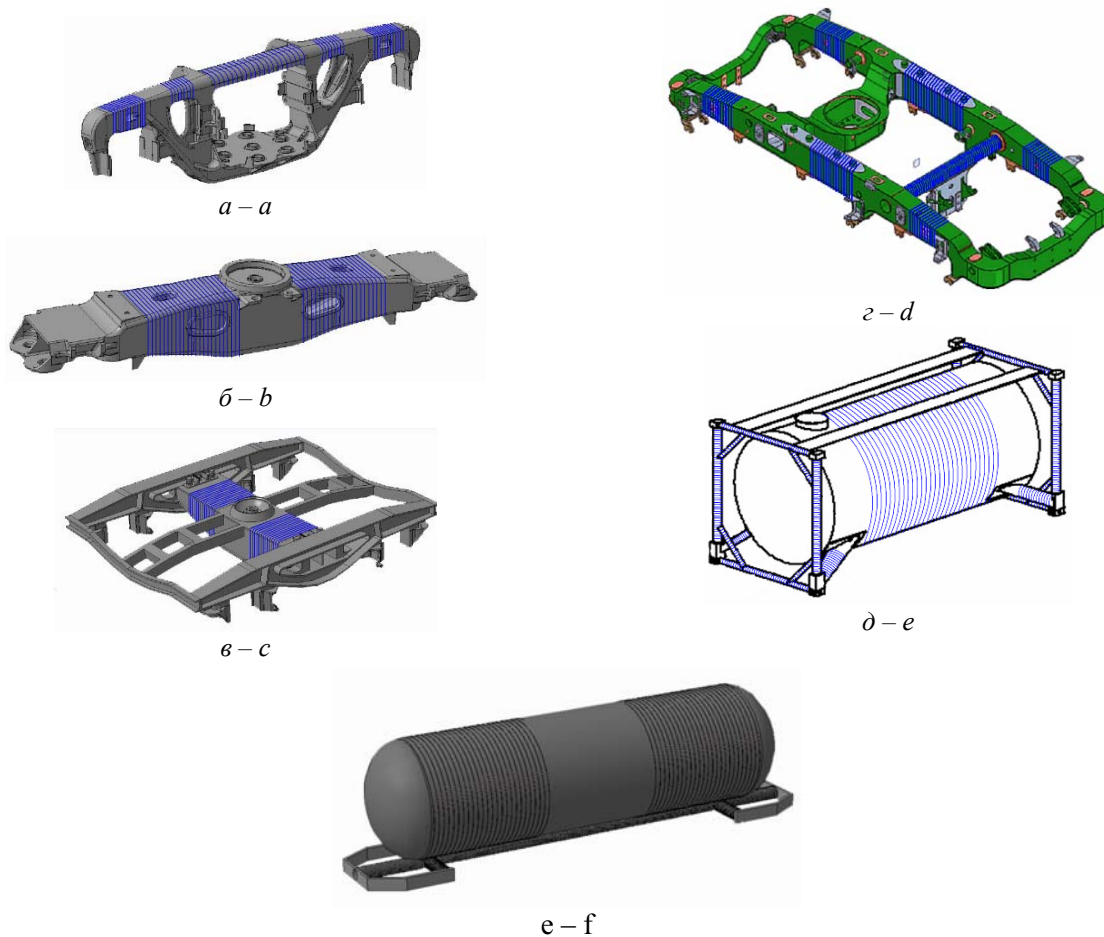


Рис. 4. Схематичне відображення потенційних місць застосування на модулях ходових частин та кузова розподіленого зовнішнього поверхневого зміцнення методом навивання:

a, b – бокова та надресорна балки візка моделі 18-100;

c – рама європейського візка моделі Y25; *d* – рама тепловоза 2ТЭ70; *e* – вагон-цистерна

Fig. 4. Schematic representation of potential locations for application of distributed external surface hardening by winding on modules of undercarriage and body:

a, b – lateral and bolster beams of a bogie, model 18-100; *c* – frame of a European bogie, model Y25;

d – frame of a locomotive 2TE70; *e* – tank-container; *f* – tank-car

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

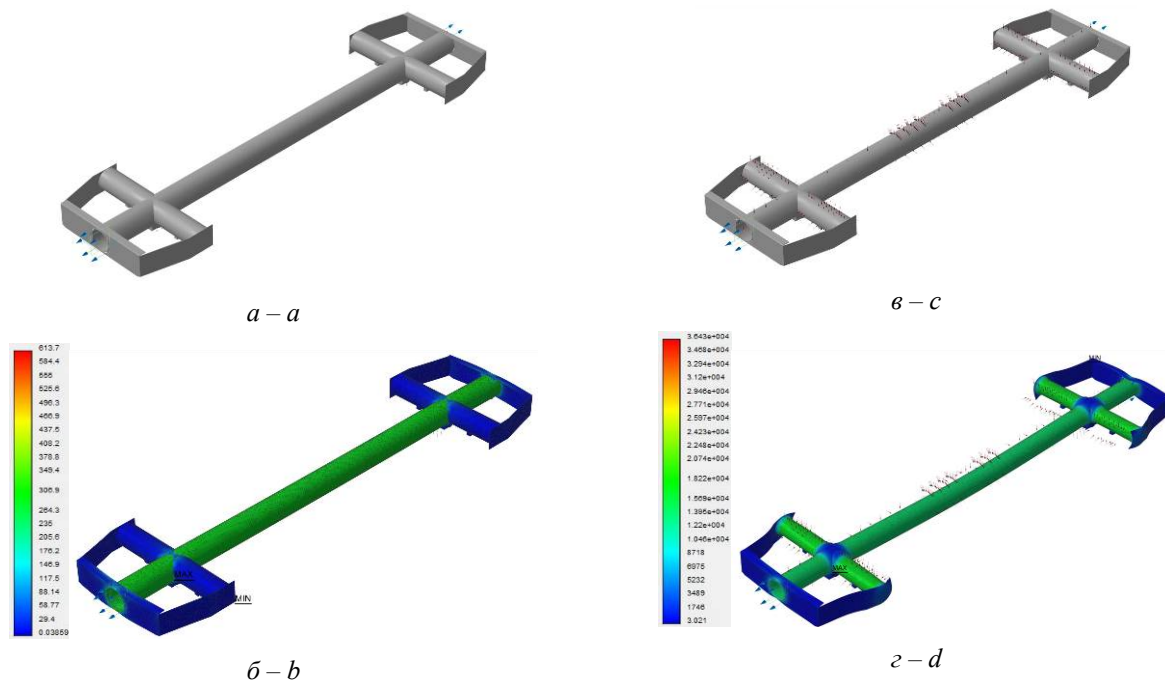


Рис. 5. Дослідження напружено-деформованого стану рами вагона-цистерни:

a – прикладення зусиль до рами без навивання; *b* – напружений стан рами без навивання; *c* – прикладення зусиль до рами з навиванням; *d* – напружений стан рами з навиванням

Fig. 5. Study of stress-strain state of a tank-car frame:

a – application of efforts to a frame without winding; *b* – stress state of a frame without winding; *c* – application of efforts to the frame with winding; *d* – stress state of a frame with winding

Більш поглиблено авторами було виконано аналіз ефективності впровадження попередньо напружено-деформованого стану зокрема до рами вагона-цистерни. Були виконані комплексні дослідження напружено-деформованого стану рами вагона-цистерни в сучасному програмному комплексі (рис. 5). При цьому моделювались різні експлуатаційні випадки роботи рами, і відповідно, схеми прикладення навантажень.

Попередній розрахунок вказав на можливість отримати такі позитивні результати: тару вагона знизити на 20 %; вантажопідйомність підвищити на 20 %; тріщиностійкість покращити на 30 %; вартість виготовлення та експлуатації знизити на 5 %.

Отримані результати оцінювання впровадження спрямованого напружено-деформованого стану для вагонних конструкцій не суперечать раніше відомим (в тому числі [8]) для металоконструкцій.

На сьогодні виконуються авторами роботи з експериментального підтвердження отриманих теоретичних результатів.

Наукова новизна та практична значимість

Досліджено можливість удосконалення несучої здатності конструкцій рухомого складу шляхом створення її складових в спрямованому напружено-деформованому стані. Запропоновано застосування методу навивання для попередньо напружено-деформованого стану вантажних вагонів. Систематизовано особливості навивання для конструкцій рухомого складу і їх впровадження.

Розроблено низку технічних рішень з удосконалення конструкцій вантажних вагонів, зокрема контейнера-цистерни, що було запатентовано. Практичне впровадження таких рішень дозволить суттєво поліпшити її техніко-економічні та експлуатаційні показники.

Висновки

В результаті виконаного дослідження підтверджено запропоновану авторами гіпотезу з ефективності створення спрямованого напружено-деформованого стану вагонних кон-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

струкцій методом навивання. Так застосування такого підходу дозволить покращити динамічні та статичні міцнісні якості вагонних складових в середньому на 15 %.

При впровадженні спрямованого напружено-деформованого стану до складових вантажних вагонів доцільно використовувати наведені в роботі математичні описання. Запропонований метод також доцільно використовувати як дієвий засіб подовження ресурсу вагонних конструкцій та інших відповідальних складових рухомого складу. Зазначене забезпечується суттєвою позитивною боротьбою з втомою їх складових.

В подальшому плануються більш детальні розрахунки з врахуванням технології виготовлення та розрахунок ресурсу. В цій роботі наведені по-

передні результати економічної ефективності, які в подальшому плануються більш детально та ґрунтовно визначити в тому числі з визначенням показників ресурсу.

Також в подальшому необхідно отримати результати теоретичного дослідження та комп'ютерного математичного моделювання підтвердити експериментальними натурними випробуваннями.

Наведений метод покращення техніко-економічних та експлуатаційних показників вагонних конструкцій за рахунок поліпшення їх динамічної та статичної міцності також доцільно використовувати при вирішенні аналогічних завдань для інших засобів транспортного машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айнабеков, А. И. Работа надземных предварительно напряженных трубопроводов при эксплуатационных нагрузках / А. И. Айнабеков, Б. Р. Арапов, У. С. Сулейменов // Наука и образование Южного Казахстана. – 2003. – № 35. – С. 12–14.
2. Беленя, Е. И. Предварительно-напряженные металлические листовые конструкции / Е. И. Беленя, С. М. Астряб, Э. Б. Рамазанов. – Москва : Стройиздат, 1979. – 192 с.
3. Беленя, Е. И. Предварительно-напряженные несущие металлические конструкции / Е. И. Беленя. – Москва : Стройиздат, 1975. – 416 с.
4. Воеводин, А. А. Предварительно напряженные системы элементов конструкций / А. А. Воеводин. – Москва : Стройиздат, 1989. – 298 с.
5. Дослідження міцності контейнера-цистерни удосконаленої конструкції в умовах експлуатації / А. О. Ловська, О. В. Фомін, А. М. О कोरोков, О. М. Мельничук // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 180–188. doi: 10.15802/stp2015/42177.
6. Перспективы применения предварительного напряжения в металлических конструкциях нефтеперерабатывающей промышленности / У. С. Сулейменов, А. Б. Молдагалиев, Н. Ж. Жанабай, М. К. Укибаев // Наука и образование Южного Казахстана. – 2005. – № 3. – С. 51–53.
7. Тартаковський, Е. Д. Удосконалення процесу керування локомотивом шляхом використання систем підтримки прийняття рішень / Е. Д. Тартаковський, О. М. Горобченко, А. О. Антонович // Вост.-Европ. журн. передових технологій. – 2016. – Т. 5, № 3 (83). – С. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198.
8. Экспериментальный анализ колебаний предварительно напряженных магистральных трубопроводов / А. И. Айнабеков, У. С. Сулейменов, К. В. Аврамов [и др.] // Проблемы машиностроения. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 21–27.
9. Analysis of syngas formation and ecological efficiency for the system of treating biomass waste and other solid fuels with CO2 recuperation based on integrated gasification combined cycle with diesel engine / A. Y. Pilatau, H. A. Viarshyna, A. V. Gorbunov [et al.] // J. of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2014. – Vol. 36. – Iss. 4. – P. 673–679. doi: 10.1007/s40430-014-0166-7.
10. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin, L. P. Lingaitis, S. Dailydka [et al.] // Transport. – 2015. – Vol. 30. – Iss. 1. – P. 88–92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
11. Fomin, O. V. Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages / O. V. Fomin // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 3. – Р. 68–76.
12. Fomin, O. V. Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars / O. V. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No. 5. – P. 31–43.
13. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises / S. V. Panchenko, T. V. Butko, A. V. Prokhorchenko, L. O. Parkhomenko // Науковий вісник НГУ. – 2016. – № 2. – Р. 93–99.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. В. ФОМИН¹, А. А. СТЕЦКО^{2*}, В. Е. ОСЬМАК³

¹Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (067) 813 97 88, эл. почта fomin1985@list.ru, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (063) 243 97 47, эл. почта stetsko.anton@mail.ru, ORCID 0000-0002-9232-2968

³Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. И. Огиенко, 19, Киев, Украина, 03049, тел. +38 (067) 220 27 56, эл. почта vic5@ukr.net, ORCID 0000-0003-2459-554X

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ВНЕШНЕЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВАГОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ НАВИВКИ

Цель. Работа предполагает освещение особенностей и результатов проведенного авторами исследования по определению возможности и целесообразности создания предварительного напряженно-деформированного состояния грузовых вагонов методом навивки с целью улучшения их прочностных характеристик. Также необходимо представление теоретического обоснования эффективности применения данного метода для вагонных конструкций и соответствующего примера для вагона-цистерны. **Методика.** Проведенное исследование базируется на результатах анализа известных работ по теме, математическом обосновании и компьютерном моделировании. При расчетах составляющих подвижного состава использованы современные общепринятые методики. **Результаты.** Авторами установлено, что метод навивки для создания предварительно напряженно-деформированного состояния является эффективным и целесообразным для применения в конструкциях подвижного состава железных дорог и, в частности, грузовых вагонов. Конструкции грузовых вагонов с предварительным напряженно-деформированным состоянием характеризуются рядом прочностных преимуществ, среди которых можно выделить улучшение работы по восприятию эксплуатационных нагрузок и сохранение ресурса. **Научная новизна.** Впервые предложено усовершенствование несущей способности конструкций грузовых вагонов путем создания ее составляющих в направленном напряженно-деформированном состоянии. Также впервые предложено применение распределенного внешнего поверхностного упрочнения методом навивки для создания предварительно напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов грузовых вагонов. Рассмотрены способы навивки для конструкций грузовых вагонов и их внедрения. **Практическая значимость.** В результате проведенных исследований разработан ряд технических решений по совершенствованию конструкций грузовых вагонов и контейнера-цистерны, что было запатентовано. В статье частично приведены соответствующие решения для вагона-цистерны. Практическое внедрение таких решений позволит существенно улучшить технико-экономические и эксплуатационные показатели вагонных конструкций.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; грузовой вагон; направленное напряженно-деформированное состояние; несущие системы; навивка; контейнер-цистерна

O. V. FOMIN¹, A. A. STETSKO^{2*}, V. Y. OSMACK³

¹Dep. «Cars and Carriages Economy», State Economic and Technological University of Transport, Ohiienko I. St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@list.ru, ORCID 0000-0003-2387-9946

^{2*}Dep. «Cars and Carriages Economy», State Economic and Technological University of Transport, Ohiienko I. St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (063) 243 97 47, e-mail stetsko.anton@mail.ru, ORCID 0000-0002-9232-2968

³Dep. «Cars and Carriages Economy», State Economic and Technological University of Transport, Ohiienko I. St., 19, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 220 27 56, e-mail vic5@ukr.net, ORCID 0000-0003-2459-554X

DISTRIBUTED EXTERNAL SURFACE HARDENING OF CAR DESIGN BY WINDING

Purpose. The paper involves coverage of features and results of the research conducted by the authors to determine the feasibility and establishment of pre-stressed-strained state of freight cars by winding in order to improve their strength characteristics. It is also necessary to present the theoretical justification for the effectiveness of the application of this method for car designs and an appropriate example for the tank-car. **Methodology.** The conducted study is based on an

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

analysis of known works on the subject, mathematical justification and computer modeling. At the calculations of rolling stock components contemporary conventional techniques were used. **Findings.** Authors found that the winding method for pre-stressed-strained state is effective and appropriate for use in the construction of railway rolling stock and, in particular freight cars. Freight car designs with the pre-stressed-strained state are characterized by a number of strength advantages, among which there is an improvement of the work on the perception of operational loads and resource conservation. **Originality.** For the first time it is proposed the improvement of bearing capacity of freight car constructions through the creation of its component in the directed stress-strained state. It is also for the first time proposed the use of distributed external surface hardening by the method of winding to create a pre-stress-strained state of structural components of freight cars. The methods for winding designs of freight cars and their implementation were considered. **Practical value.** The studies developed a number of technical solutions for improving the design of freight cars and tank-container, which has been patented. Corresponding solutions for the tank-car are partially presented. Practical implementation of such solutions will significantly improve the technical, economic and operational performances of car designs.

Keywords: railway transport; freight car; directed stress-strained state; bearing system; winding; tank-container

REFERENCES

1. Aynabekov, A. I., Arapov, B. R., & Suleymenov, U. S. (2003). Rabota nadzemnykh predvaritelno napryazhennykh truboprovodov pri ekspluatatsionnykh nagruzkakh. *Science and Education of South Kazakhstan*, 35, 12-14.
2. Belenya, Y. I., Astrayab, S. M., & Ramazanov, E. B. (1979). *Predvaritelno-napryazhennyye metallicheskiye listovyye konstruksii*. Moscow: Stroyizdat.
3. Belenya, Y. I. (1975). *Predvaritelno-napryazhennyye nesushchiye metallicheskiye konstruksii*. Moscow: Stroyizdat.
4. Voevodin, A. A. (1989). *Predvaritelno napryazhennyye sistemy elementov konstruksiy*. Moscow: Stroyizdat.
5. Lovska, A. O., Fomin, O. V., Okorokov, A. M., & Melnychuk, O. M. (2015). Research of a tank-container strength of improved construction using the computer simulation of operating conditions. *Science and Transport Progress*, 2(56), 180-188. doi: 10.15802/stp2015/42177
6. Suleymenov, U. S., Moldagaliev, A. B., Zhanabay, N. Z., & Ukibaev, M. K. (2005). Perspektivy primeneniya predvaritelno napryazheniya v metallicheskiykh konstruksiyakh neftepererabatyvayushchey promyshlennosti. *Science and Education of South Kazakhstan*, 3, 51-53.
7. Tartakovskiy, E., Gorobchenko, O., & Antonovych, A. (2016). Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 3(83), 4-11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198
8. Aynabekov, A. I., Suleymenov, U. S., Avramov, K. V., Moldagaliev, A. B., Kambarov, M. A., Serikbaev, T. T., & Abshenov, K. A. (2016). Experimental analysis of prestressed pipelines vibrations. *Problems of Mechanical Engineering*, 19(1), 21-27.
9. Pilatau, A. Y., Viarshyna, H. A., Gorbunov, A. V., Nozhenko, O. S., Maciel, H. S., Baranov, V. Y., & Matus, A. (2014). Analysis of syngas formation and ecological efficiency for the system of treating biomass waste and other solid fuels with CO₂ recuperation based on integrated gasification combined cycle with diesel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(4), 673-679. doi: 10.1007/s40430-014-0166-7
10. Myamlin, S., Lingaitis, L. P., Dailydka, S., Vaičiūnas, G., Bogdevičius, M., & Bureika, G. (2015). Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 30(1), 88-92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565
11. Fomin, O. V. (2015). Increase of the freight wagons ideality degree and prognostication of their evolution stages. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 68-76.
12. Fomin, O. V. (2014). Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars. *Metallurgical and Mining Industry*, 5, 31-43.
13. Panchenko, S. V., Butko, T. V., Prokhorchenko, A. V., & Parkhomenko, L. O. (2016). Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 93-99.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. П. Ткаченком (Україна); д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна)

Надійшла до редколегії: 12.12.2016

Прийнята до друку: 23.03.2017