

УДК 629.463.001.63

О. В. Фомін, д.т.н., доцент

(доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту)

М. І. Горбунов, д.т.н., професор

(завідувач кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені В. Даля)

А. А. Стецько

(старший викладач каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний економіко-технологічний університет транспорту)

В. В. Коваленко

(заступник директора з фінансових питань ТОВ «Нерудбудторг»)

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ В ЗАЛІЗНИЧНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

У статті висвітлено можливості та аналіз перспектив застосування попередньо напружених несучих конструкцій в залізничному машинобудуванні, зокрема в конструкціях вантажних вагонів. Систематизовано інформацію про застосування попередньо напружених конструкцій в різних засобах машинобудування, які обиралися за критерієм схожості з блочними та базовими конструктивними виконаннями об'єктів залізничного машинобудування. Проаналізовано теоретичні та практичні особливості сучасних виконань попередньо напружених конструкцій, а також специфічні питання їх використання.

Ключові слова: рухомий склад залізниць, несучі системи, попереднє напруження, вантажні вагони.

В статье освещены возможности и анализ перспектив применения предварительно напряженных несущих конструкций в железнодорожном машиностроении, в частности в конструкциях грузовых вагонов. Систематизирована информация о применении предварительно напряженных конструкций в различных средствах машиностроения, которые избирались по критерию схожести с блочными и базовыми конструктивными исполнениями объектов железнодорожного машиностроения. Проанализированы теоретические и практические особенности современных исполнений предварительно напряженных конструкций, а также специфические вопросы их использования.

Ключевые слова: подвижной состав железных дорог, несущие системы, предварительное напряжение, грузовые вагоны.

Постановка проблеми. Глибокі науково-технічні перетворення, що відбуваються в процесі глобалізації світової економіки, супроводжуються значними темпами зростання техносфери і, зокрема, інфраструктури транспортного комплексу, як її стратегічного елементу.

© Фомін О. В., Горбунов М. І., Стецько А. А., Коваленко В. В., 2016

За оцінками фахівців залізничний транспорт є провідною складовою транспортної техносфери України, показники функціонування якої входять до вагомих умов ефективної роботи всієї економіки держави.

Реалізація «Державної Цільової Програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки», затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1390, передбачає одним з першочергових своїх завдань створення техніко-технологічних передумов для підвищення ефективності роботи рухомого складу залізниць, що є обов'язковою складовою забезпечення необхідного рівня конкурентоспроможності залізничного транспорту України у світовій транспортній системі.

Серед технічних систем, які мають стратегічне значення і є критичною складовою інфраструктури залізничної галузі, важливе місце посідає рухомий склад залізниць. При цьому на сьогодні переважна більшість рухомого складу залізниць України (як і більшості інших країн СНД) припадає (за даними Головного інформаційно-обчислювального центру Укрзалізниці) на морально та фізично застарілий парк вантажних вагонів. Така ситуація свідчить про важливість спрямування науково-технічної політики держави саме на вирішення проблем покращення ефективності роботи та підвищення показників надійності вантажних вагонів. Сказане підтверджується основними завданнями, зазначеними у Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 р., яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. №1555-р. та Комплексній програмі оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 рр., яку затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2008 р. №1259. До того ж можна відзначити важливість розгляду таких питань і на світовому рівні, наприклад їх представленням серед основних напрямків програми Євросоюзу «Горизонт-2020».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із основних науково-технічних завдань, результати вирішення якого безпосередньо впливають на ефективність роботи вантажного вагонного парку, є розроблення нових чи модернізації вже існуючих моделей вантажних вагонів з метою зниження їх матеріалоемності [2]. При цьому перспективним методом зниження матеріалоемності (з відповідним підвищенням вантажопідйомності) вантажних вагонів є відшукання та реалізація конструктивних надлишкових запасів міцності [2], за рахунок надання їх складовим елементам оптимальних конструктивних форм та їх виконання із матеріалів з направленими властивостями при виконанні умов міцності та експлуатаційної надійності. Результати створення мультифункціональних конструкцій на основі реалізації такого методу доцільно оцінювати за допомогою коефіцієнта використання матеріалу. До того ж результати аналізу [1] впливу експлуатаційних факторів на конструкції несучих систем вантажних вагонів засвідчили, що одним з основних видів пошкоджень їх елементів є тріщини.

Як свідчить позитивний досвід інших галузей, пов'язаних з виготовленням металоконструкцій, одним з перспективних напрямів вирішення обох вище представлених науково-технічних завдань є використання у несучих системах машинобудування попередньо напружених конструкцій. Проте розгляд сучасного науково-технічного заділу [2] з профілю досліджуваних питань засвідчив відсутність змістовної інформації з розгляду такого завдання для вантажних вагонів. Тому дослідження, які спрямовані на розроблення методу створення попередньо напружених несучих конструкцій вантажних вагонів та їх елементів, вважаємо важливими та актуальними [3-7].

Мета статті – висвітлення можливостей та аналіз перспектив застосування попередньо напружених несучих конструкцій в залізничному машинобудуванні, зокрема в конструкціях вантажних вагонів. Основною метою розгляду та застосування такого підходу є збільшення строку життєвого циклу засобів рухомого складу залізниць, зменшення їх матеріалоемності та підвищення вантажопідйомності, покращення ре-

монтопридатності, підвищення тріщиностійкості, зменшення/повне виключення різнознакових напружень. Систематизовано інформацію про застосування попередньо напружених конструкцій в різних засобах машинобудування, які обиралися за принциповою схожістю з блочними та базовими конструктивними виконаннями об'єктів залізничного машинобудування. Проаналізовано теоретичні та практичні особливості сучасних виконань попередньо напружених конструкцій, а також специфічні питання їх використання.

Відповідно до діючої та перспективної нормативної документації при розрахунку всіх типів вагонів встановлюють два основних розрахункових режими: I та III [8].

За I розрахунковим режимом (рідке сполучення екстремальних навантажень) допустимі напруження обираються близькими до границі текучості матеріалу, що використовується, з урахуванням характеру дії навантаження і властивостей матеріалу (від 0,85 до 1,1 мінімальної межі текучості σ_T) з метою не допустити появи залишкових деформацій і руйнувань елементів та деталей вагона.

За III розрахунковим режимом (часте поєднання помірних експлуатаційних навантажень) допустимі напруження обираються, зважаючи на межі витривалості матеріалу на рівні від $0,5 \cdot \sigma_T$ до $0,65 \cdot \sigma_T$ з метою не допустити втомного руйнування вузла або деталі.

Загальні правила розрахунку несучої здатності вагонних конструкцій передбачають:

- розрахунок елементів кузова виконувати за допустимими напруженням і запасом стійкості;
- розрахунок окремих елементів рами виконувати за допустимими напруженням і запасом опору втомі.

Базовими параметрами при розрахунку і проектуванні вантажних вагонів усіх типів є:

1) допустимі напруження, величина яких з урахуванням коефіцієнтів запасу визначається межею текучості матеріалу (σ_T). Коефіцієнт запасу для металопрокату 0,9-0,95 залежно від умов експлуатації. Значення межі текучості, як і інших показників механічних властивостей матеріалу, вибираються з Додатка «Основные механические характеристики металлов, применяемых в вагоностроении» [8];

2) запас стійкості, величина якого, в тому числі, визначається межею текучості матеріалу (σ_T).

Виклад основного матеріалу дослідження. Під попереднім напруженням конструкцій розуміють різноманітні прийоми спрямованого штучного регулювання напружень (керування напружено-деформованим станом) в конструкціях для підвищення їх ефективності роботи по сприйняттю навантажень на етапах життєвого циклу. При цьому втручання в природну роботу об'єкта для спрямованої зміни його потенційної енергії деформації може відбуватися на різних етапах життєвого циклу: в процесі виготовлення, при монтажі, при експлуатації або реконструкції і на різних рівнях. Наприклад, для вантажних вагонів: в модулях, складових, вузлах або базових елементах [1, 7].

Критеріями ефективності застосування попереднього напруження в металоконструкціях можуть бути як економічні вимоги щодо зниження матеріалоемності і вартості об'єктів, так і конструктивно-технологічні (підвищення жорсткості, збереження форми елементів несучих конструкцій після впливу технологічно обумовлених факторів (наприклад, зварювання), поліпшення динамічних характеристик і т.д.). В цьому сенсі металоконструкції мають ширші можливості та більші перспективи застосування попереднього напруження, ніж залізобетонні і сталезалізобетонні, де цей прийом розвинувся, перш за все як засіб боротьби з малою міцністю бетону, при розтягуванні.

У всіх випадках на регулювання внутрішніх зусиль в конструкціях потрібні додаткові трудовитрати і залишається можливість втрати або перебудови наведеного фону

внутрішніх напружень в часі внаслідок розвитку тривалих процесів в матеріалах і зв'язках. Тому впровадження раціональних прийомів управління напружено-деформованим станом в практику створення сучасних залізничних машинобудівних конструкцій вимагає для кожної конструктивної форми розроблення відповідних теоретичних положень, методологічних основ та практичних засобів.

Цілі попереднього напруження в сталевих конструкціях [9]:

1) економія металу і засобів у споруджуваних конструкціях завдяки більш вигідному розподілу зовнішніх зусиль, збільшення області пружної роботи;

2) підвищення несучої здатності конструкцій, що знаходяться на етапі експлуатації або реконструкції в зв'язку з підвищенням навантажень;

3) зниження деформативності всієї конструкції або окремих її елементів, зменшення частоти або амплітуди коливань;

4) підвищення стійкості окремих елементів або всієї конструкції в цілому;

5) збільшення витривалості окремих елементів при циклічних навантаженнях за рахунок поліпшення характеристики циклу;

6) сприятлива зміна деяких властивостей конструкції (динамічних характеристик при динамічних і сейсмічних впливах, аеродинамічних характеристик при вітрових впливах, підвищення протидії температурним навантаженням (наприклад, морозостійкості);

7) забезпечення в деяких випадках зручності монтажу, і в зв'язку з цим зниження трудовитрат;

8) протидія виникненню негативних залишкових деформацій від технологічних факторів. Наприклад, в вантажному вагонобудуванні попередній прогин зафіксованої загальної конструкції при накладанні великих зварювальних швів: приварювання двотавра до зварених зет-подібних профілів балки хребтової напіввагонів, складальні конструкції об'язувань верхніх напіввагонів і т.д.

Ці ж цілі можуть бути досягнуті та іншими способами (збільшенням площі або зміною типу перерізу, способу з'єднання елементів і ін.), які є більш матеріально витратні. Попереднє напруження доцільне, якщо ефект, отриманий від нього, повністю окупить додаткові витрати [10]. Вибір остаточного варіанта конструкції повинен робитися на основі техніко-економічного аналізу.

Класифікація попередньо напружених конструкцій може здійснюватися за низкою ознак (рис. 1).

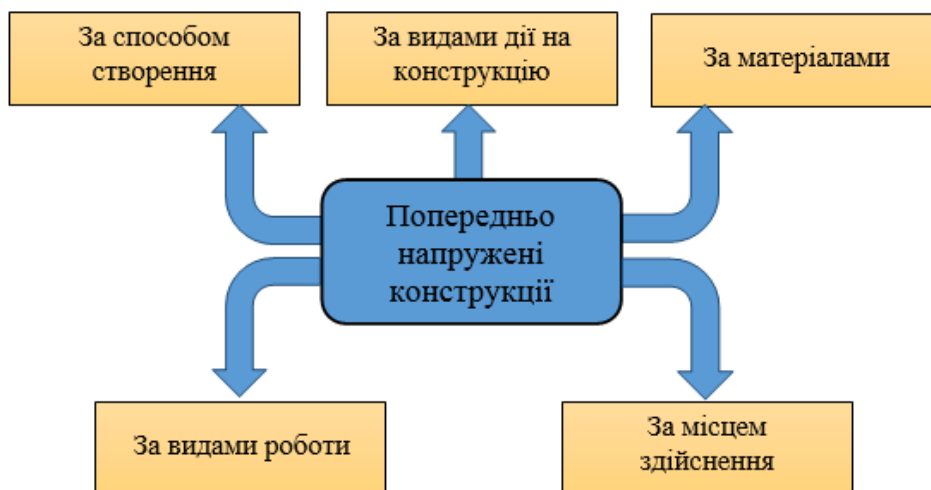


Рис. 1. Класифікація попередньо напружених конструкцій

Попередньо напружені конструкції можна розділити також на дві категорії – ті, що можуть працювати і без попереднього напруження, і ті, які не можуть існувати без нього, як статично незмінні об’єкти. Це, перш за все, деякі висячі системи, щогли на відтяжках і ін. У таких конструкціях гнучкі елементи не можуть сприймати стискаючі зусилля або утворюють механізми (і миттєво змінні системи), якщо вони попередньо не розтягнуті.

За способами створення попереднього напруження всі конструкції поділяються на дві великі групи: конструкції, у яких попереднє напруження здійснюється за допомогою різних високоміцних елементів – затяжок, шпренгелів, вант тощо., і конструкції, у яких попереднє напруження здійснюється іншими способами. Більш детальна класифікація способів створення попереднього напруження наведена на рис. 2.

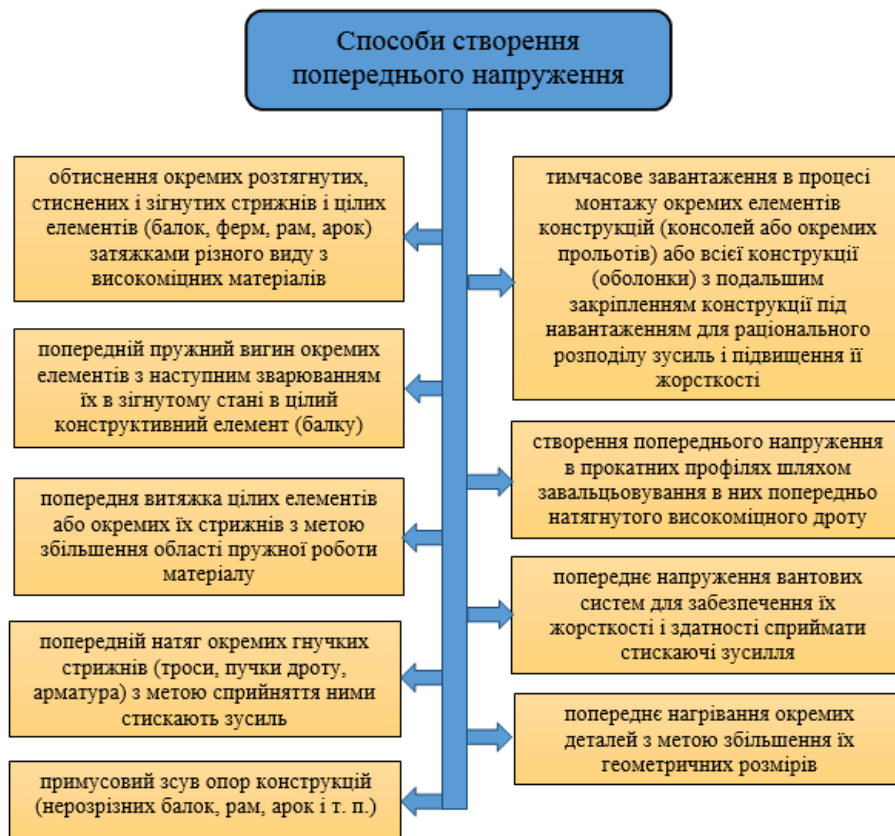


Рис. 2. Класифікація способів створення попереднього напруження

До групи конструкцій, що напружуються, за допомогою високоміцних елементів, належать:

- балки розрізні і нерозрізні з прямолінійними і ламаними попередньо напруженими затяжками і шпренгелями, як в межах висоти балки (рис. 3, а, б, в), так і поза балкою (рис. 3, г, д, е, ж);
- ферми з високоміцними попередньо напруженими елементами, що розташовуються в зоні розтягнутих поясів та інших стержнів;
- ферми з попередньо напруженими шпренгелями різного обрису, розташовані як в межах висоти, так і винесені за габарити ферми;
- покрівельні панелі, посилені шпренгельними системами;

- рами, арки, склепіння та інші системи з включенням попередньо напружених високоміцних елементів;
- балки жорсткості комбінованих систем з попередньо напруженими вантами;
- висячі двопоясні системи з натягом стабілізуючих тросів або однопоясні системи з натягом відтяжок;
- висячі системи з перехресних тросів з натягом стабілізуючих тросів;
- багатоповерхові будівлі з поверхами на попередньо напружених підвісках;
- багатоповерхові будівлі, посилені попередньо напруженими високоміцними елементами;
- щогли і опори на попередньо напружених відтяжках;
- щогли з шпренгелів;
- попередньо напружені сітчасті вежі;
- листові конструкції з навитим високоміцним попередньо напруженим дротом (або стрічками).

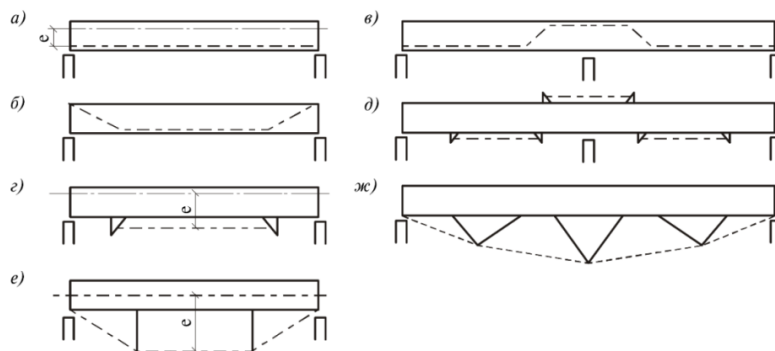


Рис. 3. Балки з попередньо напруженими зтяжками і шпренгелями

До групи конструкцій, в якій використовуються інші способи попереднього напруження, належать:

- балки з попередньо вигнутими елементами;
- балки з попередньо розтягнутими тонкими стінками або одним з поясів;
- колони з попередньо розтягнутими тонкими стінками;
- нерозрізні конструкції зі зміщенням рівня опор;
- рами і арки зі зміщенням опор в горизонтальному напрямку;
- просторові структурні плити зі зміщенням рівня опор;
- системи з введеними додатковими опорами або шарнірами;
- конструкції, замикає стягуванням або розклиненням суміжних перерізів елементів;
- нерозрізні, консольні, рамні та інші конструкції з частковими навантаженням або розвантаженням;
- ферми з попередньо вигнутими стержнями;
- панелі і оболонки з натягнутими тонкими листами.

За видами дії на конструкцію розрізняють такі випадки:

- внутрішнє попереднє напруження. Рівновага всередині системи, опорні реакції не змінюються (балки та інші конструкції з зтяжками шпренгелів; балки з попередньо вигнутими або розтягнутими елементами і т.п.);
- зовнішнє попереднє напруження. Рівновага внаслідок зміни реакцій (балки і інші системи зі зміною рівня опор, конструкції на відтяжках і т.п.);
- зміна статичної схеми в процесі регулювання напружень.

За матеріалами напружуючих елементів: металеві прокатні профілі, включаючи тонкі аркуші; гнучкі елементи (сталеві дротяні пучки і пасма, канати, стержнева арматура, смуги, а також стержні з склопластиків і інших спеціальних конструкційних матеріалів).

За видами роботи можливе: попереднє центральне та не центральне розтягнення; попередній центральний та нецентральний стиск; попередній вигин.

За місцем здійснення попереднього напруження: на заводі-виробнику металоконструкцій; при монтажі до підйому і установки монтажних блоків; на монтажі після підйому і установки конструкцій, включаючи одноразове і багаторазове попереднє напруження; в процесі реконструкції – на об'єкті або на спеціальному стенді при заміні на нові.

Використання попереднього напруження дозволяє знизити витрати сталі на 15-18 % (при пружній роботі) і на 19-23 % (при пружно-пластичній роботі), а також скоротити вартість на 8-14 % [12] при забезпеченні аналогічної або навіть покращенні несучої здатності.

Розглянемо способи створення попередніх напружень в сталевих конструкціях.

Найчастіше ідеєю попереднього напруження користуються при створенні штучним шляхом в конструкції, стержні або найбільш напруженому перерізі напружень зворотного знаку тим, які виникають при дії експлуатаційного навантаження. При центральному розтягуванні зворотними будуть попередні напруження центрального стиснення. Вони створюються попередньо розтягнутим елементом з високоміцного матеріалу, центр ваги якого сполучений з центром тяжіння жорсткого елемента (рис. 4, а), в якому створюються попередні напруження стиснення σ_0 . Елемент, який напружує в таких випадках називають затяжкою.

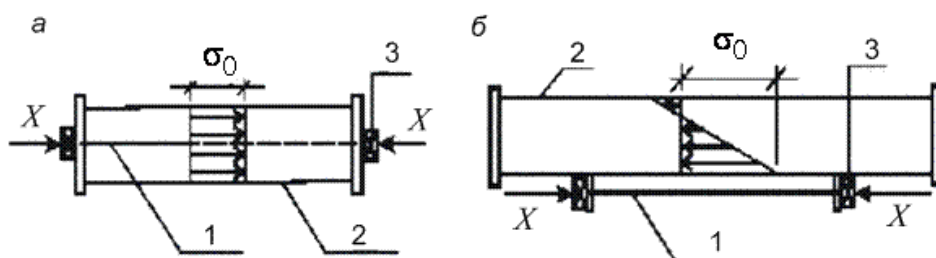


Рис. 4. Створення попередніх напружень:

а – при центральному розтягуванні; б – при згині;
1 – затяжка; 2 – жорсткий елемент; 3 – анкер

Натягування затяжки силою $X = \sigma_0 \cdot A_1$ проводиться домкратом з упором на жорсткий елемент. Закріплення затяжки в натягнутому стані здійснюється за допомогою анкерів. Прикладене зовнішнє навантаження P гасить попередні напруження σ_0 в жорсткому стержні і доводить напруги в затяжці до R_2 (повне використання міцності затяжки). Нова необхідна площа перерізу жорсткого елемента

$$A^*_{*1} = \frac{P - \sigma_0 A_1 - R_{y2} A_2}{R_{y1}} < A_1, \quad (1)$$

де A_1 і R_{y1} – площа перерізу жорсткого елемента і розрахунковий опір при відсутності попереднього напруження (і затяжки);

A_2 і R_{y2} – площа перерізу і розрахунковий опір затяжки;

A^*_{*1} – необхідна площа жорсткого елемента при попередньому його напруженні.

З урахуванням того, що міцність затяжки значно вища, ніж міцність жорсткого стержня, вага попередньо напруженого елемента буде меншою, ніж виконаного без попереднього напруження. З урахуванням того, що вартість високоміцних затяжок зростає повільніше, ніж міцність, вартість матеріалів теж буде менше при попередньому напруженні. Залишилося компенсувати витрати на попереднє напружених (ускладнення технології, анкера) – і отримати економічний ефект.

При проектуванні попередньо напруженого згинального елемента попередні напруження в жорсткому елементі потрібно створювати моментом, що технологічно складно здійснити. Попередні напруження, створені затяжкою, яка розташована у нижнього пояса, складаються з двох частин – стиснення і згинання. Якщо експлуатаційне навантаження розтягує нижні волокна, то попереднім напруженням їх необхідно стиснути, і затяжку розташувати у нижнього пояса. Верхній пояс буде розтягнутим (рис. 4, б), а експлуатаційним навантаженням стиснутий – це добре.

Якщо максимальний момент від експлуатаційного навантаження діє тільки в середині прольоту, то і пристрої для кріплення анкерів розташовуються на деякій відстані від опор. Попередні напруження створюються домкратами або електротермічним способом (при використанні високоміцної стержневої арматури). Також доцільно використовувати власну статичну вагу конструкцій.

Оскільки більшою мірою затяжка розвантажує нижній пояс, вздовж якого вона розташована, то переріз жорсткого елемента виконується несиметричним, з більш розвиненим верхнім поясом. Це покращує загальну стійкість балки.

Чим більша відстань від центру ваги жорсткого елемента до центра ваги затяжки, тим ефективніше вона працює – створює більший момент, що напружує жорсткий елемент. Але це ускладнює закріплення затяжки по кінцях і зв'язку затяжки з нижнім поясом по довжині балки, тому така конструкція застосовується рідко.

Затяжки можуть бути прямолінійними і криволінійними, одногілковими і двогілковими – відповідно до епюр моментів від експлуатаційного навантаження [10].

Якщо попередні напруження в елементі створюються ступенями (багатоступеневе попереднє напруження) після прикладання до балки експлуатаційного навантаження по частинам, то ефективність попереднього напруження підвищується.

При створенні попереднього напруження затяжкою економія виходить пропорційною масі матеріалу, тоді як додаткові витрати (трудомісткість, встановлення анкерів) змінюються повільніше. Це створює передумови для більшого зниження питомої вартості в великих конструкціях (з ростом їх маси) [10, 11] і зменшення міцності сталі жорсткого елемента.

Іншою часто використовуваною ідеєю при створенні попередніх напружень є ідея зворотного вигину – створення попередніх деформацій зворотного напрямку в порівнянні з напрямком деформацій від експлуатаційного навантаження. Вона може бути використана при посиленні прокатного двотавра смугами з високоміцної сталі (бістальна балка). В цьому випадку двома розташованими у країв елемента парами сил (моментами, рис. 5) в середній частині жорсткого елемента при відсутності зв'язків між двотавром і смугами створюється вигин. Епюра напружень в двотаврі наведена на рис. 5, а, напруження в смугах з високоміцної сталі поза врахуванням через їхню малу згинальну жорсткість. Після цього проводиться зварювання смуг з двотаврів, і знімаються зовнішні сили (моменти), які створили попередні напруження в бістальній балці (рис. 5, б). Після прикладання експлуатаційного навантаження (моментів або сил зворотного знака) обидва матеріали бістальної балки працюють з повним використанням їх міцності (рис. 5, в).

У нерозрізних балках постійного перерізу (прокатних двотаврів) вирівнювання моментів в прольотах і на опорах може бути здійснене шляхом зміщення опор (рис. 6). При цьому до епюри моментів від експлуатаційного навантаження додається епюра

моментів від зсуву опор. Цей спосіб попереднього напруження вимагає мінімальних витрат [10]. Розглянемо двопрогінну нерозрізну балку, завантажену в середині кожного прольоту зовнішньою силою P . Різниця між опорним і прогінним моментами складе $|M|_{on} - M_{np}$. Для вирівнювання моментів опорний момент необхідно зменшити на $\Delta = \frac{2}{3} |M|_{on} - M_{np}$. При цьому прогінні моменти збільшаться на $\frac{1}{3} |M|_{on} - M_{np}$, тобто відбудеться вирівнювання моментів (рис. 6).

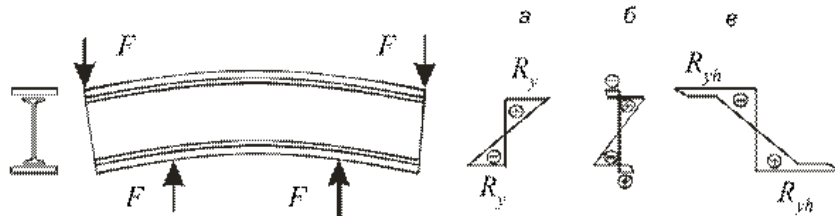


Рис. 5. Схема зміни напружень в балці при використанні методу зворотного вигину

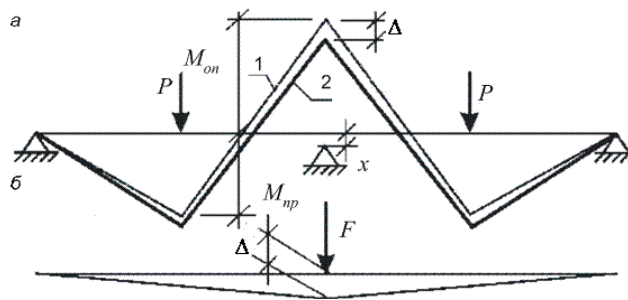


Рис. 6. Вирівнювання моментів в нерозрізній балці зміщенням (зниженням) опори:

а – статична схема вихідної балки; б – вирівнюваний момент;
1 – епюра моментів в нерозрізній балки; 2 – вирівняна епюра моментів

Вирівнюваний момент буде створений силою F при зміщенні балки на опору, опущену на величину x . Вирівняні моменти будуть менші максимального в початковій статичній схемі M_{on} . Це дозволить зменшити розмір перерізу двотавра, витрату сталі і вартість конструкції.

Приклади використання. Попереднє напруження може використовуватися в вертикальних і горизонтальних сталевих циліндричних резервуарах. Створюється воно навіванням з натягом високоміцного дроту, пасм з нього або високоміцної смуги по спіралі на циліндричну поверхню резервуара (рис. 7). Стінки їх сприймають гідростатичний тиск рідини і внутрішній (надлишковий) тиск парів над вільною її поверхнею. При цьому стінки вертикальних резервуарів відчувають кільцеві напруження розтягу, що збільшуються в міру віддалення по вертикалі від вільної поверхні рідини, а також вертикальні напруження, але вплив цього компонента напружень на міцність резервуара невелика [10].

Найчастіше попереднє стиснення виконується в найбільш завантаженій тиском зоні стінки вертикальних циліндричних резервуарів, при цьому стінка стискається. Вичерпання несучої здатності настає одночасно в матеріалі стінки і високоміцній навівці. За

рахунок попереднього напруження можна зменшити до конструктивного мінімуму товщину стінок в нижній зоні. Зі зменшенням тиску і кільцевих напружень крок напружуючих витків високоміцного матеріалу може збільшуватися. Попередні напруження стінки покращують її місцеву стійкість.

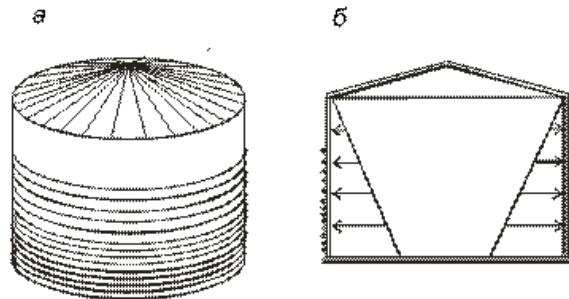


Рис. 7. Попередньо напружений сталевий резервуар:

а – схема попередньо напруженої кільцевої арматури, б – тиск рідини на стінки резервуара

Таким же чином (спіральним навиванням високоміцного матеріалу) здійснюється попереднє напруження високонапірних сталевих трубопроводів та інших технологічних ємностей циліндричної форми, які перебувають під тиском.

Гнучкі стержні, що працюють на центральний тиск і виконані часто з труби, можна посилити, створивши проміжні опори за допомогою чотиристоронніх попередньо напружених шпренгелів (рис. 8), що забезпечують просторову жорсткість. Розпірки шпренгеля забезпечують центральному стержню просторові пружно-податливі опори, перешкоджають вільному горизонтальному переміщенню центрального стержня. Маючи достатню згинальну жорсткість, жорстко з'єднані з центрально-стисненим стержнем і нерухомо прикріплені до елементів шпренгелів розпірки при повороті перерізів центрального стержня (втрата стійкості) створюють протимоменти. Все це дозволяє зменшити переріз центрального стержня, скоротити витрату матеріалу і вартість.

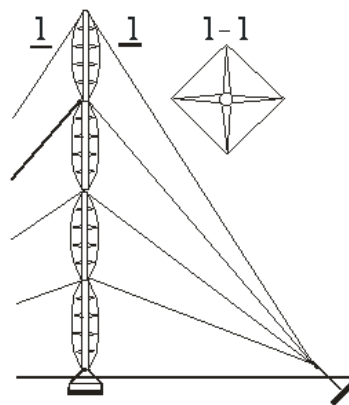


Рис. 8. Багатоярусна щогла з попередньо напружених шпренгелів

Найбільш старими попередньо напруженими шпренгельними конструкціями з полігональними затяжками є використовувані і в даний час шпренгельні балки залізничних вагонів (рис. 9).

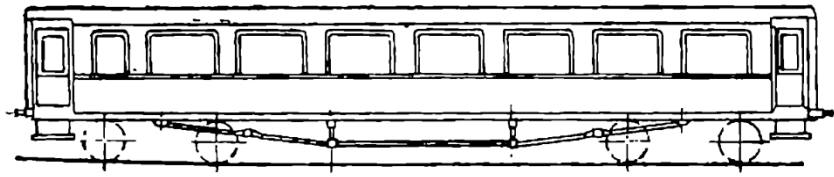


Рис. 9. Застосування шпренгельної конструкції в залізничному вагоні

Розглянемо попередньо напружені центрально розтягнуті стержні. Перерізи жорсткої частини попередньо напружених центрально-розтягнутих стержнів часто повторюють конструкцію центрально-стиснутих сталевих колон (рис. 10), тому що в стадії стиснення вони такими і є. Часто це два двотаври або швелера, з'єднані планками, зварний двотавр або прокат типу Ш або К, можливе використання і труби. По кінцях – упорної плити, через які попереднє напруження передається на жорстку частину, підкріплені ребрами жорсткості. З певним кроком ставляться діафрагми, обрізки труб або ребра жорсткості, якими фіксується стан затяжки в перерізі і скорочується розрахункова довжина жорсткої частини при роботі її на стиснення (рис. 10).

Затяжка виконуються з однієї, двох або чотирьох гілок, при цьому центр ваги затяжки повинен збігатися з центром тяжіння жорсткої частини стержня [13].

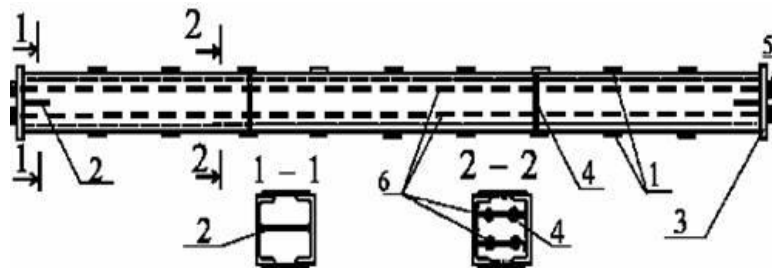


Рис. 10. Централно-розтягнутий стержень, попередньо напружений затяжкою:

1 – планки; 2 – ребро; 3 – упорна плита; 4 – діафрагма; 5 – анкер; 6 – стержні

Для оптимального перерізу міцність жорсткого стержня і затяжки під зовнішньою силою P повинна виконуватися повністю, тобто [13]

$$P = R_{y1}A_1 + R_{y2}A_2, \quad (2)$$

де R_{y1}, R_{y2} – розрахунковий опір жорсткого стержня і затяжки;

A_1, A_2 – площі перерізів жорсткого стержня і затяжки відповідно;

σ_{01}, σ_{02} – попередні напруження в жорсткому стержні і затяжці.

Враховуючи силу P , можна визначити по збільшенню напружень і відповідним площам

$$P = \sigma_{01} + R_{y1} A_1 + R_{y2} - \sigma_{02} A_2. \quad (3)$$

Виходячи з рівності деформацій жорсткого стержня і затяжки під зусиллям попереднього напруження P

$$\frac{\sigma_{01} + R_{y1}}{E_1} l = \frac{R_{y2} - \sigma_{02}}{E_2} l \text{ позначимо } \frac{R_{y2} - \sigma_{02}}{\sigma_{01} + R_{y1}} = \frac{E_2}{E_1} = m. \quad (4)$$

Позначивши $k = R_{y2} / R_{y1}$ розв'язуємо спільно два рівняння, знайдемо необхідні площі перерізів

$$A_1 = P \frac{k - m \left(\frac{\sigma_{01}}{R_{y1}} + 1 \right)}{\left(\frac{\sigma_{01}}{R_{y1}} + 1 \right) k - m R_{y1}} \text{ і } A_2 = P \frac{\frac{\sigma_{01}}{R_{y1}}}{\left(\frac{\sigma_{01}}{R_{y1}} + 1 \right) k - m R_{y1}}. \quad (5)$$

Для підбору перерізів необхідно задатися співвідношенням $\sigma_{01} / R_{y1} \leq 1$, але найбільш доцільно прийняти 1.

Однак у зв'язку з можливими втратами попереднього напруження і можливим перевищенням контрольованого зусилля слід зменшити на 5-6 %. Більш детальний перелік втрат попереднього напруження наводиться в [9].

Величина m в сталевих конструкціях змінюється від 0,8 до 1 і слабо впливає на площу перерізів. Застосування більш міцного матеріалу затяжки підвищує ефективність попереднього напруження. При призначенні перерізів слід враховувати стандарти і технічні умови на матеріали, що використовуються.

За отриманими результатами підбирають переріз жорсткого стержня і затяжки. Перевірка міцності попередньо напруженого стержня виконується за формулами:

$$\sigma_1 = \frac{PE_1}{A_2E_2 + A_1E_1} - \sigma_{02}\gamma_2 \leq R_{y1}, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{PE_2}{A_2E_2 + A_1E_1} + \sigma_{01}\gamma_1 \leq R_{y2}, \quad (7)$$

де σ_{01}, σ_{02} – напруження в жорсткому стержні і затяжці;
 γ_1, γ_2 – коефіцієнти точності натягу.

При надійному контролі зусилля попереднього напруження обидва вони рівні 1. При контролюванні зусилля попереднього напруження непрямыми методами $\gamma_1=1,1$ враховує можливість завищення зусилля попереднього напруження, $\gamma_2=0,9$ враховує можливість його заниження.

Після створення попередніх напружень зусилля в затяжці може знизитися за рахунок релаксації напружень в ній (непружні деформації затяжки), деформації анкерів та інших причин [9]. Компенсують ці втрати, зазвичай підвищуючи контрольовані зусилля в затяжці до величини

$$X_{con} = \frac{X}{0,95} + \Delta_a \frac{A_2E_2}{l_2}, \quad (8)$$

де X – зусилля попереднього напруження затяжки $X = \sigma_{01} \cdot A_1$;
 l_2 – довжина затяжки між анкерами;

Δ_a – податливість анкерів, при закріпленні затяжки гайками або клиноподібними пробками $\Delta_a=1$ мм, при застосуванні анкерів з прокладками $\Delta_a=2$ мм;

0,95 – коефіцієнт релаксації напружень для високоміцного дроту, пучків з нього і канатів, в інших випадках він дорівнює 1.

Після передачі зусилля попереднього напруження на жорсткий стержень він виявляється центрально-стислим. Перевірка його стійкості виконується за формулою Ейлера

$$X\gamma_1 \leq \frac{n+1}{l^2} \pi^2 E_1 I_{\min}, \quad (9)$$

де n – кількість діафрагм;

l – найбільша відстань між ними;

I_{\min} – мінімальний момент інерції жорсткого стержня.

Анкери попередньо напружених балок. Анкери призначені для утримання затяжки в натягнутому стані аж до руйнівного зусилля. Натягування затяжок здійснюється механічним, електротермічним і електротермомеханічним способами [12].

Для натягу механічним способом застосовують гідравлічні і гвинтові домкрати, намотувальні машини та ін.

Суть електротермічного способу натягування полягає в тому, що стержні або дріт, з обмежувачами на кінцях, встановлюють на певній відстані один від одного, розігрівають струмом до 300-350 °С, в результаті чого вона подовжується. Нагріті стержні укладають таким чином, щоб обмежувачі виявилися заведеними за упори. Вони перешкоджають вкорочення стержнів при охолодженні, завдяки чому в стержнях виникають задані напруження розтягу.

Електротермомеханічний спосіб натягу – це поєднання електротермічного і механічного способів.

Закріплення затяжок в натягнутому стані виконується сталевими підкладками, гайками або нерухомими упорами.

По конструкції існують різні анкерні системи.

Різьбові системи (рис. 11). Застосовуються при виконанні затяжки з високоміцного стержня. Включають кінцевий елемент з різьбою зі сталі звичайної або підвищеної міцності, шайби для розподілу обтиску на необхідну площу і гайку. Труднощі використання полягають в необхідності виконання зварного стику з міцністю високоміцного стержня.

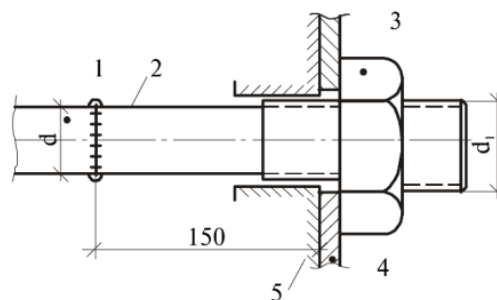


Рис. 11. Різьбовий анкер:

1 – зварний стик, 2 – кінцевий елемент; 3 – гайка; 4 – шайба; 5 – упорна плита

Опресовані системи. Являють собою циліндричні гільзи з пластичної сталі, опресовані на негладкій поверхні зтяжки. Застосовуються на високоміцних арматурних стержнях з періодичною поверхнею (рис. 12, а) і пасмах з високоміцного дроту (рис. 12, б).

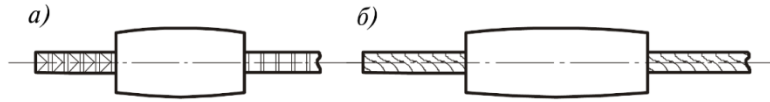


Рис. 12. Опресовані анкери

Петельні системи. Зтяжка створюється шляхом безперервного намотування високоміцного дроту на упори криволінійного обрису, змонтовані на жорсткій частині напруженої конструкції. Одна з упор рухома (рис. 13), переміщенням її за допомогою домкрата створюється натяг зтяжки. Після створення натягу рухомий упор кріпиться до жорсткої частини конструкції на зварюванні або болтах.

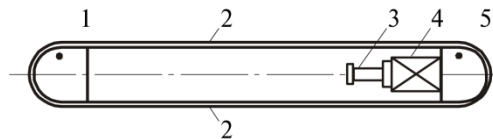


Рис. 13. Петельний анкер:

1 – нерухомий упор; 2 – петельна зтяжка; 3 – упор для домкрата;
4 – домкрат; 5 – рухомий упор

Конічні клинові системи. Анкер складається зі сталеві циліндричної колодки з конічним гніздом і сталеві конічної пробки (рис. 14). На конічній поверхні пробка має нарізку для кращого зчеплення з високоміцної дротом. Дріт розташовуються по контуру отвору, розклинюються пробкою і утворюють кільцевий пучок.

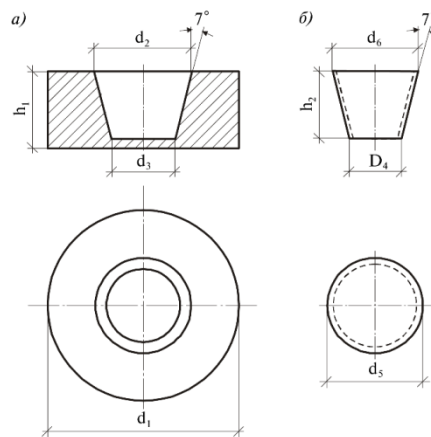


Рис. 14. Конічний клиновий анкер:

1 – колодка; 2 – конічна пробка

Анкери склянкового типу використовуються для закріплення в натягнутому стані сталевих канатів і щільних круглих пучків високоміцного дроту. Закріплення каната

або пучка в склянці здійснюється забиванням сталевих клинів (рис. 15, *а*) або заливкою легкоплавким сплавом (рис. 15, *б*). Закріплення анкерів в натягнутому стані здійснюється сталевими прокладками або згвинчуванням гайок з зовнішньої різьби склянок.

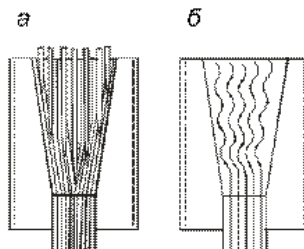


Рис. 15. Анкери склянкового типу з закріпленням затяжки:

а – сталевими клинами; б – легкоплавким сплавом

Висновки та пропозиції. Подані в статті приклади застосування попередньо напружених конструкцій в загальному машинобудуванні свідчать про їх економічну ефективність та відчутно позитивний вплив на конструктивно-технологічні якості відповідних об'єктів. До таких позитивних результатів належать: збільшення строку життєвого циклу досліджуваних засобів, зменшення їх матеріалоємності та підвищення вантажопідйомності, покращення ремонтпридатності, підвищення тріщиностійкості, зменшення/повне виключення різнознакових напружень. Однак такий підхід не знайшов гідного впровадження у конструкціях залізничного машинобудування, зокрема вагонобудуванні. Проте попереднє напруження може бути ефективно використане як при проектуванні нових, так і при різноплановому удосконаленні існуючих конструкцій вагонів.

В конструкціях рухомого складу та зокрема вантажних вагонах доцільно впроваджувати попередньо напружені блоки та елементи. При цьому ефективно реалізувати сказане можливо лише на основі наукового обґрунтування структури та параметрів відповідних технічних рішень.

На сьогоднішній день колективом авторів проводяться науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи у досліджуваному напрямку. Так, вже розроблено низку математичних моделей та технічних рішень з ефективного впровадження попередньо напружених конструкцій до складу екіпажних та несучих модулів рухомого складу, подано та отримано ряд патентів на винаходи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фомін, О.В. Оптимізаційне проектування елементів кузовів залізничних напіввагонів та організація їх виробництва: монографія / О.В. Фомін. – Донецьк: ДонІЗТ УкрДАЗТ, 2013. – 251с.
2. Фомін, О.В. Дослідження дефектів та пошкоджень несучих систем залізничних напіввагонів: монографія / О.В. Фомін. – К.: ДЕТУТ, 2014. – 299 с.
3. Фомін, О.В. Підвищення ступеня ідеальності вантажних вагонів та прогнозування стадій їх еволюції / О.В. Фомін // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – № 3. – С. 68-76. – Режим доступу: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukrcat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnichna-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennya-stupenya-idealnosti-vantazhnikh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>
4. Фомін О.В. Концепція ідеальних кузовів напіввагонів / О.В. Фомін // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2013. – № 4 (193). – С. 267–271.

5. Fomin, O. Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars/ O.V. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2014, No. 5 – P.31-43. [<http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/9-Fomin.pdf>].

6. Фомін, О.В. Визначення перспективних напрямків проектування несучих систем у вантажному вагонубудуванні/ О.В. Фомін// Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. –№ 3/7(57), 2012. – С. 32-35 – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3\(7\)_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3(7)_9.pdf).

7. Фомін, О.В. Варіаційне описання конструктивних виконань вантажних вагонів/ О.В. Фомін, А.В. Гостра // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2015. – Вип. 26-27. – С. 137-147.

8. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) с изменениями и дополнениями. – ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – Москва, 1996.

9. Металлические конструкции: справ. проектировщика. В 3 т. Т. 1. Общая часть / под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 576 с.

10. Металлические конструкции. Специальный курс: учеб. пособие для вузов / Е.И. Беленя и др.]; под ред. Е.И. Беленя. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 685 с.

11. Гайдаров, Ю.В. Предварительно напряженные металлические конструкции / Ю.В. Гайдаров. – Л.: Стройиздат, 1971. – 144 с.

12. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные комбинированные и вантовые конструкции / В.В. Михайлов. – М.: АСВ, 2002. – 256 с.

13. Ткаченко, О.А. Основы проектирования металлических конструкций: курс лекций. В 3 ч. Ч. 1. / О.А. Ткаченко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2004. – 116 с.

Alexei Fomin, Doctor of Science (Technical Sciences)

(Associate Professor, Cars and Carriage Facilities Chair of the State University for Transport Economy and Technologies)

Nikolay Gorbunov, Doctor of Science (Technical Sciences), Professor

(Professor, Railway Transport Chair, East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl)

Anton Stetsko

(Senior Lecturer, Cars and Carriage Facilities Chair of the State University for Transport Economy and Technologies)

Vjacheslav Kovalenko

(Deputy Chief Financial Officer TOV «Nerudbudtorg»)

RESEARCH OPPORTUNITIES OF PRESTRESSED STRUCTURES IN RAILWAY ENGINEERING

In the article the analysis of the opportunities and prospects of prestressed bearing structures in railway engineering, including the construction of freight cars. Systematized information on the use of prestressed structures in different engineering vehicles that are elected by the criterion of similarity to the basic block and a design of railway engineering objects. Theoretical and practical features modern designs prestressed structures, as well as specific issues of their use.

Keywords: railway rolling stock, bearing systems, prestress, freight cars.

REFERENCES

1. Fomin, O.V. Optimizacijne proektuvannja elementiv kuzoviv zaliznichnih napivvagoniv ta organizacija ih virobnictva [Optimization design elements ry gondola bodies and organization of production]: Monograph / O.V. Fomin. – Donetsk: DonIZT UkrDAZT, 2013. – 251 p.

2. Fomin, O.V. Doslidzhennja defektiv ta poshkodzen' nesuchih sistem zaliznichnih napivvagoniv [Investigation of defects and damage bearing systems ry gondola]: Monograph / O.V. Fomin. – Kyiv: DETUT, 2014. – 299 p.

3. Fomin, O.V. Pidvishhennja stupenja ideal'nosti vantazhnikh vagoniv ta prognozuvannja stadij ih evoljucii [Increased ideal freight cars and forecasting stages of their evolution] [Text] / O.V Fomin // Scientific Bulletin of National Mining University. – Dnepropetrovsk: NSU, 2015. – №3. – P. 68-76 – Access: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukrcat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnichna-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennja-stupenja-idealnosti-vantazhnikh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>.
4. Fomin, O.V. Koncepcija ideal'nih kuzoviv napivvagoniv [The concept of ideal bodies gondola] [Text] / O.V. Fomin // Journal of East Ukrainian National University named after Vladimir Dal, a scientific journal. – Lugansk: EUNU. Dal, 2013. – № 4 (193). – S. 267-271.
5. Fomin, O.V. Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars/ O.V. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2014, No. 5 – P.31-43. [<http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/9-Fomin.pdf>].
6. Fomin, O.V. Viznachennja perspektivnih naprjamkiv proektuvannja nesuchih sistem u vantazhnomu vagonobuduvanni [Definition of perspective directions of designing of bearing systems in the cargo car building] / O.V. Fomin // Eastern European Journal of advanced technologies. – Kharkiv. -№ 3/7 (57), 2012. – S. 32-35 – Access: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3\(7\)_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3(7)_9.pdf).
7. Fomin, O.V. Variacijne opisannja konstruktivnih vikonan' vantazhnikh vagoniv [Variations describe the structural designs of freight cars] / O.V. Fomin, A.V. Gostra // Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine series «Transport systems and technologies.» – Kyiv: DETUT, 2015. – Vyp.26-27. – S.137-147.
8. Normy rascheta i proektirovanija vagonov zheleznyh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh) s izmenenijami i dopolnenijami [Norms calculating and designing railways carriages IPS gage railway 1520 mm (nesamohodnyh) s Changes and additions]. – HosNYIV – VNYYZHT. Moscow, 1996.
9. Metallicheskie konstrukcii: sprav. proektirovshhika [The metal constructions: interior. proektyrovschyka]. In 3 t. T. 1. General part / Pod Society. Ed. V.V. Kuznetsova. – M.: Publishing House of the DIA, 1998. – 576 p.
10. Metallicheskie konstrukcii. Special'nyj kurs [The metal constructions. Special course]: Textbook. posobyje for Universities / E.I. Belenja and other] ed. E.I. Belenja. – 3rd ed., Rev. and add. – Moscow: Stroiizdat, 1991. – 685 p.
11. Haydarov, Y.V. Predvaritel'no naprjazhennye metallicheskie konstrukcii [Preliminary tension metal constructions] / Y.V. Haydarov. – SP: Stroiizdat, 1971. – 144 p.
12. Mikhailov, V.V. Predvaritel'no naprjazhennye kombinirovannye i vantovyje konstrukcii [Combined preliminary tension and cable-stayed constructions] / V.V. Mikhailov. – M: ASV, 2002. – 256 p.
13. Tkachenko, A.A. Osnovy proektirovanija metallicheskih konstrukcij [Fundamentals of Designing metallis structures]: Lectures. At 3 hours. Part 1. / A.A. Tkachenko. – Khabarovsk: Publishing House DVHUPS, 2004. – 116 p.