УДК 629.4:62-788.2 https://doi.org/10.15407/itm2022.02.101

М. Б. СОБОЛЕВСЬКА, Д. В. ГОРОБЕЦЬ

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПАСИВНОГО ЗАХИСТУ ГОЛОВНОГО ВАГОНА МОТОРВАГОННОГО ПОЇЗДА ПРИ АВАРІЙНИХ ЗІТКНЕННЯХ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sobmb@i.ua

Створення швидкісних моторвагонних поїздів в Україні має відбуватися у відповідності до діючих вітчизняних стандартів ДСТУ EN 12663 [1] та ДСТУ EN 15227 [2], які регламентують міцність конструкцій екіпажів експлуатації, їх активну і пасивну безпеку. В даній статті розглядаються питання, пов'язані з розробкою рекомендацій щодо пасивного захисту головного вагона при аварійних зіткненнях моторвагонного поїзда з перешкодами, визначенням параметрів пристроїв поглинання енергії (ППЕ), які входять до системи пасивної безпеки головного вагона, можливості використання алюмінієвих сплавів для ППЕ. В Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України розроблено концепцію пасивного захисту вітчизняних швидкісних пасажирських поїздів при аварійних зіткненнях, що відповідають сценаріям стандарту ДСТУ EN 15227. Розроблено науково-методичне забезпечення та скінченно-елементні моделі для дослідження пластичного деформування конструкцій ППЕ, що містять стільники, при ударі. Запропоновано використовувати в лобовій частині головного вагона пристрої поглинання енергії нижнього (ППЕ 1) і верхнього (ППЕ ВР) рівнів, а в його хвостовій частині замість буферів – пристрої нижнього рівня (ППЕ 2 або ППЕ 3, якщо проміжні вагони мають маси відповідно 50 т або 64 т). Конструкція ППЕ 1 включає два послідовно розташованих елементи. Елемент 1 – короб з одношаровим пакетом шестигранних стільників всередині. Елемент 2 це усічена піраміда, що складається із стільників з трикутними чарунками. Конструкція ППЕ ВР має три ступені у формі елемента 2. Конструкцію ППЕ 2 та ППЕ 3 розроблено на основі елемента 1. Визначено параметри виготовлених зі сталі марки 08Ю конструкцій ППЕ 1, ППЕ 2, ППЕ 3 з енергоємністю 0,95 МДж, 0,25 МДж і 0,3 МДж відповідно. Побудовано тривимірну геометричну модель лобової частини головного вагона для вітчизняних залізниць та запропоновано схему розміщення пристроїв поглинання енергії. Рекомендовано встановити два ППЕ 1 в лобовій частині головного вагона, два ППЕ ВР і два ППЕ 2 або два ППЕ 3 у його хвостовій частині та у кінцевих частинах проміжних вагонів. Метою статті є розробка рекомендацій щодо пасивного захисту вітчизняного головного вагона згідно з вимогами ДСТУ EN 15227. Проведено дослідження щодо вибору раціональних параметрів пристрою ППЕ ВР, виготовленого зі сталі 08Ю. Проаналізовано можливість використання для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 2 (ППЕ 3) та ППЕ ВР замість сталі марки 08Ю алюмінієвих сплавів АМг2 та АМг6, які мають високі пластичні властивості, низьку густину та високу інертність до агресивного зовнішнього середовища. В результаті виконаного комплексного дослідження встановлено можливість використання для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 3 та ППЕ ВР замість сталі марки 08Ю алюмінієвого сплаву АМг6, а для ППЕ ВР – ще й алюмінієвого сплаву АМг2. Визначено параметри конструкцій розглянутих ППЕ, виготовлених з алюмінієвих сплавів. Розроблено рекомендації щодо пасивного захисту головного вагона згідно з ДСТУ EN 15227. Розроблені науково-методичне забезпечення, математичні моделі та рекомендації можуть бути використані на етапі проєктування головного вагона нового покоління згідно з вимогами ДСТУ EN 15227.

Ключові слова: *моторвагонний поїзд, головний вагон, аварійне зіткнення, система пасивної безпеки, пристрої поглинання енергії.*

High-speed multiple-unit trains in Ukraine must be developed according to the Ukrainian Standards DSTU EN 12663 and DSTU EN 15227, which specify the car crashworthiness and active and passive safety. This paper addresses issues involving the development of recommendations on the passive safety of a multiple-unit head car in emergency collisions with obstacles, the determination of the parameters of the energy-absorbing devices (EADs) that are a part of the passive safety system (PSS) of the head car, and the possibility of using aluminum alloys in the EAD manufacturing. Researchers of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine developed a passive protection concept for home high-speed passenger trains in emergency collisions according to the DSTU EN 15227 requirements and methods and finite-element models for the study of the impact plastic deformation of the EAD honeycomb structures. It was proposed that lower- and upper-level energy-absorbing devices EAD 1 and UL EAD, respectively, be used at head car front end and low-level energy-absorbing devices be used at the head car rear end in place of buffers (EAD 2 or EAD 3 if the intermediate cars have a mass of 50 t or 64 t, respectively). EAD 1 includes two tandem elements. Element 1 is a box with a single-layer pack of hexagonal honeycombs inside. Element 2 is a truncated pyramid made up of honeycombs with triangular cells. The UL EAD has three stages in the form of Element 2. EAD 2 and EAD 3 were designed based on Element 1. The parameters of EAD 1, EAD 2, and EAD 3 of energy capacity 0.95 MJ, 0.25 MJ, and 0.3 MJ, respectively, made of type 08Yu steel were determined. A 3D geometrical model of the home head car front end was developed, and an EAD placement scheme was proposed. It was recommended to install two EAD 1 devices at the head car front end and two UL EAD and two EAD 2 or

two EAD 3 devices at the head car rear end and at the ends of the intermediate cars. The aim of this paper is to develop recommendations on manufacturing head car passive protection devices with the use of different materials. A comprehensive study was conducted to choose advisable parameters of a UL EAD made of 08Yu steel and to analyze the possibility of replacing 08Yu steel in the EAD 1, EAD 2 (EAD 3), and UL EAD manufacture with AMr2 and AMr6 aluminum alloys, which have high plastic properties, a low density, and a high resistance to an aggressive environment. As a result, it was shown that 08Yu steel can be replaced with AMr6 aluminum alloy in the EAD 1 and EAD 3 manufacture and with AMr6 or AMr2 aluminum alloys in the UL EAD manufacture. The parameters of the above-mentioned EADs made of the aluminum allows were determined. Recommendations on head car passive protection according to the DSTU EN 15227 were developed. The methods, mathematical models, and recommendations developed may be used in the design of a new-generation head car according to the DSTU EN 15227 requirements.

Keywords: *multiple-unit train, head car, emergency collision, passive safety system, energy-absorbing devices, aluminum alloys.*

Вступ. Створення швидкісних моторвагонних поїздів в Україні має відбуватися у відповідності до діючих вітчизняних стандартів ДСТУ EN 12663 [1] та ДСТУ EN 15227 [2], які регламентують міцність конструкцій екіпажів експлуатації, їх активну і пасивну безпеку. В даній статті розглядаються питання, пов’язані з розробкою пристроїв поглинання енергії (ППЕ), які входять до системи пасивної безпеки (СПБ) головного вагона. При аварійних зіткненнях, сценарії яких визначено ДСТУ EN 15227, за рахунок пластичного деформування пристроїв поглинання енергії відбувається поглинання кінетичної енергії удару, зниження поздовжніх зусиль у міжвагонних з’єднаннях та поздовжніх прискорень вагонів пасажирського поїзда.

На теперішній час найбільш відомі європейські СПБ головних вагонів є дворівневими і складаються з ППЕ нижнього рівня, які розташовуються на рівні зчіпного пристрою, та з ППЕ верхнього рівня, що інтегруються в лобову підвіконну частину кабіни управління [3 – 9]. На рис. 1 показано існуючі конструкції дворівневої СПБ головного вагона провідних європейських виробників (Bombardier, Alstom, Siemens).

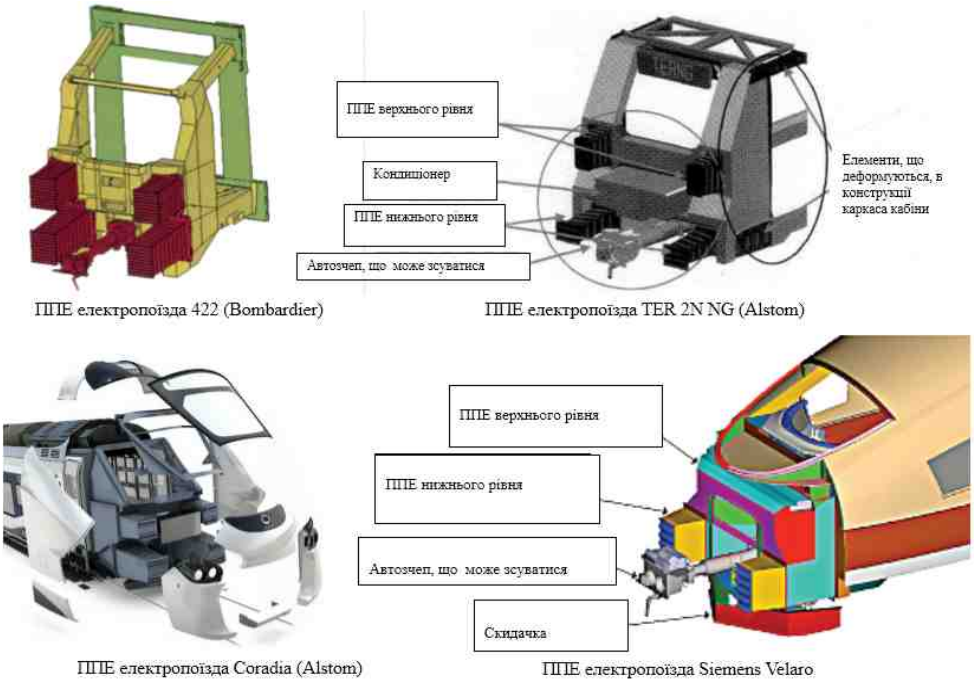
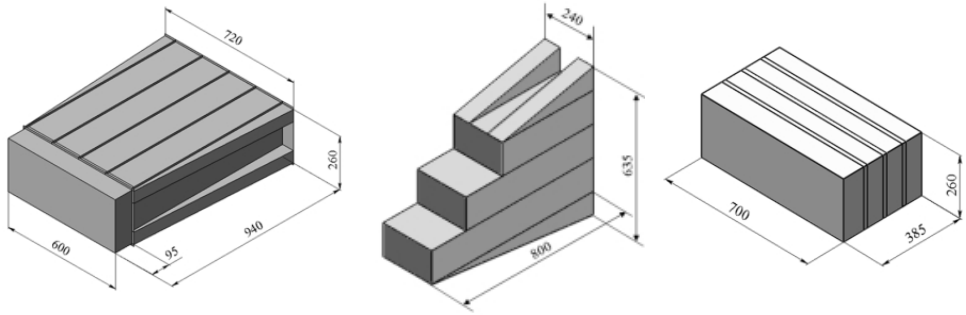


Рис. 1 – Існуючі пристрої поглинання енергії для пасивного захисту головного вагона

В Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) розроблено концепцію пасивного захисту вітчизняних швидкісних пасажирських поїздів при аварійних зіткненнях, що відповідають сценаріям стандарту ДСТУ EN 15227 [10]. Розроблено науково-методичне забезпечення та скінченно-елементні моделі для дослідження пластичного деформування конструкцій ППЕ, що містять стільники, при ударі [11]. В результаті проведеного для пасивного захисту моторвагонного поїзда запропоновано використовувати в лобовій частині головного вагона пристрої поглинання енергії нижнього (ППЕ 1) і верхнього (ППЕ ВР) рівнів, а в його хвостовій частині замість буферів – пристрої нижнього рівня (ППЕ 2 або ППЕ 3, якщо проміжні вагони мають маси відповідно 50 т або 64 т). Конструкція ППЕ 1 включає два послідовно розташованих елементи. Елемент 1 – короб з одношаровим пакетом шестигранних стільників всередині. Елемент 2 – це усічена піраміда, що складається із стільників з трикутними чарунками. Конструкція ППЕ ВР має три ступені у формі елемента 2. Конструкції ППЕ 2 та ППЕ 3 розроблено на основі елемента 1. Визначено параметри виготовлених зі сталі марки 08Ю конструкцій ППЕ 1, ППЕ 2, ППЕ 3 з енергоємністю 0,95 МДж, 0,25 МДж і 0,3 МДж відповідно [11]. Розроблені конструкції ППЕ показано на рис. 2.



ППЕ 1 ППЕ ВР ППЕ 2 (ППЕ 3)

Рис. 2 – Пристрої поглинання енергії для головного та проміжних вагонів

При розробці стільникових конструкцій захисних пристроїв використано досвід розробки ППЕ для швидкісного пасажирського локомотива [12] та результати успішного креш-тесту прототипу цього пристрою [13].

Побудовано тривимірну геометричну модель лобової частини головного вагона для вітчизняних залізниць та запропоновано схему розміщення пристроїв поглинання енергії. Рекомендовано встановити два ППЕ 1 в лобовій частині головного вагона, два ППЕ ВР і два ППЕ 2 або два ППЕ 3 у його хвостовій частині та у кінцевих частинах проміжних вагонів. Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості головного та проміжних вагонів з СПБ при нормативних сценаріях зіткнень еталонного моторвагонного поїзда з перешкодами на залізничній колії та доведено, що запропонований пасивний захист відповідає критеріям ДСТУ EN 15227 [14 – 16].

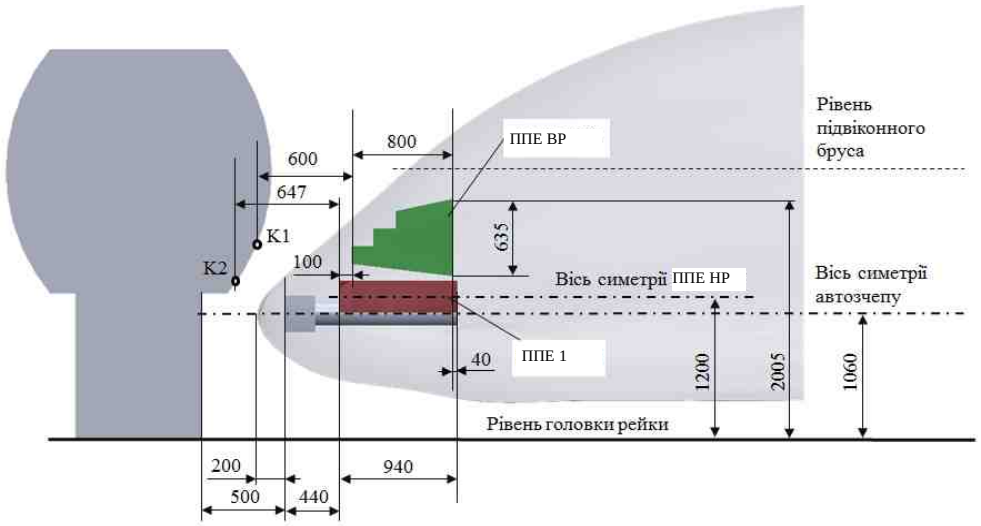
Постановка задачі. Метою статті є розробка рекомендацій щодо пасивного захисту вітчизняного головного вагона згідно з вимогами ДСТУ EN 15227.

Для досягнення цієї мети необхідно:

– визначити раціональні параметри пристрою ППЕ ВР, виготовленого зі сталі 08Ю, в результаті аналізу впливу параметрів конструкції ППЕ ВР на силові характеристики взаємодії головного вагона з нормативними перешкодами;

– проаналізувати можливість використання для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 2 (ППЕ 3) та ППЕ ВР замість сталі марки 08Ю алюмінієвих сплавів АМг2 та АМг6, які мають високі пластичні властивості, низьку густину та високу інертність до агресивного зовнішнього середовища.

Згідно з ДСТУ EN 15227 розглядається пластичне деформування конструкцій ППЕ при ударі бойком масою 80 т зі швидкістю 36 км/ч [11]. Крім того, розглядається процес взаємодії одного пристрою поглинання енергії нижнього рівня (ППЕ 1) та одного пристрою поглинання енергії верхнього рівня (ППЕ ВР) з половиною великогабаритної перешкоди, що може деформуватися (ВПД), відсіченою її центральною вертикально-поздовжньою площиною симетрії, при їх зіткненні зі швидкістю 110 км/год [16]. Схему розташування ППЕ 1 та ППЕ ВР відносно ВПД показано на рис. 3.



Всі розміри наведено в міліметрах.

Рис. 3 – Схема розташування ППЕ 1та ППЕ ВР відносно ВПД

Моделювання пружно-пластичного деформування конструкцій ППЕ, що містять стільники, при ударі. Скінченно-елементне моделювання виконується з урахуванням: геометричної і фізичної нелінійностей, динамічного зміцнення сталі в залежності від швидкості удару, змінної контактної взаємодії між елементами системи тіл, що співударяються [11]. Система диференціальних рівнянь руху в приростах розв’язується за допомогою методу послідовних навантажень. В результаті розв’язку визначаються вузлові переміщення, швидкості, прискорення, деформації, напруження, вузлові сили в різні моменти часу. Будуються діаграми деформування при ударі. Для визначення початку появи пластичних деформацій використано критерій Мізеса. Для опису пружно-пластичних властивостей матеріалу при ударних впливах використано інкрементальну модель плинності в формулюванні Крига і Кея [17], засновану на білінійній апроксимації дійсної діаграми розтягу з урахуванням кінематичного зміцнення. Точка перелому відповідає ди-

намічній межі плинності, яка залежить від швидкості деформації. Для обчислення дійсної динамічної межі плинності використовується залежність Саймондса–Купера [18 – 19].

Результати досліджень. Проведено аналіз впливу параметрів конструкцій ППЕ ВР на силові характеристики взаємодії головного вагона з перешкодами, визначеними ДСТУ EN 15227. Розглянуто ППЕ ВР з товщиною пластин 0,8 мм та 1,4 мм. Проведено дослідження процесу деформування ППЕ ВР при ударі бойком у вигляді суцільної твердої стінки масою 80 т зі швидкістю 36 км/год. Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ ВР від переміщень u_b для різних значень товщини пластин ППЕ ВР показано на рис. 4.

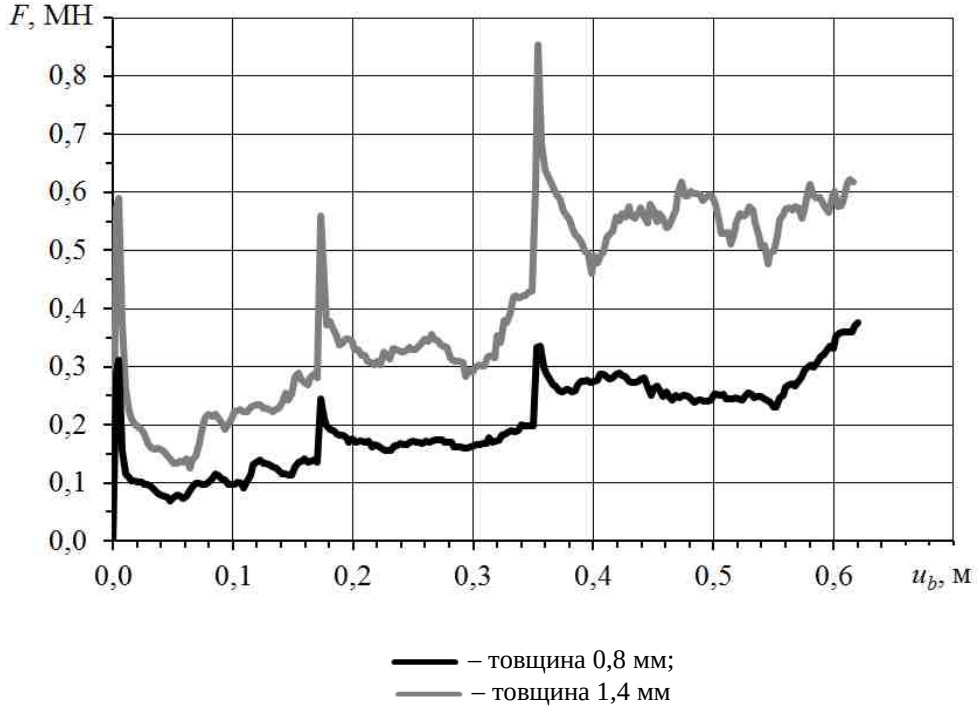


Рис. 4 – Залежності контактного зусилля F між ППЕ ВР та бойком від переміщень u_b для різних значень товщини пластин ППЕ ВР

З використанням схеми, показаної на рис. 3, проведено дослідження щодо впливу товщини пластин ППЕ ВР на силову характеристику взаємодії між ВПД та пристроями пасивного захисту при зіткненні зі швидкістю 110 км/год. Залежність контактного зусилля F між ВПД та елементами пасивного захисту головного вагона від переміщень u_b центру мас ВПД при різних значеннях товщини пластин ППЕ ВР приведено на рис. 5.

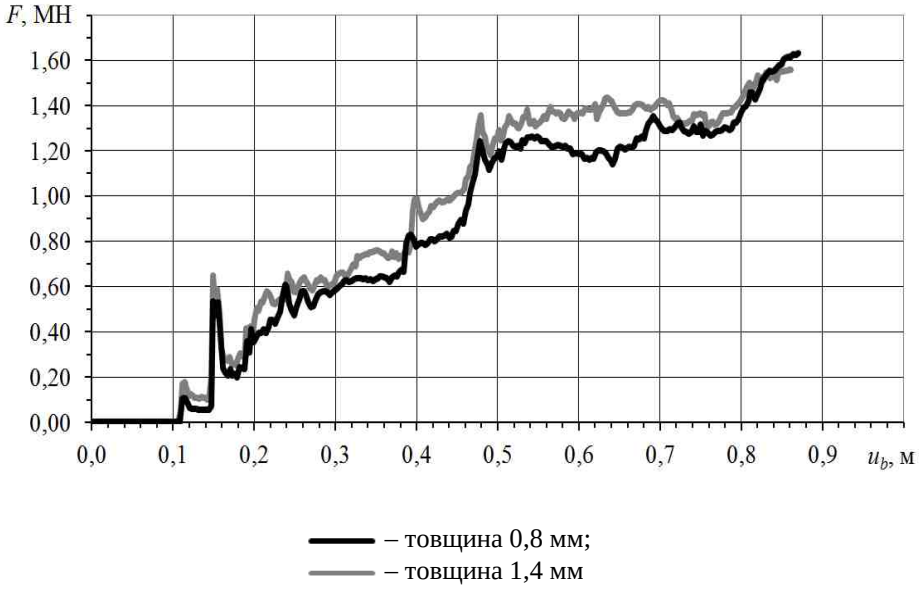


Рис. 5 – Залежність контактного зусилля F між ВПД та елементами ППЕ 1 і ППЕ ВР від переміщень u_b для різних значень товщини пластин ППЕ ВР

Аналіз силових характеристик, наведених на рис. 4 та на рис. 5, дозволяє зробити висновок про доцільність вибору товщини пластин ППЕ ВР рівною 0,8 мм, оскільки при таких параметрах ППЕ ВР виконуються критерії ДСТУ EN 15227 для сценаріїв 1 – 3. Заміна товщини пластин ППЕ ВР з 0,8 мм на 1,4 мм суттєво не впливає на силову характеристику, наведену на рис. 5, однак значно впливає на силову характеристику, наведену на рис. 4. В результаті такої заміни рівень контактного зусилля, що передається на елементи лобової стінки кабіни управління, піднімається до 0,55 МН (з урахуванням фільтру нижніх частот з частотою зрізу 180 Гц відповідно до вимог ДСТУ EN 15227). Для двох ППЕ ВР з товщиною пластин 1,4 мм сумарна сила складає 1,1 МН при допустимій 0,7 МН. Таким чином, збільшення товщини пластин ППЕ ВР має сенс тільки при можливості каркаса кабіни витримати збільшений рівень сил при пластичному деформуванні ППЕ ВР.

Розглянуто можливість використання для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 3 та ППЕ ВР замість сталі марки 08Ю алюмінієвих сплавів АМг2 та АМг6, які мають високі пластичні властивості, низьку густину та високу інертність до агресивного зовнішнього середовища. За базові конструкції вищевказаних ППЕ прийнято конструкції із сталі марки 08Ю. Розглянуто задачу вибору товщини пластин конструкцій ППЕ з алюмінієвих сплавів, при яких їх діаграми деформування та енергоємності будуть однаковими з відповідними діаграмами та енергоємностями базових конструкцій. Порівняльну таблицю з фізико-механічними характеристиками різних матеріалів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості матеріалів

Найменування	Матеріали		
	АМг2	АМг6	08Ю
Густина ρ, т/м^3	2,69	2,69	7,80
Модуль Юнга $E_e \cdot 10^{-5}$, МПа	0,71	0,71	2,03
Коефіцієнт Пуассона μ	0,30	0,30	0,30
Межа плинності σ_T, МПа	100,00	170,00	175,00
Межа міцності σ_B, МПа	200,00	350,00	270,00

Розглянуто конструкцію ППЕ ВР з товщиною пластин 0,8 мм, виготовлену із різних матеріалів. Отримані в результаті розрахунків залежності контактного зусилля F між конструкцією ППЕ ВР, яку виготовлено із різних матеріалів, та бойком масою 80 т від переміщень u_b при їх зіткненні зі швидкістю 36 км/год приведено на рис. 6.

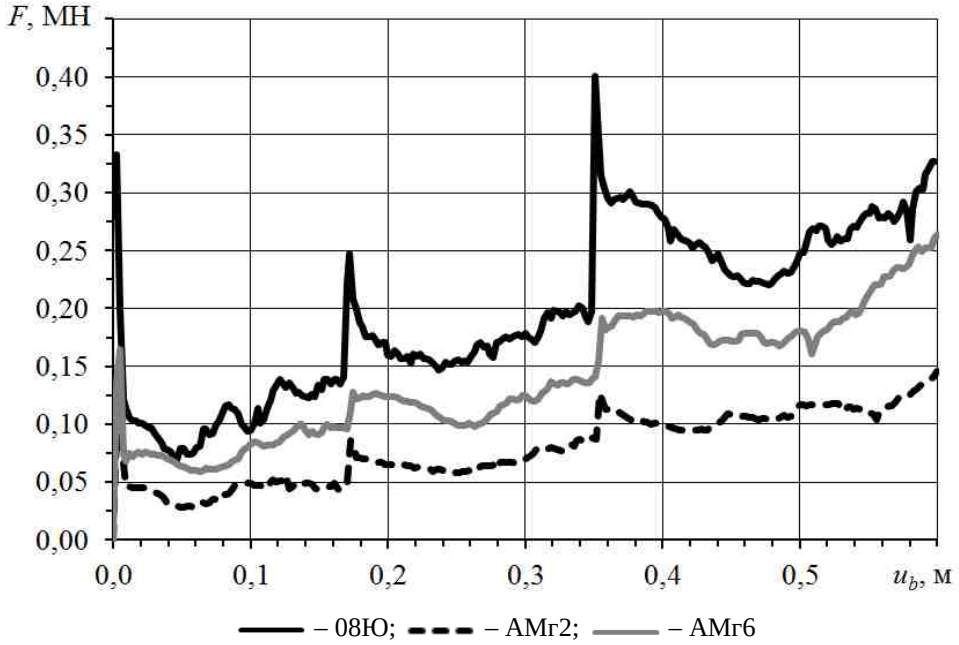


Рис. 6 – Залежності контактного зусилля F між ППЕ ВР, виготовленим із різних матеріалів, та бойком від переміщень u_b при їх зіткненні

Як видно на рис. 6, найбільший рівень контактного зусилля, а відповідно і енергоємності, характерні для базової конструкції ППЕ ВР, а найменший – для конструкції ППЕ ВР із алюмінієвого сплаву АМг2.

Поставлену задачу вибору товщин пластин конструкцій ППЕ, виготовлених з алюмінієвих сплавів, розв’язано методом послідовних ітерацій [72]. Розглянуто функцію $F_t(s_t)$, що визначається формулою

$$F_t(s_t) = E_b(s_b) - E_t(s_t),$$

де $E_b(s_b)$ – енергоємність базової конструкції, що отримується розрахунковим шляхом при розв'язанні задачі її пластичного деформування; $E_t(s_t)$ – енергоємність конструкції з іншого матеріалу; s_b – параметр, що визначає товщину пластин базової конструкції; s_t – параметр, що визначає товщину пластин конструкції з іншого матеріалу.

Параметр s_{t+1} на наступному кроці $t+1$ визначається формулою [20]

$$s_{t+1} = s_t + F_t(s_t) \cdot \frac{s_t - s_{t-1}}{E_t(s_t) - E_t(s_{t-1})}.$$

На першій ітерації товщина пластин конструкції з іншого матеріалу дорівнює товщині пластин базової конструкції (0,8 мм), на попередньому кроці $s_{t-1} = 0$, $E_t(s_{t-1}) = 0$.

Розглянуто пластичне деформування конструкцій пристроїв ППЕ 1, ППЕ 3, ППЕ ВР при зіткненні з бойком масою 80 т зі швидкістю 36 км/год. Вибір товщини пластин всіх вищевказаних конструкцій ППЕ, виготовлених із різних матеріалів, виконано згідно з [21]. Враховано, що допустиме значення відхилення енергоємності конструкції, виготовленої з іншого матеріалу, від енергоємності базової конструкції складає 5 %.

Результати вибору товщин пластин конструкцій ППЕ ВР, виготовлених з алюмінієвих сплавів АМг2 та АМг6, приведено в табл. 2 та табл. 3.

Таблиця 2 – Результати вибору товщин пластин конструкції ППЕ ВР, виготовленої з алюмінієвих сплавів АМг2

№ ітерації	Товщина пластин, мм	Енергоємність, МДж	Відхилення, %
0	0,0	0	100,0
1	0,8	0,05	59,2
2	2,0	0,16	32,6
3	1,5	0,11	9,2
4	1,6	0,12	0,3

Таблиця 3 – Результати вибору товщин пластин конструкції ППЕ ВР, виготовленої з алюмінієвих сплавів АМг6

№ ітерації	Товщина пластин, мм	Енергоємність, МДж	Відхилення, %
0	0,0	0,00	100,0
1	0,8	0,08	28,4
2	1,1	0,12	1,5

Діаграми, що характеризують залежності контактного зусилля між бойком та конструкцією ППЕ ВР з визначеними параметрами для розглянутих матеріалів від поздовжнього переміщення u_b центру мас бойка в порівнянні з діаграмою базової конструкції, наведено на рис. 7 та рис. 8.

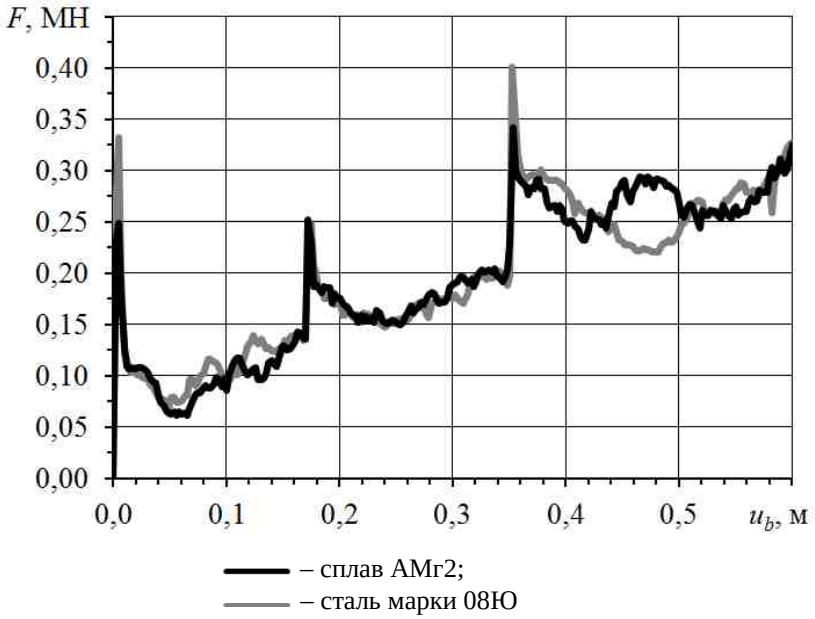


Рис. 7 – Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ ВР від переміщень u_b при зіткненні (базова конструкція ППЕ ВР та конструкція ППЕ ВР із сплаву АМг2 з товщиною пластин 1,6 мм)

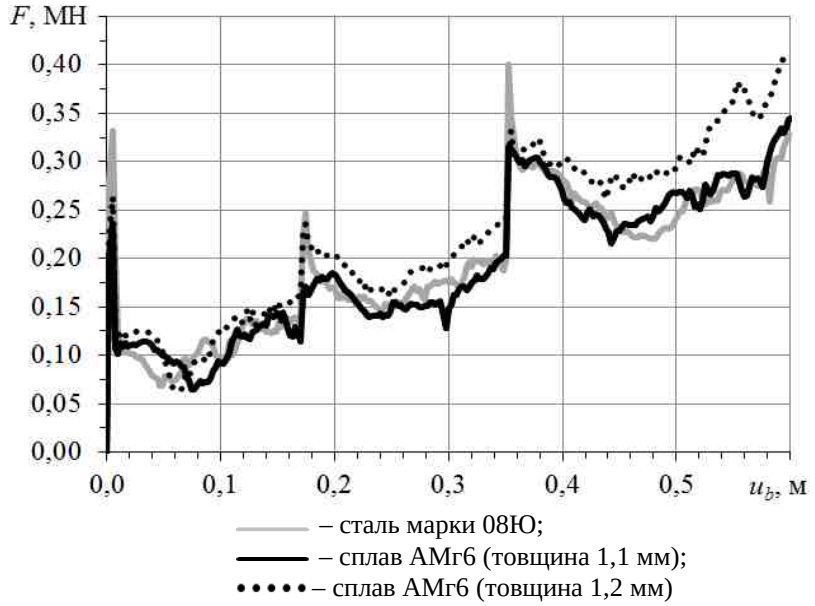


Рис. 8 – Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ ВР від переміщень u_b при зіткненні (базова конструкція ППЕ ВР та конструкція ППЕ ВР із сплаву АМг6 з товщиною пластин 1,1 мм та 1,2 мм)

Як видно з приведених рисунків, робота ППЕ ВР з обраними параметрами ідентична роботі базової конструкції. Згідно сортаменту листів алюмінієвих сплавів [21], листів товщиною 1,1 мм немає, найближчим до цього є лист з товщиною 1,2 мм.

Аналогічний вибір товщин пластин зроблено для ППЕ 1. В базовій конструкції товщина пластин, які формують шестигранні стільникові чарунки в елементі 1, – 0,6 мм, товщина пластин, що утворюють тригранні чарунки в елементі 2, – 2,2 мм. Отримані в результаті розрахунків залежності контактного зусилля F між конструкцією ППЕ ВР, яку виготовлено із різних матеріалів, та бойком масою 80 т від переміщень u_b при їх зіткненні зі швидкістю 36 км/год приведено на рис. 9.

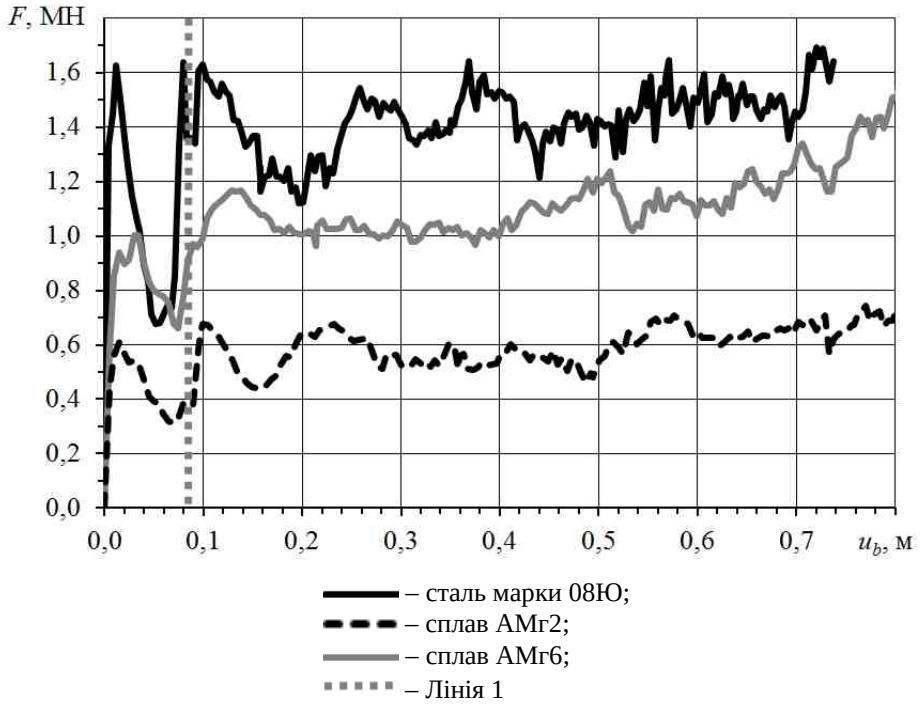


Рис. 9 – Залежності контактного зусилля F між ППЕ 1 із різних матеріалів та бойком від переміщень u_b при їх зіткненні

Наведену на рис. 9 діаграму умовно можливо розділити лінією 1 на дві частини, які характеризують послідовне деформування елементів 1 та 2. Задачу пошуку товщин розділено на дві задачі. На першому етапі виконується пошук товщини пластин основного елемента 2, а потім елемента 1 з урахуванням знайденої на попередньому етапі товщини пластин елемента 2. Результати вибору товщин пластин конструкції ППЕ 1, виготовленої з алюмінієвих сплавів АМг2 та АМг6, приведено в табл. 4 – табл.6.

Таблиця 4 – Результати вибору товщин пластин елемента 2 конструкції ППЕ 1, виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг6

№ ітерації	Товщина пластин, мм	Енергоємність, МДж	Відхилення, %
0	0,0	0	100,0
1	2,2	0,72	23,5
2	3,0	0,92	2,2

Таблиця 5 – Результати вибору товщин пластин елемента 1 конструкції ППЕ 1, виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг6

№ ітерації	Товщина пластин, мм	Енергоємність, МДж	Відхилення, %
0	0,0	0	100,0
1	0,6	0,065	13,1
2	0,7	0,073	1,8

Таблиця 6 – Результати вибору товщин пластин елемента 2 конструкції ППЕ 1, виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг2

№ ітерації	Товщина пластин, мм	Енергоємність, МДж	Відхилення, %
0	0,0	0	100,0
1	2,2	0,39	59,1
2	5,4	0,96	1,4

Як видно з табл. 6, товщина пластин елемента 2 конструкції ППЕ 1, виготовленої з алюмінієвого сплаву АМг2, складає 5,4 мм. При цьому змінюється характер деформування елемента 2, а контактна сила досягає 3 МН. Таким чином використання сплаву АМг2 в конструкції ППЕ 1 є неприйнятним, тому надалі розглянуто використання для конструкції ППЕ 1 матеріалу АМг6. Для елемента 1 ППЕ 1, виготовленого з алюмінієвого сплаву АМг6, обрано товщину пластин 0,7 мм, а для основного елемента 2 – 3,0 мм. Енергоємність ППЕ 1, виготовленого з матеріалу АМг6, дорівнює 0,98 МДж, робочий хід 0,7 м. Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ 1 (базова конструкція та конструкція із сплаву АМг6 з товщиною 0,7 мм пластин елемента 1 та товщиною 3,0 мм пластин елемента 2) від переміщень u_b при зіткненні приведено на рис. 10.

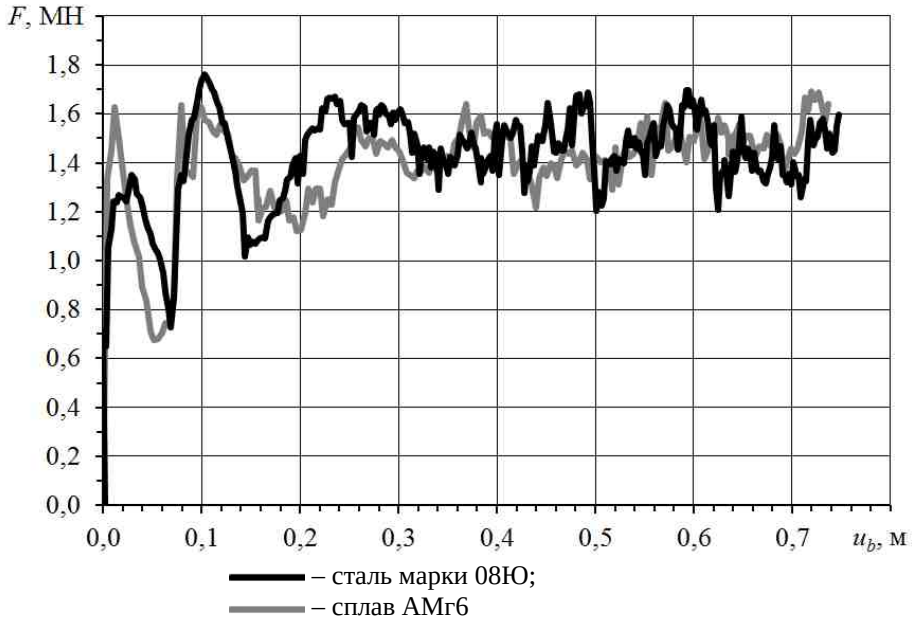


Рис. 10 – Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ 1 від переміщень u_b при зіткненні

Аналогічний вибір товщин пластин зроблено для ППЕ 3, призначеного для установки в міжвагонних з'єднаннях проміжних вагонів масою 64 т. Визначено товщину пластин стільників ППЕ 3, виготовленого з алюмінієвого сплаву АМг6. Вона складає 0,8 мм замість 0,7 мм для базової конструкції. Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ 3 від переміщень u_b при зіткненні (базова конструкція ППЕ 3 та конструкція ППЕ 3 із сплаву АМг6 з товщиною пластин 0,8 мм) наведено на рис. 11.

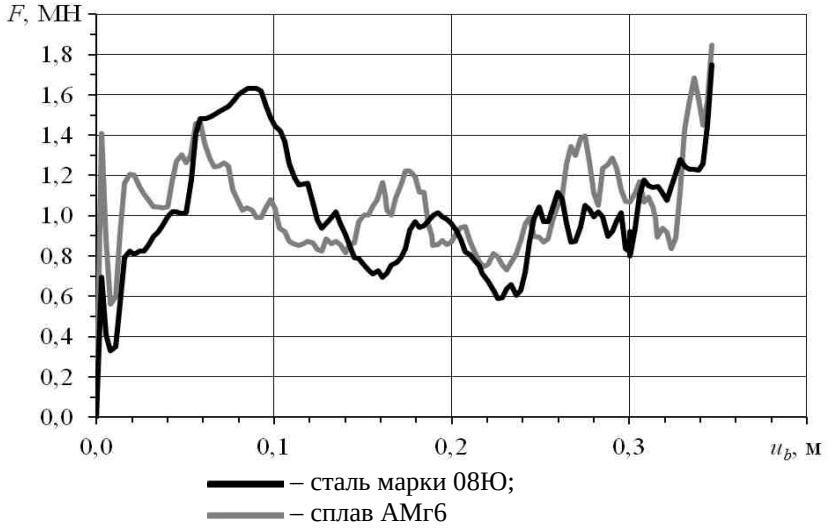


Рис. 11 – Залежності контактного зусилля F між бойком та ППЕ 3 від переміщень u_b при зіткненні

Таким чином, встановлено можливість заміни матеріалу базових конструкцій ППЕ 1, ППЕ 3 та ППЕ ВР зі сталі марки 08Ю на алюмінієві сплави АМг2 та АМг6. Результати можливої заміни приведено в табл. 7.

Таблиця 7 – Результати можливої заміни сталі марки 08Ю алюмінієвими сплавами при виготовленні конструкцій ППЕ 1, ППЕ 3 та ППЕ ВР

ППЕ	Товщина пластин		
	базової конструкції, мм	конструкції з АМг2, мм	конструкції з АМг6, мм
ППЕ 1, елемент 1	0,6	–	0,7
ППЕ 1, елемент 2	2,2	–	3,0
ППЕ 3	0,7	–	0,8
ППЕ ВР	0,8	1,6	1,2

В результаті виконаних досліджень розроблено наступні рекомендації щодо пасивного захисту головного вагона згідно з ДСТУ EN 15227:

– інтегрувати в конструкцію головного вагона зсувні автозчепи з енергополинаючими елементами, скидачку, ППЕ з протипідйомними пристроями у лобовій та хвостовій частинах вагона;

– розробити конструкції кузова та рами вагона, які дозволять без втрати їх несучої здатності забезпечити роботу ППЕ при ударі. Ці конструкції повинні мати посилені елементи, щоб забезпечити наявність зони безпеки для виживання та евакуації пасажирів та машиніста;

– розмістити два ППЕ нижнього рівня (на рівні автозчепу) з загальною енергоємністю порядку 2 МДж в лобовій частині головного вагона, два ППЕ верхнього рівня (у підвіконній частині кабіни машиніста) з загальною енергоємністю порядку 0,25 МДж та два ППЕ нижнього рівня з загальною енергоємністю порядку 0,6 МДж у хвостовій частині головного вагона;

– використати в якості пристроїв поглинання енергії нижнього рівня для лобової частини головного вагона розроблені конструкції ППЕ 1, що мають енергоємність 0,95 МДж, робочий хід 0,7 м. Конструкція ППЕ 1 включає два послідовно розташованих елементи. Елемент 1 – короб з одношаровим пакетом шестигранних стільників всередині. Елемент 2 – це усічена піраміда, що складається із стільників з трикутними чарунками;

– використати в якості пристроїв поглинання енергії нижнього рівня для хвостової частини головного вагона розроблені на основі елемента 1 конструкції ППЕ 2, що мають енергоємність 0,25 МДж, робочий хід 0,3 м, або ППЕ 3, що мають енергоємність 0,3 МДж, робочий хід 0,3 м, в залежності від мас проміжних вагонів швидкісного моторвагонного поїзда. Якщо маса проміжного вагона дорівнює 50 т, то доцільно використовувати ППЕ 2, якщо 64 т – ППЕ 3;

– використати в якості пристроїв поглинання енергії верхнього рівня для підвіконної частини кабіни машиніста розроблені на основі елемента 2 у вигляді трьох ступенів ППЕ ВР, що мають енергоємність 0,12 МДж, робочий хід 0,6 м;

– пристрої пасивного захисту ППЕ 1 та ППЕ ВР доцільно розміщувати в лобовій частині за запропонованими схемами 1 або 2, які дозволять забезпечити виконання вимог стандарту ДСТУ EN 15227;

– для виготовлення конструкцій запропонованих пристроїв поглинання енергії доцільно використовувати сталь марки 08Ю або алюмінієвий сплав АМг6, який має високі пластичні властивості, низьку густину та високу інертність до агресивного зовнішнього середовища. Для ППЕ ВР можливим є використання також і алюмінієвого сплаву АМг2;

– рекомендовано при виготовленні запропонованих пристроїв поглинання енергії зі сталі марки 08Ю обирати наступні товщини пластин для елемента 1 ППЕ 1 – 0,6 мм, елемента 2 ППЕ 1 – 2,2 мм, для ППЕ 2 – 0,6 мм, для ППЕ 3 – 0,7 мм, для ППЕ ВР – 0,8 мм;

– рекомендовано при виготовленні запропонованих пристроїв поглинання енергії з алюмінієвого сплаву АМг6 обирати наступні параметри, зокрема товщини пластин для елемента 1 ППЕ 1 – 0,7 мм, елемента 2 ППЕ 1 – 3,0 мм, для ППЕ 3 – 0,8 мм, для ППЕ ВР – 1,2 мм.

Висновки. Розроблено науково-методичне забезпечення та скінченно-елементні моделі для дослідження пружно-пластичного деформування конструкцій ППЕ, що містять стільники, при ударі.

На основі розроблених математичних моделей проведено аналіз впливу параметрів конструкцій ППЕ ВР на силові характеристики взаємодії головного вагона з перешкодами згідно сценаріїв зіткнень, прописаних у

ДСТУ EN 15227. Визначено раціональні параметри ППЕ ВР, виготовленого зі сталі марки 08Ю.

Встановлено можливість використання для виготовлення конструкцій ППЕ 1, ППЕ 3 та ППЕ ВР замість сталі марки 08Ю алюмінієвого сплаву АМг6, а для ППЕ ВР – ще й алюмінієвого сплаву АМг2. Визначено параметри конструкцій розглянутих ППЕ, виготовлених з алюмінієвих сплавів.

Розроблено рекомендації щодо пасивного захисту головного вагона згідно з ДСТУ EN 15227.

Розроблені науково-методичне забезпечення, математичні моделі та рекомендації можуть бути використані на етапі проєктування головного вагона нового покоління згідно з вимогами ДСТУ EN 15227.

1. ДСТУ EN 12663-1:2018 (EN 12663-1:2010 + A1:2014, IDT). Залізничний транспорт. Структурні вимоги органів залізничного транспорту. Частина 1. Локомотиви та пасажирський рухомий склад (і альтернативний метод для вантажних вагонів). 2018. 18 с.
2. ДСТУ EN 15227:2015 (EN 15227:2008+A1:2010, IDT). Залізничний транспорт. Вимоги до ударостійкості рейкових транспортних засобів. 2016. 37 с.
3. *Wingler F.* Crash-energy managenent, Part II. URL: http://www.drwingler.com/wp-content/uploads/2016/08/Crash-Energy-Management.pdf (дата звернення: 23.05.2022).
4. *Шаад Ф.* Электропоезд серии ЭПМ. URL: http://history.rw.by/lokomotivy/epm/ (дата звернення: 23.05.2021).
5. Электропоезд TRAVERSO для Швейцарии представлен на выставке InnoTrans 2018. Железные дороги мира. 2018. № 12. С. 23–32.
6. Alstom Coradia Regional Trains. URL: https://www.railway-technology.com/projects/alstom-coradia-regional-trains/ (дата звернення: 23.05.2021).
7. Новый электропоезд для железных дорог Германии. Железные дороги мира. 2008. № 9. С. 48–55.
8. *Roberts J., Fraikin B., Leveque D.* Development and validation of a regional train platform to the requirements of EN 15227. Passive Safety of Rail Vehicles. Innovation in passive safety and interior design: the 7th International Symposium Passive Safety in Berlin on 20 – 21.11.2008: symposium proceedings. Berlin: IFV Bahntechnik e.V., 2008. Vol. 17. P. 237–248.
9. *Banko F. P., Xue J. H.* Pioneering the Application of High Speed Rail Express Trainsets in the United States. New York. Parsons Brinckerhoff Group Inc. One Penn Plaza, 2012. 328 p.
10. *Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
11. *Sobolevska M, Horobets D, Syrota S* Development of passive protection devices for a power head of a high-speed multiple unit train at its collisions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012016
12. *Sobolevska M., Telychko I.* Passive safety of high-speed passenger trains at accident collisions on 1520 mm gauge railways. Transport problems. 2017. V. 12. Issue 1. P. 51–62. https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.5
13. *Соболевская М. Б., Сирота С. А., Горобец Д. В., Теличко И. Б.* Натурные ударные испытания опытного образца устройства поглощения энергии, предназначенного для пассивной защиты локомотива при столкновениях. Техническая механика. 2016. № 2. С. 91–105.
14. *Соболевська М. Б., Науменко Н. Ю., Горобець Д. В.* Математичне моделювання динамічної навантаженості головного вагона з системою пасивної безпеки при зіткненні ідентичних моторвагонних поїздів. Технічна механіка. 2020. № 2. С. 66–79. https://doi.org/10.15407/itm2020.02.066
15. *Соболевська М. Б., Науменко Н. Ю., Горобець Д. В.* Аналіз динамічної навантаженості екіпажів моторвагонного швидкісного поїзда з системою пасивної безпеки при його зіткненні з вантажним вагоном. Технічна механіка. 2020. № 3. С. 79–90. https://doi.org/10.15407/itm2020.03.079
16. *Соболевська М. Б., Горобець Д. В.* Оцінка динамічної навантаженості екіпажів моторвагонного поїзда з системою пасивної безпеки при його зіткненні з великим транспортним засобом. Технічна механіка. 2022. № 1. С. 51–66. https://doi.org/10.15407/itm2022.01.051
17. *Krieg R. D., Key S. W.* Implementation of a time independent plasticity theory into structural computer programs. Vol. 20 of Constitutive equations in viscoplasticity: computational and engineering aspects. New York: *18.* ASME, 1976. P. 125–137.
18. *Саймондс П. С.* Динамика неупругих конструкций. М.: Мир, 1982. 224 с.
19. *Cowper G. R., Symonds P. S.* Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams. Providence: Brown University, 1958. P. 46. https://doi.org/10.21236/AD0144762
20. *Гилл Ф.*, Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
21. ГОСТ 21631-2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Прийнятий МДР. М.: Стандартинформ, 2019. 32 с.

Отримано 23.05.2022,
в остаточному варіанті 14.06.2022