7УДК 519.95:681.3.03 https://doi.org/10.15407/itm2020.04.109

О. Ф. ЛЕДНЯНСЬКИЙ[1], С. П. БІСИК[2], А. Ф. САНІН[1], В. П. ПОШИВАЛОВ[3]

ВИЗНАЧЕННЯ ПРИДАТНОСТІ ПОРИСТИХ ПРЕСОВОК З АЛЮМІНІЮ ТА АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЯКОСТІ ЕНЕРГОПОГЛИНАЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ

[1]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна; e-mail: tmodnar@mail.ru

[2]Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки Збройних Сил України,
Повітрофлотський проспект, 28, 03049, м. Київ, Україна; e-mail: cndi_ovt@mil.gov.ua

[3]Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: office.itm@nas.gov.ua

В роботі проведено експериментальні дослідження щодо визначення придатності пористих пресовок з алюмінієвих сплавів для використання у системах пасивної безпеки.

Для виготовлення пористих пресовок застосовувалися порошки алюмінію та алюмінієвих сплавів. Розміри часток порошку складали до 200 мкм. Пресування здійснювалося на гідравлічному пресі. Зміна пористості зразків забезпечувалася зміною тиску у гідросистемі пресу і зусилля пресування. Спікання зразків не проводилося. Пластифікатор не додавався. В даному експерименті для з'ясування, яка характеристика зразка, маса чи пористість, має більше значення, використовувалися зразки однакової маси (відхилення не перевищувало (2,7 – 2,8) % від розрахункового значення 0,01 кг).

Для визначення здатності пористих пресовок з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів поглинати енергію удару використовувався вертикальний копер. Маса падаючих частин копра (баби) складала 22,5 кг (вага 220 Н), швидкість падіння – 5 м/с, енергія падіння 300 Дж.

Здатність пористих пресовок з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів поглинати енергію удару виявлялася шляхом порівняння прискорень та висоти відскоку падаючих частин копра з використанням пресовок з розрахунковими значеннями цих величин в разі вільного падіння баби.

Експерименти показали, що застосування зразків з максимальною пористістю дозволяє зменшити енергію удару на величину роботи їх пластичної деформації і руйнування.

Порівняння ефективності спрацювання різних зразків продемонструвало, що здатність до поглинання енергії збільшується зі збільшенням пористості елемента.

Проведені експериментальні дослідження встановили, що пористі пресовки з алюмінію та алюмінієвих сплавів придатні для використання в якості енергопоглинаючих елементів систем пасивної безпеки комерційних транспортних засобів та бойових броньованих машин, а для визначення здатності пористих заповнювачів, зокрема пористих пресовок з алюмінію та алюмінієвих сплавів, можна використовувати вертикальні копри. Застосування пористих пресовок з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів в якості енергопоглинаючого матеріалу дозволяє зменшити прискорення від удару у 30 – 85 разів при швидкості удару до 5 м/с. На здатність зменшувати прискорення при ударі більше впливають розміри і пористість пресовки, ніж її маса. Найкращим чином зменшують величину прискорень при ударі пресовки з максимальною пористістю, в яких енергія удару витрачається на роботу пластичної деформації та руйнування.

***Ключові слова**: пористі пресовки з алюмінієвих сплавів, енергія удару, ударна в'язкість. енергопоглинаючі елементи, вертикальні копри.*

This work reports the results of experimental studies on the applicability of porous pressings of aluminum alloys to passive safety systems.

The porous pressings were made from aluminum and aluminum alloy powders with a particle size up to 200 μm using a hydraulic press. The porosity was varied by varying the pressure in the press hydrosystem and the pressing force. The specimens were not sintered, and no plasticizer was added. To determine which specimen characteristic, the mass or the porosity, is more important, specimens of the same mass (0.01 kg) were used [the deviation did not exceed (2.7 – 2.8) %].

To determine the impact absorption ability of the porous pressings of aluminum and aluminum alloy powders, a vertical impact testing machine was used. The ram mass was 22.5 kg (weight 220 N), the fall speed was 5 m/s, and the fall energy was 300 J.

The impact absorption ability of the porous pressings was determined by comparing the accelerations and rebound height of the ram in the presence of a porous pressing with their calculated free-fall values.

The experiments showed that the use of specimens of maximum porosity decreases the impact energy by the value of the plastic work of deformation and the fracture energy.

A comparison of the performance of different specimens showed that the energy absorption ability increases with porosity.

As demonstrated by the experiments, porous pressings of aluminum and aluminum alloys can be used as energy-absorbing elements of passive safety systems for commercial and armored combat vehicles, and the impact absorption ability of porous fillers, in particular porous pressings of aluminum and aluminum alloys, can be de-

termined using vertical impact testing machines. Using porous pressings of aluminum and aluminum alloys as an energy-absorbing material decreases the impact acceleration by a factor of 30 to 85 at an impact speed up to 5 m/s. The ability of a pressing to reduce the impact acceleration depends on its dimensions and porosity to a greater extent than on its mass. The greatest decrease in impact acceleration is provided by porous pressings of maximum porosity, in which the impact energy is converted to the plastic work of deformation and the fracture energy.

Keywords: *porous pressings of aluminum alloys, impact energy, impact strength, energy-absorbing elements, vertical impact testing machines*.

У сучасних транспортних засобах, таких як залізничні локомотиви і вагони, трамвайні вагони, широко використовуються системи пасивної безпеки. Їх наявність є обов'язковою у відповідності з державними та міждержавними стандартами, такими як EN 15227, ДСТУ EN 15227, AAR S-580 [1 – 4]. Системи пасивної безпеки є і в конструкції літаків, вертольотів, автомобілів. У комерційних транспортних засобах системи пасивної безпеки призначені для збереження життя і здоров'я екіпажу і пасажирів, а також для збереження обладнання, розміщеного всередині, при зіткненні з іншим транспортним засобом або масивною перешкодою [3]. У випадку аварії подальша експлуатація пошкодженого транспортного засобу, як правило, припиняється до відновлення його технічного стану. В той же час бойові броньовані машини (ББМ) повинні захищати життя і здоров'я екіпажу і десанту (пасажирів) і зберігати боєздатність не тільки при зіткненні з іншим транспортним засобом або ББМ чи перешкодою, а і при дії високошвидкісних пенетраторів (кулі, осколки, снаряди тощо) і фронту підвищеного тиску суцільного середовища (ударна або вибухова хвиля) [5, 6]. Окрім того ББМ може в результаті зіткнення руйнувати певні перешкоди. Броня захищає як від засобів ураження противника, так і при ударах ББМ в штучні та природні перешкоди. Всі наведені вище види впливу на транспортний засіб або ББМ об'єднуються назвою «ударно-хвильова дія». Сутність ударно-хвильової дії полягає у зміні швидкості або порушенні цілісності об'єкту. Під час зміни енергетичного стану об'єкт стає неінерційною системою, в якій починають діяти сили інерції, що обумовлені прискореннями. Величина прискорення визначається часом існування об'єкту як неінерційної системи.

Захист від такої дії може бути здійснений різними способами, які можуть бути застосовані окремо або комплексно, використовуватися одночасно чи послідовно в залежності від виду навантаження і конструкції і призначення системи пасивної безпеки [5]:

– поглинання енергії удару за рахунок пластичної деформації основних чи спеціально призначених для цього (жертовних) елементів конструкції корпусу (робота пластичної деформації) – жертовні зони транспортних засобів, захисних протимінних екранів, протимінних сидінь та ін. [1 – 4, 7];

– розсіювання енергії удару за рахунок пружної деформації спеціально призначених для цього елементів корпусу (робота пружної деформації) – пристрої зчеплення вагонів і локомотивів, пружні захисні протимінні екрани, пружні кріплення сидінь та ін. [8, 9];

– поглинання енергії удару за рахунок руйнування спеціально призначених для цього елементів конструкції корпусу або кріплень обладнання чи сидінь для людей – краш-бокси (робота руйнування і розрив кінематичних і силових зв'язків, через які передається навантаження) [7, 10];

– руйнування пенетратора або перешкоди (в цьому випадку вся енергія удару передається на ББМ або транспортний засіб) [5].

Всі ці способи, крім останнього, спрямовано на зменшення кількості переданої об’єкту енергії та збільшення тривалості процесу передачі енергії.

Найбільш небезпечними для комерційних транспортних засобів є зіткнення з перешкодами або іншими транспортними засобами [1 – 4, 9], а для ББМ – підрив на мінно-вибухових пристроях [6, 11]. Для збереження життя і здоров’я людей, а також цілісності основної несучої конструкції транспортного засобу або ББМ необхідно максимально зменшити частку енергії удару, яка передається на основний корпус і те, що розташоване всередині нього. Найбільш ефективним засобом для цього є жертовні елементи, які піддаються пластичній деформації під час ударно-хвильової дії. Такі елементи, найчастіше, мають коробчасту форму і стільникову конструкцію [9, 12]. Для виготовлення власне конструкцій використовуються металеві матеріали з високою пластичністю і ударною в’язкістю [5, 9], наприклад, низьковуглецеві сталі та алюмінієві сплави системи Al-Mg [5, 12]. Для найбільш ефективного виконання своїх функцій стільникові конструкції повинні бути заповнені пористим заповнювачем, здатність якого поглинати енергію за рахунок власної пластичної деформації набагато більша, ніж в компактного металевого матеріалу [14]. В якості пористих заповнювачів можуть бути використані різні матеріали, наприклад, пінополіуретан, газобетон, спінений алюміній [12, 14] та інші. Одним з перспективних наповнювачів для коробчастих або стільникових конструкцій систем пасивної безпеки транспортних засобів є пористі пресовки з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів. На сьогодні відсутні дані щодо спроможності пористих пресовок з алюмінію та алюмінієвих сплавів поглинати енергію удару за різних умов.

Для визначення фізико-механічних характеристик матеріалів пористих заповнювачів необхідно розробити методику випробувань зразків пористих елементів, які призначені для використання у системах пасивної безпеки. Для випробувань матеріалів з високою здатністю до поглинання енергії удару найбільш ефективні вертикальні копри [15]. Оцінка придатності матеріалу для застосування в якості пористого заповнювача в енергопоглинаючих конструкціях може бути здійснена шляхом вимірювання значень прискорення падаючих частин (баби) копра при ударі по зразку, який розміщений на основі копра, і при ударі по основі без зразка.

Метою даної роботи є визначення придатності пористих пресовок з алюмінієвого сплаву для використання у системах пасивної безпеки, вибір чи розробка методики випробувань зразків пористих заповнювачів стільникових конструкцій таких систем.

Для виготовлення пористих пресовок застосовувалися порошки алюмінієвого сплаву АД 33. Розміри частинок порошку – від 1 до 200 мкм. Пресування здійснювалося на гідравлічному пресі у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара. Зміна пористості зразків забезпечувалася зміною тиску у гідросистемі пресу і зусилля пресування. Спікання зразків не проводилося. Пластифікатор не додавався. В даному експерименті використовувалися зразки однакової маси (відхилення не перевищувало (2,7 – 8) % від розрахункового значення 0,01 кг). Зразки наведені на рисунку 1.

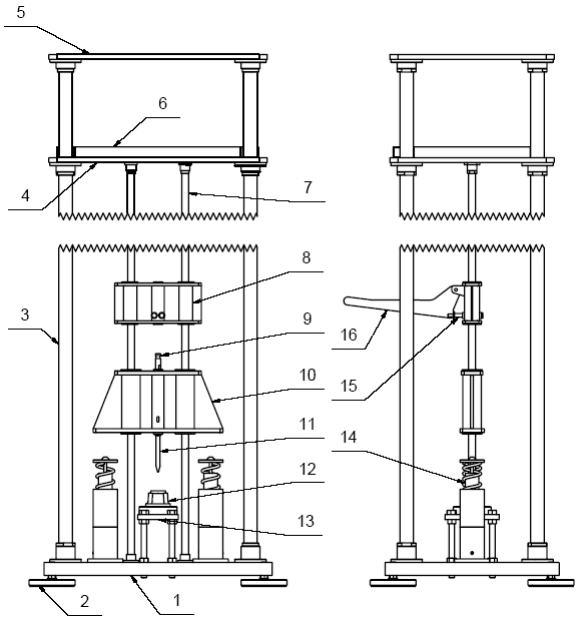
Рис. 1 – Зразки пресовок з алюмінієвого сплаву до випробувань

Характеристики зразків, які були використані в експерименті, наведено у таблиці 1.

Табл. 1 – Габаритні розміри, маса, густина і пористість зразків, використаних в експерименті

№	Маса зразка, кг	Висота, мм	Діаметр, мм	Розрахункова густина, кг/м^3	Пористість, %
1	0,01027	35,50	15,03	1631,38	41
2	0,01028	28,42	15,05	2034,35	26
3	0,01010	35,00	15,03	1627,29	41
4	0,09980	34,43	15,04	1632,41	40
5	0,01001	28,17	15,04	2001,16	27

Для визначення здатності пористих пресовок з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів поглинати енергію удару був застосований вертикальний копер, схема якого наведена на рисунку 2. Маса падаючих частин (баби) копра – 22,5 кг (вага 220 Н), швидкість падіння – 5 м/с, енергія падіння 300 Дж. Випробування проводилися в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка Національної академії наук України. Детальний опис наведено в роботі [16].



1 – основа; 2 – опора; 3 – стійка; 4 – плита жорсткості; 5 – верхня плита жорсткості; 6 – ребро жорсткості; 7 – напрямна; 8 – траверса; 9 – тяга баби; 10 – баби; 11 – ударник; 12 – опора зі зразком; 13 – стіл опори; 14 – амортизатор; 15 – замок; 16 – ручка скидання

Рис. 2 – Принципова схема вертикального копра

Рис. 3 – Вертикальний копер з датчиками прискорень DYTRAN і встановленим зразком

Здатність пористих пресовок з порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів поглинати енергію удару виявлялася шляхом порівняння прискорень та висоти відскоку падаючих частин копра з використанням пресовок та без них в разі вільного падіння баби. Зразки 1, 2, 4, 5 встановлювалися вертикально (як показано на рисунку 3), а зразок 3 – горизонтально. Результати випробувань пресовок наведені в таблиці 2.

Табл. 2 – Результати випробувань пресовок

№	Висота падіння, м	Розрахункова швидкість падіння, м/с	Розрахункова енергія падіння, Дж	Розрахунковий час падіння, с	Значення напруги, mV	Прискорення, g	Висота зразка після удару, мм	Зміна висоти , %	Розрахункове значення прискорення при ударі копром	Ефективність, (у скільки разів зменшилося прискорення)
1	0,8	3,961	176,518	0,404	63,85	66,8			5683,40	85,1
2	0,6	3,430	132,388	0,350	135,10	141,3	20,9	26,5	4508,18	31,9
3	0,6	3,430	132,388	0,350	202,10	211,4			4508,18	21,3
4	0,6	3,430	132,388	0,350	85,84	89,8			4508,20	50,2
5	0,3	2,426	66,194	0,247	81,61	85,4	24,0	14,8	2745,40	32,2

Зразки 1, 3, 4 зруйнувалися, зразки 2 і 5 – зменшилися в розмірах (зменшилася висота). Найкращі результати з точки зору зменшення величини прискорень при ударі продемонстрував зразок 1, який має максимальну пористість. Застосування зразків з максимальною пористістю дозволяє зменшити енергію удару на величину роботи їх пластичної деформації і руйнування. Зразок 3, який має пористість близьку до зразка 1, але був розташований горизонтально, показав найгірші результати. З цього можна зробити висновок, що на здатність поглинати енергію удару більше впливає пористість і габаритні розміри, ніж маса зразка. Порівняння ефективності спрацювання зразків 1 і 4 демонструє, що чим вища швидкість і більша енергія удару, тим більше пористий елемент зменшує прискорення падаючих частин копра і, відповідно, краще поглинає енергію удару.

Рис. 4 – Зруйнований зразок

Рис. 5 – Зовнішній вигляд зразків 2 і 5 після випробувань (порівняння зі зруйнованими зразками)

Таким чином, проведені експерименти дозволили встановили наступне. Пористі пресовки з алюмінію та алюмінієвих сплавів можуть бути придатні для використання в якості енергопоглинаючих елементів систем пасивної безпеки комерційних транспортних засобів та бойових броньованих машин. Для визначення здатності пористих заповнювачів, зокрема пористих пресовок з алюмінію та алюмінієвих сплавів, поглинати енергію удару придатні вертикальні копри.

Висновки. Розроблена методика випробувань зразків пористих елементів для визначення придатності пористих пресовок у системах пасивної безпеки. Проведені експерименти показали перспективність використання для систем пасивної безпеки транспортних засобів енергопоглинаючих матеріалів на основі порошків алюмінію та алюмінієвих сплавів.

Використання вертикального копра дозволяє визначити, як позначається на величині прискорення при ударі наявність енергопоглинаючого елемента у вигляді пористої пресовки з алюмінію або алюмінієвого сплаву.

1. *Соболевская М. Б., Сирота С. А.* Основные положения концепции пассивной защиты скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2015. № 1. С. 84–96.
2. *Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Сирота С. А.* Определение характеристик препятствий для нормативных сценариев столкновений пассажирских поездов. Техническая механика. 2018. № 2. С. 90–102. https://doi.org/10.15407/itm2018.02.090
3. *Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Маркова О. М., Ковтун Е.Н., Горобец Д. В., Малый В. В., Сирота С. А., Хижа И. Ю.* Разработка решений по повышению безопасности железнодорожных перевозок и пассивной защите пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Техническая механика. 2018. № 3. С. 98–111. https://doi.org/10.15407/itm2018.03.098
4. *Соболевская М. Б., Горобец Д. В.* Анализ взаимодействия пассажирского поезда с системой пассивной безопасности и большого дорожного транспортного средства при столкновении. Техническая механика. 2019. № 1. С. 94–106. https://doi.org/10.15407/itm2019.01.094
5. *Пошивалов В. П., Кузмицька А. І., Телегіна І. І.* Підвищення фізико-механічних характеристик сплавів системи Al-Mg для конструктивного захисту транспортних засобів. Технічна механіка. 2019. № 4. С. 119–126. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.119

6. *Давидовський Л. С., Бісик С. П.* Аналіз механогенезу травмування екіпажу бойових броньованих машин при підриві на мінно-вибухових пристроях. Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ Збройних Сил України. Львів. 2015. № 13. С. 34–40. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.13.2015.34-40.
7. *Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П.* Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2018. № 1 (53). С. 7–19.
8. *Бісик С. П., Чепков І. Б., Голуб В. А., Корбач В. Г.* Оцінка впливу способу кріплення протимінного екрана на протимінну стійкість бойових броньованих машин. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2013. № 1 (33). С. 8–12.
9. *Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Горобец Д. В., Богомаз Е. Г.* Разработка элементов пассивной защиты скоростных пассажирских локомотивов нового поколения при аварийных столкновениях на железных дорогах колеи 1520 мм. Техническая механика. 2017. №1. С.72–82. https://doi.org/10.15407/itm2017.01.072
10. *Давидовський Л. С., Бісик С. П., Корбач В. Г.* Дослідження енергопоглинаючого елемента протимінного сидіння екіпажу бойової броньованої машини. Озброєння і військова техніка. Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України. Київ. 2017. № 1. С. 24–33..
11. *Бісик С. П., Давидовський Л. С., Схабицький В. Р.* Критерії травмування організму людини при ударному та вибуховому навантаженні. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2015. № 1 (41). С. 153–159. DOI: http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2511.
12. *Бісик С. П.*, Голуб В. А., *Ларін О. Ю., Чеченкова О. Л.* Числове моделювання вибухового навантаження модульних стільникових конструкцій бойових броньованих машин. Вісник НТУ «ХПІ». Харків. 2013. № 23 (996). С.26–33.
13. *Кузьмицкая А. И., Жданов В. С., Пошивалов В. П.* Влияние мгновенного охлаждения на физико-механические свойства алюминиевого сплава АМг6 после высокотемпературной видержки. Техническая механика. 2016. № 2. С. 128–136.
14. *Бісик С. П.* Дослідження конструкції захисного протимінного екрана. Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного. 2015. № 12. С. 110–117. https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.110-117
15. *Батуев Г. С., Голубков Ю. В., Ефремов А. К., Федосов А. А.* Инженерные методы исследования ударных процессов. М. «Машиностроение», 1977. 240 с.
16. *Кондряков Е. А., Жмака В. Н., Бабуцкий А. А., Харченко В. В.* Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности. Надёжность и долговечность машин и сооружений. 2006. № 27. С.121–130.

Отримано 28.10.2020,
в остаточному варіанті 26.11.2020