

№3. **22.** Жмуденко А.С., Лют Г.М. Эксцентриковая выбивная решетка. Автор. СССР № 1144765, кл. В22D29/02, Б.И. 1985, №10. **23.** Цалик А.М., Гуральник И.И. Эксцентриковая выбивная решетка. Автор. СССР № 703236, кл. В22D29/02, Б.И. 1979, №46. **24.** Курочкин Л.В. Выбивная инерционная транспортирующая решетка. Автор. СССР № 1697978, кл. В22D29/02, Б.И. 1991, №46. **25.** Шифрин Л.М., Кружи И.И., Евласов Л.Н. и др. Устройство для выбивки форм. Автор. СССР № 1171201, кл. В22D29/00, Б.И. 1985, №29. **26.** Козулькевич М.Р., Э Королев Е.А., Ткаченко П.М., Федорук П.А. Инерционная решетка для выбивки форм. Автор. СССР № 799911, кл. В22D29/02, Б.И. 1981, №4. **27.** Тьмнев С.К., Драмов Б.Т., Стефанов С.В. и др. Инерционная стрыквача решетка. Автор. Болгария № 30050, кл. В22D29/02, Б.И. 1981, №4. **28.** Картов Ю.И., Картова Е.Ю. Выбивная транспортирующая решетка. Автор. СССР № 1488123, кл. С22D29/00, Б.И. 1989, №23. **29.** Горский А.И., Титов А.А., Бережанов И.П., Шапорин Д.И. Выбивная инерционная транспортирующая решетка. Автор. СССР № 840093, кл. В22D29/02, Б.И. 1981, №26. **30.** Ткаченко П.М. Инерционная транспортирующая решетка для выбивки форм. Автор. СССР № 1002090, кл. В22D29/00, Б.И. 1983, №9. **31.** Шифрин Л.М. и др. Выбивная инерционная решетка. Автор. СССР № 1235650, кл. В22D29/00, Б.И. 1986, №21. **32.** Милых Г.В. Вибрационная решетка. Автор. СССР № 1258605, Б.И. 1986 № 35 В22D 29/00. **33.** Deve Yagn. Shakeout and crasnings apparatus, Pat. USA, 241-7F/BD2C 17/02 №3897910. **34.** Jacob Herman Verfahren und Formasten und Zerklanera der dabei entsehenden Sandklollen, патент Германии, В22D 29/02 № 2522940, опубл. 9.09.76г. **35.** Musschoff Albert Vibratory conveyor with sound deadening means. Pat. USA, 198-220 BA(B656 27/00) №3770097 опубл. 6.11.1973г. **36.** Huspackrost for schwere GuBteile «Ind-Ans», 1978, 100, №28, 50. **37.** Сердюк Л.И. Основы теории, расчёт и конструирование управляемых вибрационных машин с дебалансными возбудителями. Дис. д-ра техн. наук: 05.02.02.01.02.06 / Харьков. Ордена Ленина и Ордена Октябр. рев-ии пол-ий ин-т им. В.И. Ленина. – Х: 1991. **38.** Установка для охлаждения и выбивки залитых форм. Заявка 59-1062. Япония, МКИ В22D 29/02, опубл. 06.01.84. **39.** Improved sand and casting separation at Casting Limited /Foundry Trade j/ 1981, 151, №3228, 964. **40.** Костенко Ю.В., Ткачук Н.А., Грабовский А.В., Ткачук Н.Н. Численный анализ влияния модели для определения силы ударного взаимодействия на характер динамических процессов в виброударных системах // Механіка та машинобудування. – 2012. – №2. – С. 34-48. **41.** Деляк Т.М., Нісонський В.П., Шона В.М. Дослідження динамічного режиму роботи віброграпки з урахуванням сил в язгою опору // Вісник НТУ «ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №22. – С.40-46.

Поступила в редколлегию 16.10.2012

УДК 623.438

С.П. БІСІК, к. т. н., нач. наук.-досл. лаб. Центральний наук.-досл. ін-та озброєння та військової техніки Збройних сил України (ЦНДІ ОВТ ЗСУ), Київ;
В.А. ГОЛУБ, к. т. н., с. н. с., нач. наук.-досл. від. ЦНДІ ОВТ ЗСУ, Київ;
О.Ю. ЛАРІН, к. т. н., докт. ЦНДІ ОВТ ЗСУ, Київ;
О.Л. ЧЕЧЕНКОВА, с. н. с. наук.-досл. від. ЦНДІ ОВТ ЗСУ, Київ

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ МОДУЛЬНИХ СОТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН

У роботі представлені результати математичного моделювання процесу підриву корпусу бойової броньованої машини на фугасних зарядах вибухової речовини. Проведена оцінка ефективності застосування енергопоглинаючих сотових конструкцій для підвищення рівня протимінної стійкості бойових броньованих машин за рахунок зменшення загальних прискорень корпусу та внутрішнього обладнання, що є основними уражаючими факторами вибуху при мінному підриві.

Ключові слова: бойова броньована машина, фугасний заряд, енергопоглинаюча сотова конструкція, уражаючий фактор

В работе представлены результаты математического моделирования процесса подрыва корпуса боевой бронированной машины на фугасных зарядах взрывчатого вещества. Проведена оценка

ефективності застосування енергопоглинаючих сотових конструкцій для підвищення рівня

© С.П. Бісік, В.А. Голуб, О.Ю. Ларін, О.Л. Чеченкова, 2013

противоминной устойчивости боевых бронированных машин за счет уменьшения общих ускорений корпуса и внутреннего оборудования, являющихся основными поражающими факторами взрыва при минном подрыве.

Ключевые слова: боевая бронированная машина, фугасный заряд, энергопоглощающая сотовая конструкция, поражающий фактор

The paper presents the results of mathematical modeling of the process of undermining of armored combat vehicles hull by explosive demolition charges. The efficiency of use of energy-absorbing honeycomb structures is estimated to enhance antimine stability of armored vehicles by reducing overall body and internal hardware accelerations, which are the main factors affecting the explosion at a mine blasting.

Keywords: fighting armored vehicle, explosive charge, energy-absorbing honeycomb structure, damaging factors

Актуальність теми та постановка завдання. За останні десятиріччя кількість завдань, що вирішуються за допомогою бойових броньованих машин (ББМ), значно зросла. Проведений аналіз бойових уражень ББМ у збройних конфліктах останніх десятиліть показує, що основна їх частина спричинена підривами на фугасних протитанкових мінах і саморобних вибухових пристроях [1]. При цьому основним уражаючим фактором, що призводить до загибелі операторів ББМ, є перевищення гранично допустимих значень прискорень, які діють на їхній організм [2].

На теперішній час для забезпечення необхідного рівня протимінного захисту ББМ використовується ряд технічних рішень, таких як V-подібна та W-подібна форми днища, застосування модульного компонування ББМ та енергопоглинаючих елементів конструкцій (сидінь, доріжок, спіненого алюмінію і сотових конструкцій) [3].

Одним із перспективних напрямів забезпечення протимінного захисту ББМ є використання алюмінієвих сотових конструкцій (СК), що за малою вагою мають велику здатність до поглинання енергії вибуху завдяки її витраті на пружно-пластичне деформування структури [4, 5].

Синтез й оптимізація СК є складним науково-технічним завданням, оскільки відсутні аналітичні залежності, що зв'язують їх параметри (товщину стінок, крок сот, пружні та пластичні властивості матеріалу) й енергопоглинаючу здатність.

У роботі пропонується застосувати розрахунковий метод оцінки енергопоглинаючої здатності СК, що базується на чисельному вирішенні завдання її динамічного навантаження з використанням пакету скінченно-елементного аналізу LS-DYNA.

Метою роботи є оцінка ефективності застосування алюмінієвих сотових конструкцій для підвищення рівня протимінної стійкості ББМ.

Основна частина. Сотова конструкція представляє собою набір поздовжніх і поперечних ребер, що закріплені між двома паралельними пластинами (рис. 1). Для скорочення часу проведення розрахунків у дослідженні використовувалась $\frac{1}{4}$

частина конструкції з відповідними умовами симетрії.

Основою для підготовки вихідних даних, що представлені у роботах [4,5], стали результати проведеного параметричного синтезу СК. Для параметричного синтезу були обрані такі геометричні параметри:

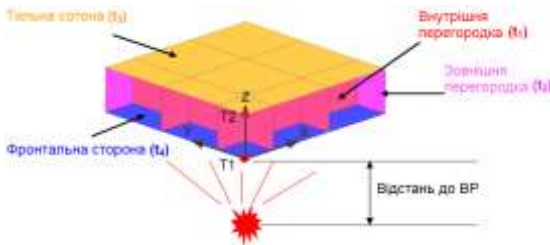


Рисунок 1 – Розрахункова схема для параметричного синтезу сотової конструкції

товщина фронтальної (зі сторони дії вибуху) пластини (t_4), товщина тильної пластини (t_3), товщина зовнішньої перегородки (t_2), товщина внутрішніх ребер (t_1).

Як критерій оптимізації обрано внутрішню енергію (цільова функція

при оптимізації) конструкції наприкінці розрахунку, яку необхідно максимізувати. Обмеженням є маса (маса $\frac{1}{4}$ сотової конструкції 4 кг) і максимально допустиме значення пікових прискорень на тильній пластині. Загальна маса конструкції визначається за відомими співвідношеннями між масою, густиною та об'ємом. Обмеження параметрів оптимізації товщини стінок:

$$0,0015 \leq t_2 \leq 0,008 \text{ [м]}; 0,0005 \leq t_4 \leq 0,004 \text{ [м]}; t_1 = t_2/2.$$

Таблиця 1 – Характеристики матеріалу корпусу ББМ і сотової конструкції

Властивість	Корпус ББМ	Сотова конструкція
Густина, кг/м ³	7850	2630
Модуль зміцнення, МПа	1400	310
Межа плинності, МПа	980	230
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,33

Маса заряду еквівалентна 0,515 кг тринітротолуолу. Заряд розміщувався на відстані 0,26 м від фронтальної пластини СК. Характеристики матеріалу корпусу ББМ і сотової конструкції наведені в табл. 1. У процесі оптимізації параметрів сотової конструкції

проведено 7 ітерацій, результати яких наведені в табл. 2.

Значення часу припинення розрахунку обране таким, коли енергія й швидкість досягали постійного значення.

Аналізуючи представлені результати оптимізації (див. табл. 2), можна відзначити, що максимальна внутрішня енергія СК відповідає мінімальній товщині внутрішніх перегородок. Оптимальні значення СК отримані для ітерації № 6.

На рис. 2 наведені пікові значення прискорень елементів СК, отриманих для різних ітерацій при оптимізації в порівнянні з плоскою пластиною (загальна маса СК – 4 кг, маса пластини також 4,0 кг). Із залежності, наведеної на рис. 2, видно, що поряд із значними значеннями пікових прискорень фронтальної пластини, значення пікових прискорень тильної пластини менші від

пікових прискорень для плоскої пластини.

Судячи з отриманих у роботах [4, 5] результатів, можна припустити, що застосування СК на днищі ББМ призведе до зменшення значень прискорень корпусу ББМ у цілому. Для оцінки цієї гіпотези і було проведено це дослідження.

Таблиця 2 – Результати оптимізації параметрів сотової конструкції

Параметри*	№ ітерації						
	1	2	3	4	5	6	7
IE	17287.7	14947.4	16857.7	20574.6	21495.3	21556.0	21467.1
th1	0.00100	0.00100	0.00122	8.10e-4	6.48e-4	7.37e-4	7.20e-4
th2	5.00e-4	5.00e-4	6.10e-4	4.05e-4	3.24e-4	3.69e-4	3.60e-4
th3	0.0211346	0.0206946	0.0208706	0.0217626	0.0220570	0.0219501	0.0219704
th4	0.00200	0.00244	0.00200	0.00160	0.00150	0.00150	0.00150
KE	12614.3	10896.4	11211.9	16219.6	18680.0	17733.0	17945.6
IE	17287.7	14947.4	16857.7	20574.6	21495.3	21556.0	21467.1
TE	21583.8	17888.2	20469.0	27662.8	30710.7	29801.6	30000.6
Mass	4.00089	3.99924	3.99990	3.99918	4.00049	4.00056	3.99990

* IE – внутрішня енергія, Дж; th1 – товщина внутрішніх перегородок, м, th2 – товщина зовнішніх перегородок, м; th3 – товщина задньої плити, м; th4 – товщина фронтальної плити, м; KE – кінетична енергія, Дж; TE – загальна енергія, Дж; Mass – маса ¼ сотової конструкції, кг.

Поведінка корпусу ББМ і сотової конструкції при вибуховому навантаженні описана із застосуванням моделі матеріалу Купера-Саймондса (англ. *Copper-Symonds*):

$$\sigma_T = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p);$$

$$E_p = E_{tg} E / (E - E_{tg}); \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt,$$

де p і C – параметри швидкості деформацій; $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформацій; σ_0 і σ_T – статична та динамічна границі плинності; E – модуль пружності; E_{tg} – модуль зміцнення.

Швидкість пластичних деформацій визначається як різниця між швидкостями повних і пружних деформацій $\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^e$.

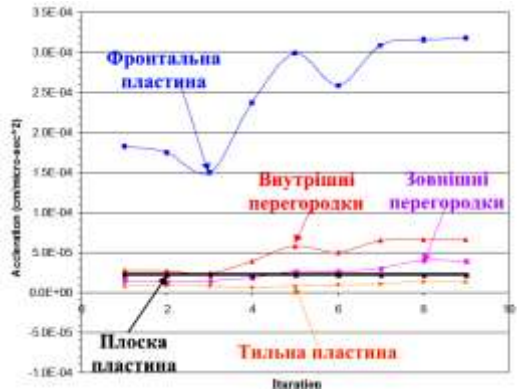


Рисунок 2 – Зміна прискорень елементів сотової конструкції в порівнянні з плоскою пластиною

Дія ударної хвилі на елементи конструкції корпусу ББМ змодельована за допомогою рівняння, в якому тиск ударної хвилі є експонентною функцією від часу $P(t) = P_{So} [1 - (t - t_a) / t_d] \exp\{-A[(t - t_a) / t_d]\}$, де $P(t)$ – тиск ударної хвилі на момент часу t ; P_{So} – максимальний тиск падаючої ударної хвилі; t_a – час досягнення ударною хвилею об'єкта; t_d – час дії додатної фази ударної хвилі; A – коефіцієнт затухання.

Час інтегрування обирається за умови стійкості числового рішення Куранта-Фредрика-Леві.

Оцінка стійкості та збіжності числової моделі вибухового навантаження конструкцій з різною геометрією проведена в роботах [6-9].

Результати зміни напружено-деформованого стану перегородок СК при вибуховому навантаженні наведені на рис. 3. Зміна напружено-деформованого стану СК при різній масі вибухової речовини в однакові моменти часу наведена на рис. 4.

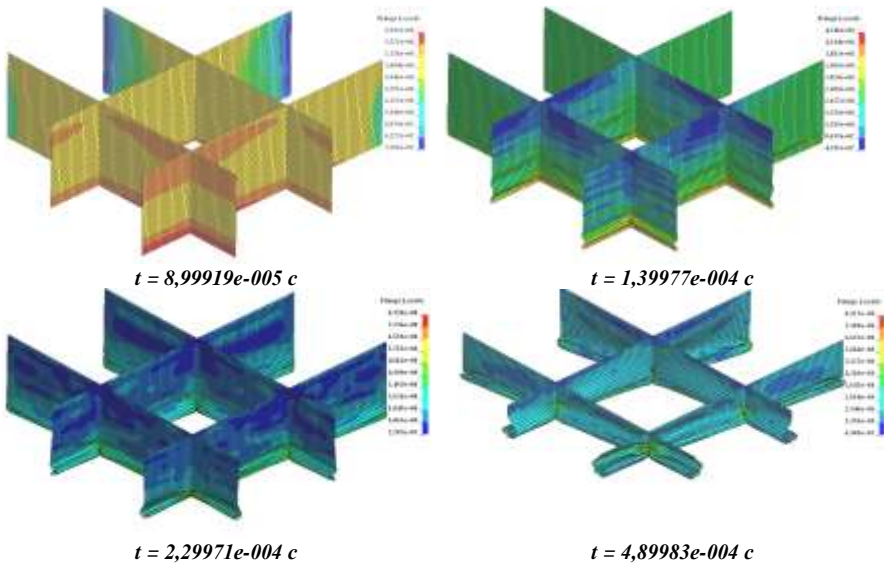


Рисунок 3 – Етапи деформування внутрішніх перегородок сотової конструкції (маса ВР 1 кг)

Дослідження здійснювалися з використанням скінченно-елементної моделі корпусу ББМ з плоским днищем (рис. 5). При проведенні моделювання прийнято, що заряд ТНТ масою 6 кг встановлений на поверхні на відстані 400 мм до крайньої нижньої точки днища. Товщина всіх елементів днища 10 мм.

Отримані значення прискорень сидіння оператора (рис. 6) дозволяють зробити висновок, що ефективність застосування сотової конструкції для підвищення рівня протимінної стійкості ББМ є відносно невисокою (10-15% за значеннями прискоро-

рень). Однак потребує подальшого дослідження можливість застосування спіненого алюмінію в сотах для збільшення значення поглинутої енергії.

При моделюванні встановлено, що характерним є руйнування сот у центрі під днищем корпусу та їх незначне деформування на відстані більше 0,5 м від центру дії вибуху (рис. 7). Тому можна зробити припущення про доцільність виконання сотових конструкцій на днищі БМ модульного типу, що дозволить уникнути руйнування всієї сотової конструкції та підвищити ремонтпридатність.

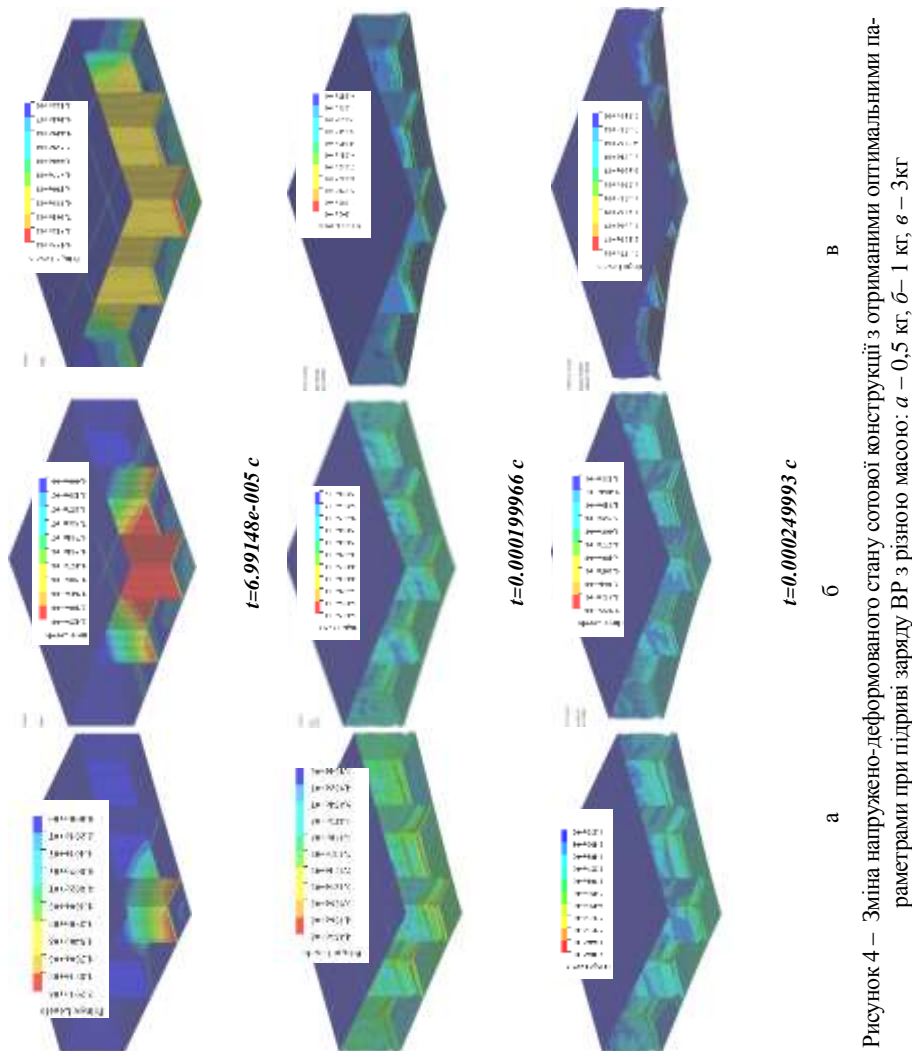


Рисунок 4 – Зміна напружено-деформованого стану сотової конструкції з отриманими оптимальними параметрами при підриві заряду ВР з різною масою: а – 0,5 кг, б – 1 кг, в – 3 кг

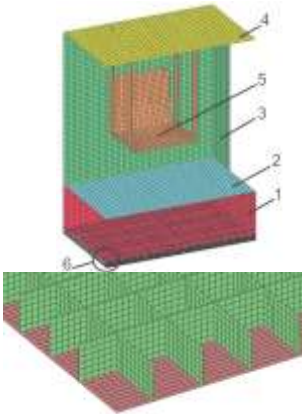


Рисунок 5 – СЕМ корпусу ББМ зі встановленими сотами на днищі: 1 – днище; 2 – підлога; 3 – борт і корма; 4 – дах; 5 – сидіння; 6 – сотова конструкція

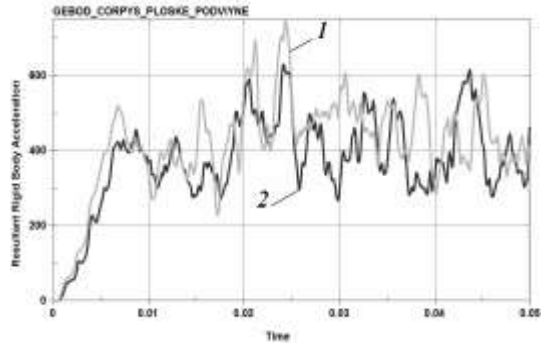


Рисунок 6 – Зміна прискорень сидіння: 1 – корпус без сот, 2 – корпус із сотами

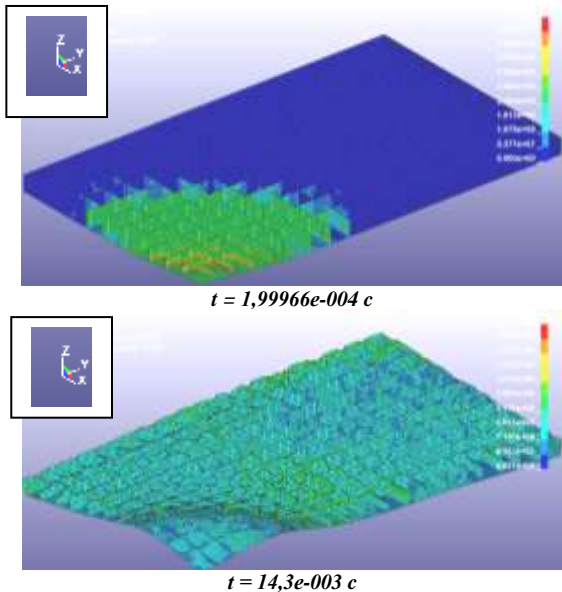


Рис. 7. Зміна напружено-деформованого стану сотової конструкції, встановленої на днищі ББМ

Висновки. Аналіз отриманих результатів дослідження дозволяє зробити такі висновки.

1. Розроблена математична модель для числового розв'язання задачі вибухового навантаження сотових конструкцій. Математична модель може бути застосована також для оптимізації сотових конструкцій з наповнювачем, що планується провести в ході подальших досліджень.

2. Встановлено, що значення прискорень тильної пластини сотової конструкції менші порівняно з прискореннями суцільної пластини, рівної за масою.

4. Проведені дослідження ефективності застосування сотових конструкцій для підвищення рівня протимінного захисту БМ показали їх відносно невелику ефективність. Значення прискорень сидіння оператора в корпусі без сот більші за прискорень сидіння в корпусі із сотами на 10-15%. Тому доцільно провести дослідження з вибору параметрів спіненого наповнювача для можливого заповнення ним сот.

5. Аналіз зміни напружено-деформованого стану сотової конструкції на днищі БМ вказує на доцільність виконання сот у вигляді модулів (блоків з габаритними розмірами приблизно 0,5x0,5 м), що дозволить збільшити ремонтопридатність БМ після мінного підриву.

6. Виходячи з отриманих оптимальних геометричних розмірів сотової конструкції, доцільність їх використання на сучасних вітчизняних БМ викликає сумнів через те, що при незначному зменшенні прискорень робочих місць операторів значення кліренсу БМ зменшується на 15-20%, що негативно вплине на показники їх рухомості.

Таким чином, проведення подальших досліджень необхідно спрямувати на застосування сотового захисту зі спініним наповнювачем у конструкціях перспективних зразків БМ з уніфікованим шасі (уніфікованою бойовою платформою), що матиме базовий рівень захисту, з можливістю його підвищення до необхідного рівня в залежності від завдань, які передбачається виконувати.

Список літератури 1. Гребеник А. Н. Состояние и перспективы повышения защищенности армейских автомобилей многоцелевого назначения / А.Н. Гребеник, С.А. Стукота // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный науч.-техн. сб. – Вып. № 2. – К.: НТЦ АСВ. – 2005. – С. 37–43. **2.** Бісик С.П. Критерії ураження екіпажів бойових машин при вибуховому навантаженні / С.П. Бісик, І.Б. Чепков, В.А. Голуб, В.Г. Корбач, О.Л. Чеченкова // Військова медицина України. – 2011. – № 3-4. С. 90-96. **3.** Kania E. Developmental tendency of landmine protection in vehicle // Modelling and optimization of physical systems. – 2009. – №8. – С. 67-72. **4.** Смирнов А.А. Исследование процессов ударно-волнового нагружения алюминиевых сотовых конструкций / А.А. Смирнов, Д.О. Бутарович // [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dynalook.com/> **5.** Energy Absorbing Sandwich Structures Under Blast Loading [Ел. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dynalook.com/> **6.** Бісик С.П. Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини / С.П. Бісик, В.А. Голуб, В.Г. Корбач // Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ. №2(5). – Львів: АСВ, 2011. – С. 3-6. **7.** Бісик С.П. Исследование влияния угла заострения днища боевой машины на его стойкость к действию взрыва / С.П. Бісик, В.А. Голуб, В.Г. Корбач, Д.В. Криворучко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический журнал. – К.: НТЦ АСВ. – 2011. – №4. – С. 20-23. **8.** Бісик С.П. Дослідження навантаження вибухом макетів днищ бойових машин / С.П. Бісик, К.Б. Круковський-Сіневич, І.Б. Чепков и др. // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 140-149. **9.** Бісик С.П. Числове моделювання ударно-хвильового навантаження днища транспортного засобу / С.П. Бісик, І.Б. Чепков, В.А. Голуб, В.Г. Корбач // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. – Х.: НТУ «ХП», 2011. – С.149-154.

Надійшла до редакції 10.02.2013