

УДК 623.486

А. Л. МАЙСТРЕНКО, член-кореспондент НАНУ,
доктор технічних наук, професор,

В. І. КУЩ, доктор фізико-математичних наук,

В. Г. КУЛИЧ, кандидат технічних наук

(Інститут надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ),

О. В. НЕШПОР, кандидат технічних наук,

(Інститут проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ),

С. П. БІСИК, кандидат технічних наук, старший
науковий співробітник

(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, м. Київ)

Підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7-мм кулями Б-32

Надані результати числового моделювання процесу пробиття захисних керамічних елементів з різною конструкцією. Розроблені конструкції двох типів, що були виготовлені й пройшли натурні балістичні випробування 12,7-мм кулями Б-32: блок з керамічними циліндричними елементами типу «сфера-сфера» на полімерній зв'язці та мозаїчний блок, який складається з плоских керамічних елементів. Балістичні випробування підтвердили ефективність розроблених захисних керамічних елементів для захисту бойових броньованих машин від 12,7-мм куль Б-32.

Представлены результаты численного моделирования процесса пробития защитных керамических элементов различной конструкции. Разработаны конструкции двух типов, которые были изготовлены и прошли натурные баллистические испытания 12,7-мм пулями Б-32: блок с керамическими цилиндрическими элементами типа «сфера-сфера» на полимерной связке и мозаичный блок, состоящий из плоских керамических элементов. Баллистические испытания подтвердили эффективность разработанных защитных керамических элементов для защиты боевых бронированных машин от 12,7-мм пуль Б-32.

Аналіз проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей показує, що одним з головних напрямів підвищення захищеності вітчизняних бойових броньованих машин (ББМ) є забезпечення їхнього захисту від ураження кулями стрілецької зброї калібру 12,7 мм та 14,5 мм. Бойові машини піхоти (БМП) та бронетранспортери (БТР), що знаходяться сьогодні на озброєнні Збройних Сил України, були створені в 60–70-х роках минулого століття для ведення глибоких наступальних фронтових та армійських операцій на всій території Європи в умовах застосування зброї масового ураження і забезпечують захист від 12,7-мм куль Б-32 тільки у фронтальній проекції. Недостатній рівень балістичного та протимінного захисту БМП та БТР ускладнює виконання ними бойових задач під час безпосереднього зіткнення (вогневого контакту) з противником, зокрема, перевезення особового складу – головної бойової задачі, що лежить в основі концепції їх створення [1]. Підтвердженням цього є 35-річний досвід бойових дій, починаючи з Афганістану і закінчуючи антитерористичною операцією на сході України, при яких особовий склад, як правило, перевозиться «на броні».

Проведені експертні опитування показують, що головними загрозами для ББМ є можливість підриву їх на протитанкових мінах та саморобних вибухових пристроях, ураження гранатами ручних протитанкових гранатометів та кулями стрілецької зброї калібрів більше 7,62 мм (рис. 1) [2, 3]. Як наслідок, з визначених експертами вимог до ББМ на перспективу до 2023 року критичним є формування та виконання вимог зі стійкості до ураження кулями стрілецької зброї калібрів більше 7,62 мм.

На сьогоднішній увага приділяється дослідженням з підвищення протимінного захисту [4, 5], однак дослідженням балістичного захисту за рахунок використання керамічних захисних елементів (ЗКЕ) вітчизняними дослідниками приділено мало уваги. У роботах [6, 7] розглянуто можливість підвищення балістичної захищеності ББМ за рахунок виконання рознесених перешкод. Однак такий підхід інколи є неможливим при модернізації існуючих вітчизняних зразків ББМ або при наявності конструктивних обмежень.

Дослідження останнього десятиріччя провідних матеріалознавчих центрів світу показують, що конструкції, які складаються з шарів кераміки та полімерних композитів, є перспективними для використання в

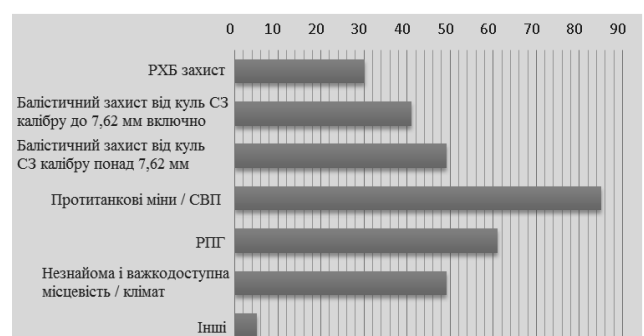


Рис. 1. Загрози для ББМ, що визначені експертним опитуванням (вказані за 100-бальною шкалою)

засобах захисту від дії високоенергетичних динамічних навантажень. Розробка таких кераміко-композиційних матеріалів надає можливість використовувати механічні властивості різних за природою складових, у яких діють механізми трансформації кінетичної енергії кулі, що створюють умови для дисипації енергії ударних навантажень. Відтак матеріал для захисту від куль повинен мати більш високі дисипативні властивості як керамічних, так і композиційних полімерних шарів. Для кераміки, зокрема, на основі реакційноспеченого карбіду кремнію, найбільш енергоємними механізмами є утворення нових поверхонь у керамічному шарі при фрагментуванні його на дисперсні частинки й осколки різних розмірів та забезпечення умов пластичного деформування бронебійного осердя кулі, а для полімерних композиційних підпорів – дисипація енергії, що залишається після руйнування кераміки і йде за механізмами деформування та руйнування високоміцних армуючих волокон, а також порушення зв'язків на межі зв'язка – волокно. З метою найкращої реалізації властивостей як керамічних складових, так і полімерних композиційних матеріалів, що входять до складу балістичних комбінованих перешкод, і прогнозування їх опору в умовах динамічних навантажень останнім часом усе більша увага приділяється дослідженню особливостей та механізмів руйнування шаруватих комбінованих матеріалів та їх взаємного впливу на результуючий балістичний захист від дії куль з кінетичною енергією, більшою за 15 кДж. Створення комбінованих кераміко-композиційних матеріалів, що здатні ефективно протистояти дії бронебійних куль з великою кінетичною енергією, є надзвичайно актуальною науковою та практичною задачею.

Метою статті є висвітлення основних результатів досліджень з підвищення балістичного захисту ББМ за рахунок встановлення дискретних керамічних елементів.

Проаналізуємо процес пробивання кераміко-композиційної броні, зокрема, кулями Б-32 калібру 12,7 мм. Блок складається з двох шарів постійної товщини. Призначення лицьового керамічного шару з високою твердістю полягає в максимальному пластичному деформуванні й руйнуванні сталевго осердя кулі, а роль підпору – адсорбція залишкової кінетичної енергії осердя і фрагментів зруйнованої кераміки. Така перешкода має повністю поглинати кінетичну енергію кулі і таким чином захищати корпус ББМ від пробиття.

Для кераміки, з огляду на її малу тріщиностійкість, по суті єдиним способом локалізації пошкодження є її дискретне виконання. У цьому дослідженні розглядаються два типи дискретних елементів, а саме: плитки і циліндри (зі сферичними або конічними торцями). Конструкція зі сталевим підпором може розглядатись як один з варіантів додаткової броні, коли керамічні плитки наклеєні безпосередньо на корпус ББМ. Розглянемо деякі варіанти конструкції таких блоків.

Блок з дискретними керамічними плитками. Як уже було відзначено вище, здатність ЗКЕ витримувати багаторазові влучення може бути забезпечена формуванням його з окремих дискретних елементів, зокрема керамічних плиток квадратної, шестигранної чи іншої форми. З огляду на крихкість, керамічний шар сам по собі не є надійним протикульним захистом. Належна реалізація захисного потенціалу кераміки відбувається лише при наявності достатньо жорсткого підпору, і це має бути враховано при виборі конструкції блока ЗКЕ. Для ілюстрації сказаного розглянемо дві конструкції. У

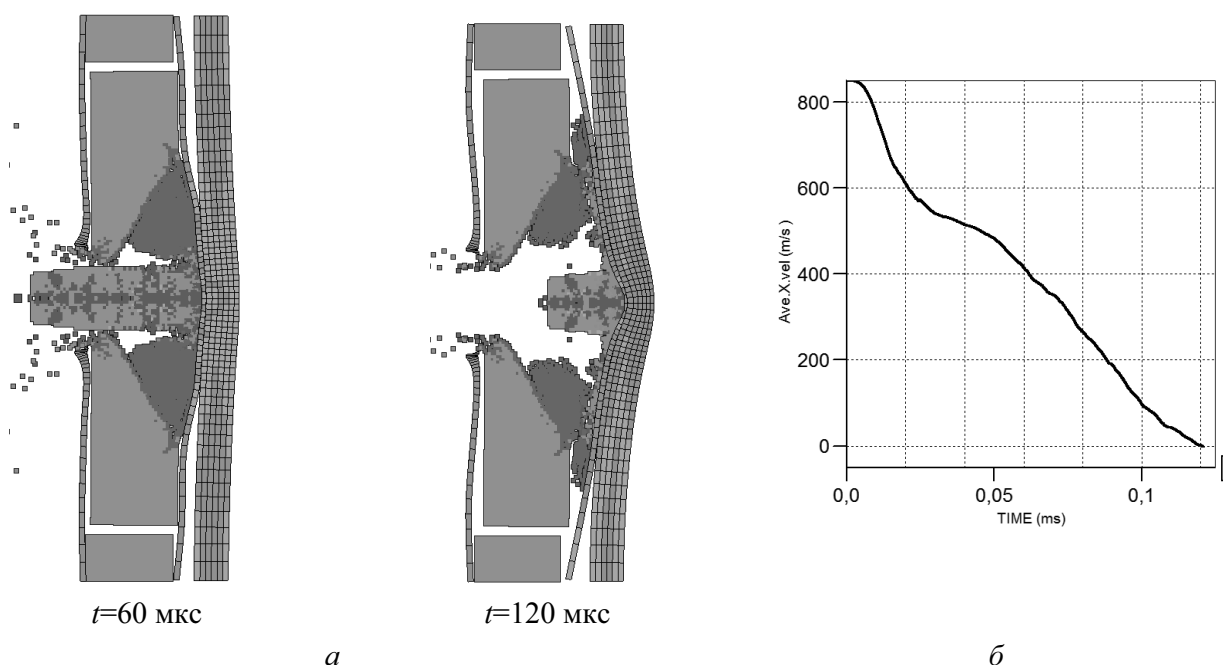


Рис. 1. Результати моделювання процесу взаємодії бронебійного осердя 12,7-мм кулі Б-32 з ЗКЕ (товщина керамічних елементів 15 мм), який розташований безпосередньо на сталевому корпусі ББМ (а), та графік зміни швидкості осердя кулі в залежності від часу (б)

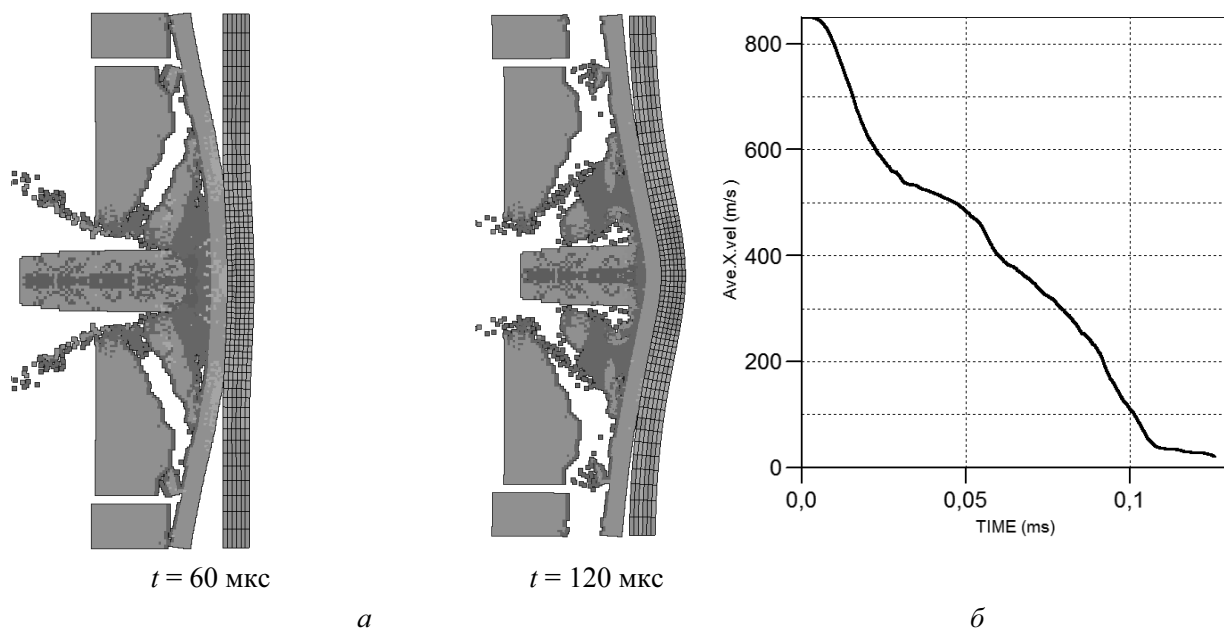


Рис. 2. Результати моделювання процесу взаємодії сталевго осердя 12,7-мм кулі Б-32 із ЗКЕ (керамічна плитка в блоці з титановим підпором), встановленого на корпусі ББМ із зазором (а), та графік залежності швидкості осердя кулі від часу (б)

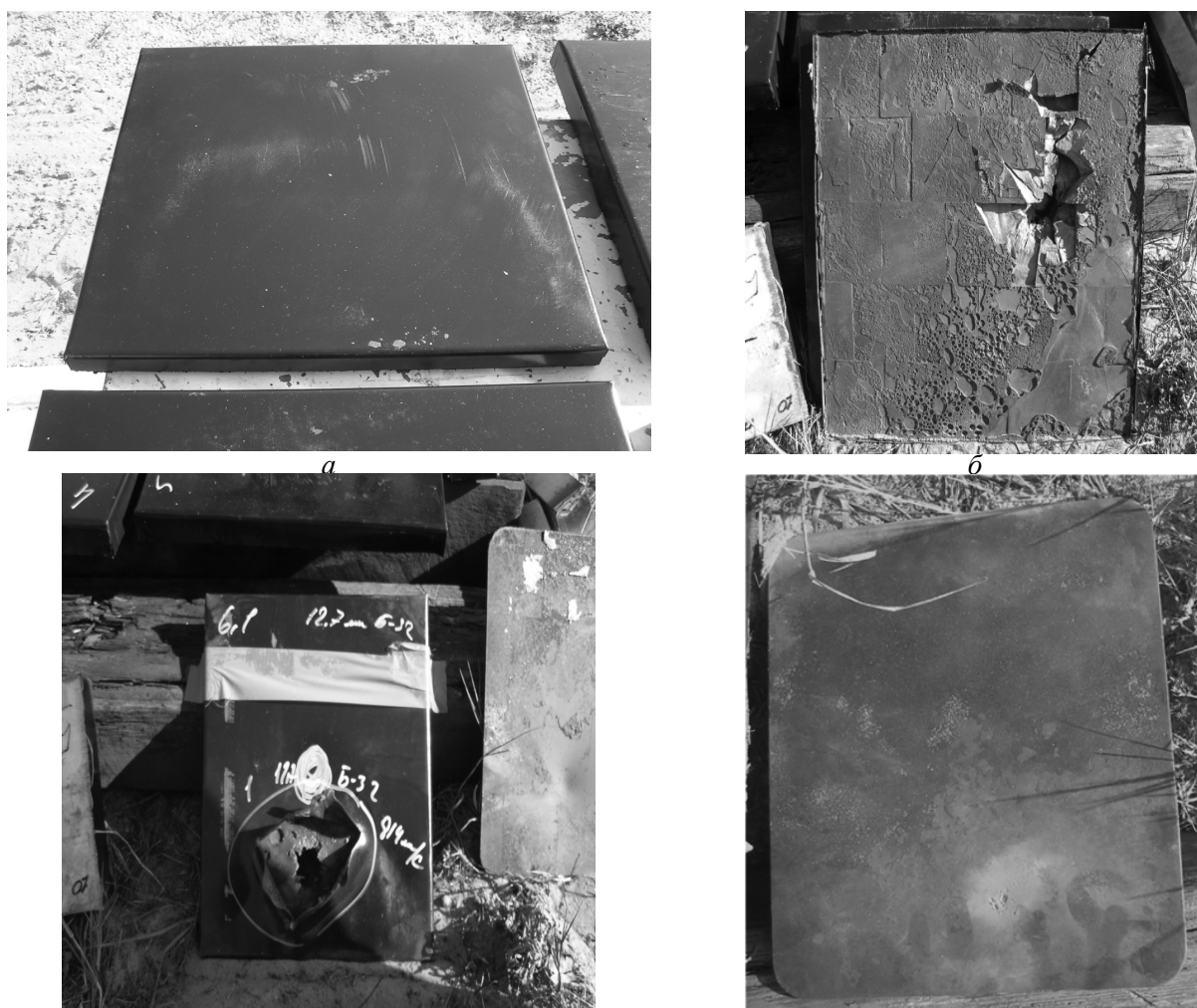
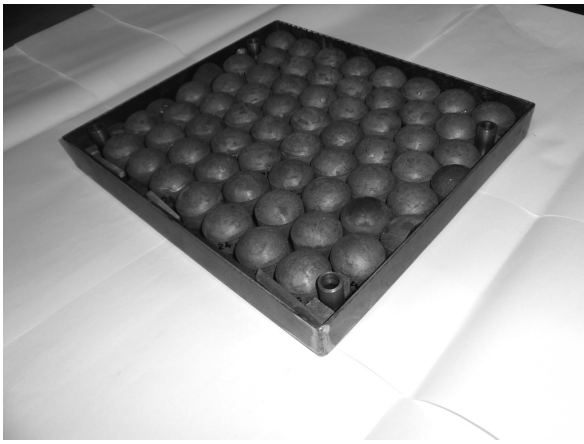


Рис. 3. ЗКЕ з дискретними керамічними плитками:

а – загальний вигляд ЗКЕ розмірами 400×400 мм, спорядженого керамічними плитками на сталевому корпусі ББМ перед випробуваннями, б – тильна сторона ЗКЕ після пробиття 12,7-мм кулею Б-32, в – результати влучання в ЗКЕ з керамічними плитками та відбиток післядії кулі на поверхні макета корпусу ББМ



а



б

Рис. 4. Загальний вигляд ЗКЕ (габаритні розміри 241×272 мм) з дискретними керамічними елементами на стадії складання (а) та готових ЗКЕ, залитих олію-гумою (б)

першому випадку конструкція являє собою шар окремих керамічних плиток у сталевій упаковці завтовшки 15 мм. Результати моделювання зображено на рис. 1. Як показують розрахунки, до моменту часу 30 мкс відбувається формування конічної тріщини та руйнування кераміки в її межах та інтенсивне зношування осердя кулі. За цей час швидкість кулі зменшується від 850 до 550 м/с. У наступні 20–25 мкс частково зруйноване осердя проходить шар подрібненої кераміки з відносно незначною втратою швидкості, після чого вступає в контакт з корпусом ББМ, причому бронесталь товщиною 6 мм витримує удар, хоча і локально деформується (рис. 1). Другий варіант конструкції являє собою шар окремих керамічних плиток але наклеєних на пластину (підпор) з титанового сплаву $Ti+6\% Al+4\%$ завтовшки 3 мм (рис. 2). Як видно з рис. 2, у цьому випадку не пробито навіть титановий підпор. Зазначимо, що при виконанні цих розрахунків було свідомо залишено певну відстань між основною і додатковою бронею. У міру зменшення цієї відстані час до контакту підпору з основною бронею зменшується, натомість збільшується площа контакту, після чого осердя кулі вступає в контакт зі сталевим корпусом ББМ. Руйнування оживала, втрата більшої частини маси осердя і значне його пошкодження є причиною більш рівномірного розподілу навантаження. Ці умови є сприятливими з погляду підвищення захисних властивостей ЗКЕ.

Така конструкція ЗКЕ є відносно простою у виготовленні, достатньо надійною і має низьку собівартість. Однак після ураження вона вже не підлягає відновленню через те, що конструкція такого ЗКЕ нероз'ємна, а зруйновані керамічні елементи знаходяться всередині завареного сталевго корпуса, відновлення якого в польових умовах досить проблематичне (рис. 3). Тому було прийняте рішення для виконання умови ремонтпридатності ЗКЕ в польових умовах зупинись на його конструкції з дискретними елементами у вигляді циліндрів зі сферичними або конічними торцевими поверхнями.

ЗКЕ з керамічними циліндричними елементами. Інший підхід до створення ЗКЕ базується на тому, що навіть невеликий, в кілька градусів кут між напрямком

руху і віссю обертання бронебійної кулі суттєво знижує її пробивну здатність і, як правило, призводить до руйнування осердя [8]. Вказаний ефект використано у ЗКЕ, форма керамічних елементів якого вибрана в спосіб, який практично унеможливує нормальну (осьову) взаємодію їх з кулею, а отже може підвищити ефективність захисту (рис. 4).

Значними проблемами підвищення ефективності таких ЗКЕ є обґрунтування раціонального вибору матеріалів, форми та розмірів дискретних керамічних елементів, дослідження механізму взаємодії кулі із ЗКЕ, що пов'язано зі складністю проблеми, числовий аналіз якої вимагає розгляду скінченно-елементних моделей складної геометрії та, як наслідок, потужної обчислювальної техніки. До того ж розмаїття варіантів взаємодії ударника з перешкодою значно ускладнює пошук закономірностей поведінки таких виробів та оцінку їх балістичних властивостей.

У роботі виконано числовий аналіз взаємодії ударника з одиничним елементом циліндричної форми з опуклою формою (сферичною та конічною) торцевих частин (рис. 5, 6).

Розглянемо спочатку найбільш несприятливий для даної конструкції випадок центрального удару, в цьому випадку задачу може бути розглянуто у двовимірній плоскій постановці (рис. 5). При нормальній взаємодії ефект кривизни поверхні елемента полягає лише в тому, що пружні хвилі розтягу не призводять до формування магістральної конічної тріщини в перші мікросекунди взаємодії, відсутнє також інтенсивне руйнування кераміки на протилежному боці керамічного елемента. Обмеженість об'єму елемента обумовлює його практично повне руйнування, але до цього часу (≈ 80 мкс) він уже зіграв свою роль: оживальна частина осердя зруйнована повністю, а решта суттєво пошкоджена, швидкість знижена до 400 м/с, тобто втрачено понад 3/4 початкової кінетичної енергії. Як наслідок, основна броня не пробита, а сусідні елементи пошкоджені мінімально.

Таким чином, наведені результати моделювання свідчать про, як мінімум, дві перспективні конструкції додаткової дискретної керамічної броні. Одна з

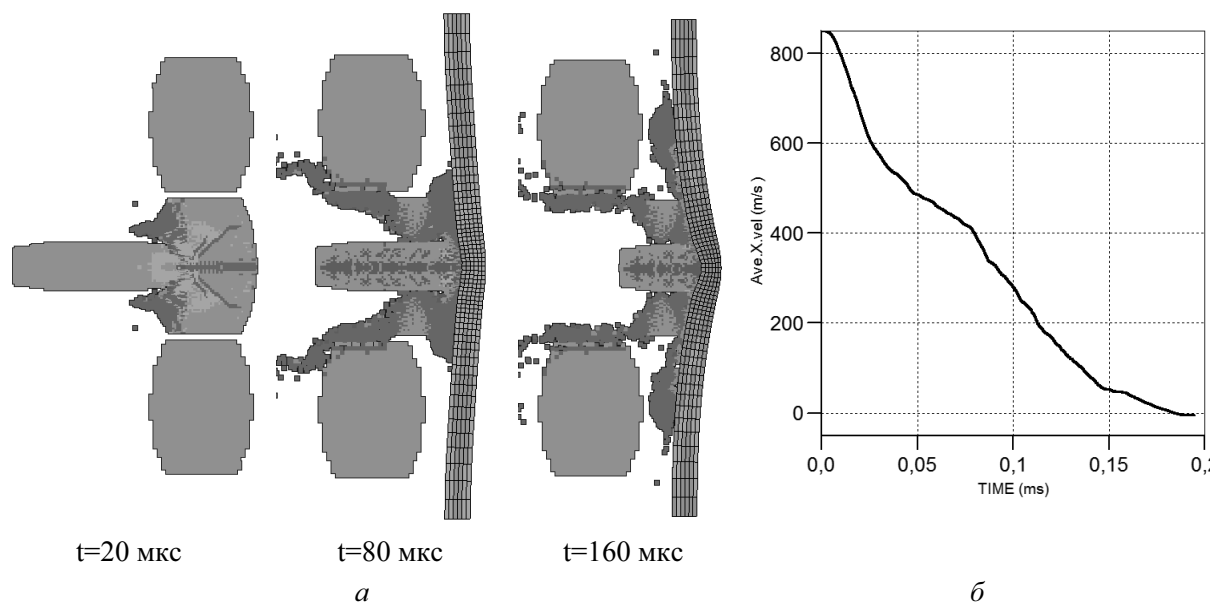


Рис. 5. Результати числового моделювання взаємодії 12,7-мм кулі Б-32 із ЗКЕ, спорядженого дискретними керамічними елементами циліндричної форми зі сферичними торцями (центрального удару) (а) та зміна швидкості осердя кулі (б)

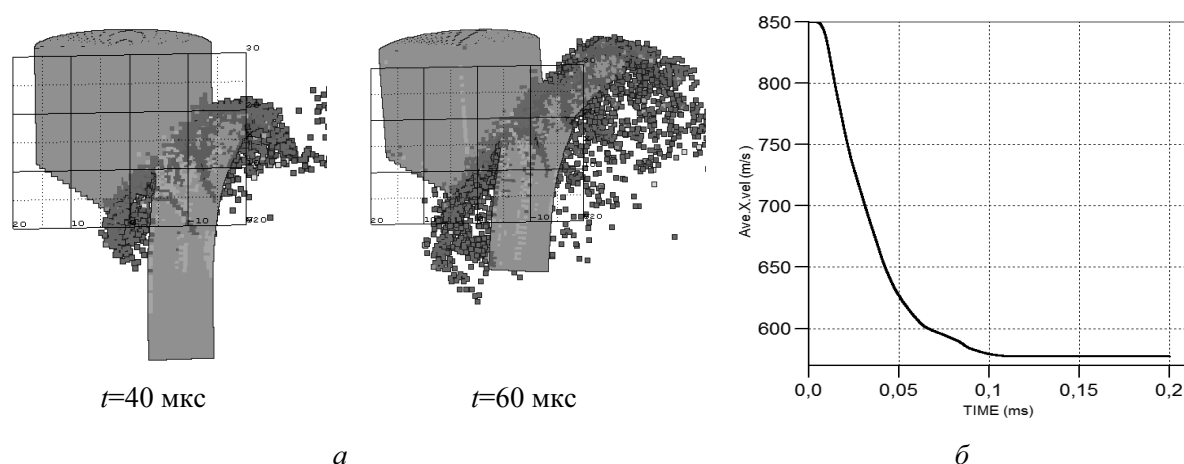


Рис. 6. Результати числового моделювання взаємодії 12,7-мм кулі Б-32 з керамічним двоопуклим елементом циліндричної форми з торцями «конус-сфера» (боковий удар) (а) та зміна вектора швидкості (б)

них являє собою блок з плиток карбіду кремнію (див. рис. 3). Інший варіант – це шар гексагонально упакованих циліндричних елементів з опуклими торцями (див. рис. 4). Як показують розрахунки, при належному виборі конструктивних параметрів в обох випадках захист від нормального та бокового удару 12,7-мм кулі Б-32 при швидкості 840 м/с достатній (рис. 5, 6).

Перевагою першого варіанта є простота і технологічність виготовлення як керамічних плиток, так і цілого ЗКЕ. Втім, додаткової уваги тут вимагає спосіб з'єднання керамічних елементів з металевою підкладкою.

Другий спосіб, при належному виборі полімерної зв'язки та технології упаковки, має забезпечити більшу локалізацію пошкоджень, а отже витримати більше влучень у блок. До того ж така конструкція може бути оперативно відновлена навіть у польових умовах. Для остаточного ж вибору на користь того чи іншого варіанта має бути враховано, крім наведених даних, ряд інших

факторів: від результатів випробувань на полігоні до собівартості одиниці продукції.

Проведенні натурні випробування 12,7-мм кулями Б-32 балістичної стійкості дискретних ЗКЕ (рис. 7), що встановлені на корпусі ББМ, показують достатню збіжність результатів числового моделювання та експерименту.

У результаті виконаної роботи:

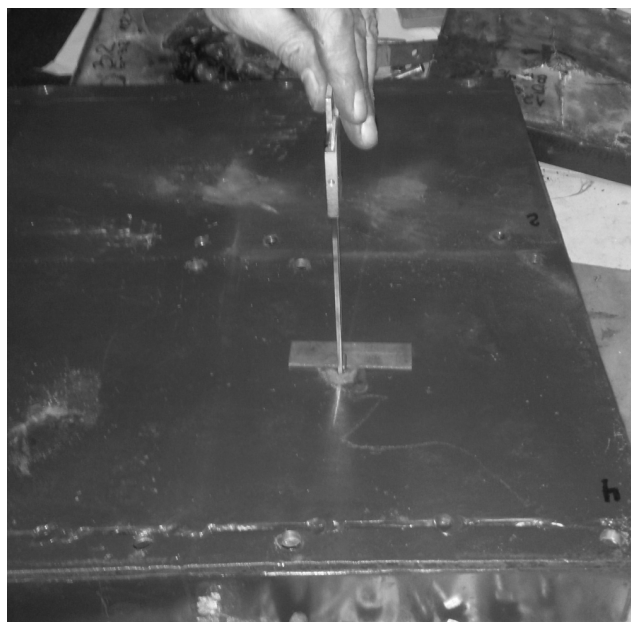
побудовані числові моделі взаємодії 12,7-мм кулі Б-32 та захисних керамічних елементів. Проведена оцінка їхньої стійкості та ефективності;

проведена оцінка точності розроблених числових моделей, що дозволяє їх використання при проведенні подальших досліджень бронебійних куль із захисними керамічними елементами для оцінки та розроблення напрямів підвищення їх ефективності;

вдосконалена технологія виготовлення ЗКЕ з реакційно спеченого карбіду кремнію. Виготовлені ЗКЕ



а



б

Рис. 7. Загальний вигляд ЗКЕ (габаритні розміри 241×272 мм) з дискретними керамічними елементами, встановлені на макеті корпусу БММ (сталь Мііlux-500 товщиною 6,5 мм) після балістичних випробувань 12,7-мм кулями Б-32 (а) та поверхня макета корпусу із заперешкодно дією куль у межах 2,9–3,5 мм (б)

з дискретними керамічними елементами у вигляді плиток (100×100 мм) та циліндрів (зі сферичними торцями) з оліу-гумовою зв'язкою;

проведенні натурні випробування 12,7-мм кулями Б-32 балістичної стійкості суцільного та дискретних ЗКЕ, що складаються з керамічних плиток або циліндрів відповідно. У результаті випробувань визначені дві основні конструкції ЗКЕ з дискретних керамічних циліндрів з оліу-гумовою зв'язкою, розташованих на корпусі БММ та з керамічних плиток 100×100 мм з оліуретановою зв'язкою на сталевому корпусі БММ, що ефективно протистоять багаторазовим ураженням 12,7-мм кулям Б-32.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Купрінено А. Н., Голуб В. А. Синтез вариантов проектных гипотез технического облика перспективных типов боевых бронированных машин // Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ. № 2 (9). Львів : АСВ, 2013. С. 36–42.
2. Global armoured vehicles market report 2016/ URL: <http://www.defenceiq.com/amoured-vehicles/articles/summary-of-global-armoured-vehicle-market-report-2>.
3. Бісик С. П., Чепков І. Б., Васківський М. І., Давидовський Л. С., Корбач В. Г., Висоцький О. М., Захаревич Д. М. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» // Озброєння та військова техніка. 2016. № 1 (9). С. 26–31.
4. Бісик С. П., Голуб В. А., Корбач В. Г. Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини // Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ. № 2 (5). Львів : АСВ, 2011. С. 3–6.
5. Бісик С. П. Дослідження конструкції захисного протимінного екрана // Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ. № 12. Львів : АСВ, 2015. С. 110–117.
6. Купрінено О. М. Обґрунтування принципів формування перспективних типів бойових броньованих машин // Системи озброєння і військова техніка. 2012. № 4 (32). С. 40–46.
7. Купрінено А. Н., Голуб В. А. Выбор рационального варианта проектной гипотезы технического облика перспективных типов боевых бронированных машин // Системи озброєння і військова техніка. 2013. № 3 (35). С. 24–28.
8. Голуб В. А., Чепков І. Б., Ларін А. Ю., Купрінено О. М., Бісик С. П. Дослідження кутів прецесії та нутації куль стрілецької зброї після пробиття перешкод // Озброєння та військова техніка. 2014. № 1 (1). С. 28–33.

Рецензент А. В. Гурнович, д-р техн. наук, старший наук. співробітник

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)