

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
Фізичний факультет  
Кафедра фізики металів

На правах рукопису

**Формування м'якого шаруватого бронезахисного матеріалу на основі  
високоміцного поліетилену**

**Галузь знань:** 10 Природничі науки

**Спеціальність:** 104 Фізика та астрономія

**Освітня програма:** Фізика

**Спеціалізація:** Фізика наноструктур в металах та кераміках

**Кваліфікаційна робота бакалавра**

студента 4 курсу

Діброва Володимира Володимировича

**Науковий керівник:**

д. ф.-м. н., проф., чл.-кор. НАН України

Макара Володимир Арсенійович

Робота заслухана на засіданні кафедри фізики металів  
та рекомендована до захисту на ЕК, протокол №

від

2020 р.

Завідувач кафедри

проф. Макара В.А.

Київ – 2020

## **ВИТЯГ**

з протоколу № \_\_\_\_\_

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент \_\_\_\_\_ виконав та захистив  
кваліфікаційну роботу бакалавра з оцінкою \_\_\_\_\_.

Голова ЕК \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

## АНОТАЦІЯ

**Дібров В. В.** Формування м'якого шаруватого бронезахисного матеріалу на основі високоміцного поліетилену

Кваліфікаційна робота бакалавра за напрямом підготовки 6.040203 Фізика, спеціалізація «Фізика наноструктур в металах та кераміках». – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра молекулярної фізики. – Київ – 2020.

**Науковий керівник:** д. ф.-м. н., проф., чл.-кор. НАН України, зав. каф. фізики металів Макара В. А.

Розроблені та експериментально протестовані декілька елементів шаруватої м'якої броні різного складу. Проведена оцінка частини кінетичної енергії кулі, яка поглинається кожним з шарів. Отримані результати показують, що витрачається на деформацію свинцевої кулі є малою відносно початкової кінетичної енергії кулі; основну роль в поглинанні енергії удару виконує шар НВМПЕ, велику частину енергії поглинає шар дилатантного матеріалу, а шар кевлару поглинає невелику частину енергії кулі.

**Ключові слова:** м'яка броня, композитний матеріал, швидкий удар, дилатантний матеріал, НВМПЕ, кевлар.

## SUMMARY

Dibrov V. V. Forming a soft layered armor based on high-strength polyethylene Bachelor qualification work in the direction 6.040203 Physics, specialization «Physics of nanostructures in metals and ceramics». – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Molecular Physics. – Kyiv – 2020.

**Research supervisor:** Dr. of Physics and Mathematics, Prof. Makara V. A., Corresponding Member of the NASU, Head of Department of Physics of Metals.

Several elements of layered soft armor of different composition have been developed and experimentally tested. The part of the kinetic energy of the projectile, which is absorbed by each of the layers, was estimated. The obtained results show that the

spent on the deformation of the lead projectile is small relative to the initial kinetic energy of the projectile; the main role in the absorption of impact energy is performed by the UHMWPE layer, great part of the energy is absorbed by the layer of dilatant material, and the single Kevlar layer absorbs a small part of the bullet energy.

Keywords: soft armor, composite material, quick impact, dilatant material, UHMWPE, Kevlar.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
I. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	7
1.1 Основні закономірності створення композитної м'якої броні .....	7
1.2 Кевлар .....	9
1.3 Надвисокомолекулярний поліетилен .....	13
1.4 Дилатантні матеріали .....	15
II. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ .....	21
III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....	24
3.1 Результати відстрілу пластин .....	24
3.2 Обговорення результатів .....	27
IV. ВИСНОВКИ .....	27
V. СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	33

## ВСТУП

М'яка броня використовується переважно для створення захисного спорядження, такого як бронежилети та каски. Дане спорядження, що призначене для захисту від уражень вогнепальної та холодної зброї, чи сколкових часток вибухових пристроїв, буде завжди актуальним для особового складу правоохоронних органів та армії. Перевагою саме м'яких елементів броні у порівнянні з жорсткими є більша зручність використання та можливість прихованного носіння.

Незважаючи на те, що основна концепція м'якої броні була розроблена доволі давно, з розвитком вогнепальної та холодної зброї від неї вимагається все більший рівень захисту. Це призводить до невпинного розвитку та вдосконалення технології її виробництва та використання все нових, часто композитних, матеріалів.

Метою цієї роботи є розглянути основні закономірності створення м'якої броні, підібрати відповідні матеріали та провести експериментальні випробування отриманих елементів.

## I. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Основні закономірності створення композитної м'якої броні

Через значний вплив матриці на характеристики елементів броні можна виділити основні чотири випадки, а саме: тканина без матриці, тканина, оточена м'якою і жорсткою матрицею, і тканина без матриці, але з щільністю, рівною щільності матричної композитної системи[4].

Залишкова кінетична енергія снаряда у композитній системі, виготовленій лише з тканини, менша, ніж у композитній системі, що містить матрицю. Також, композит, що містить м'яку матрицю є більш ефективним для уповільнення ударної дії, ніж композит, що містить жорстку матрицю[4].

За відсутності матриці, більш легка тканина ефективніша для одно- та двошарових систем, але тяжча та щільніша тканина сповільнює удар краще у системі, що має 3+ шари.

Для композитної системи, що містить жорстку матрицю, розтяг є найменшим, а для систем з легкої тканини він є максимальним. Шаруваті системи з тканини проявляють явну кореляцію між ефективністю сповільнення удару та гнучкістю/розтягуваністю композитної системи[4]. Тобто, чим більша здатність до зміни форми зразка, тим менша залишкова кінетична енергія. Зі збільшенням кількості шарів, системи, що містять матрицю більш ефективні, ніж ті, що мають лише тканину. Відзначається, що навіть незважаючи на гнучкість системи лише з тканини, що дозволяє їй поглинати більше кінетичної енергії снаряду, утворений снарядом конус занадто глибокий, щоб вважати її ефективною для захисту[8].

Крім запобігання проникненню снаряда, елемент броні повинен бути також розроблений таким чином, щоб він мав вплив не викликати значної опуклості на задній частині профілю, оскільки це призведе до важких ушкоджень, навіть якщо снаряд повністю не пробив елемент. Під час проникнення снаряду шари тканини, які безпосередньо зачіпають снаряд, називаються основні або первинні шари[4]. Ці шари поглинають більшу частину енергії під час удару і, отже, першими виходять з ладу. Волокна, що

мають високу міцність на розрив та деформацію, можуть вбирати більше енергії на одиницю об'єму перед відмовою, отже, є ідеальними кандидатами для використання в блоці броні[8].

Додавання полімеру, який тримає шари тканини ідеально зчепленими, запобігає їх розтягу до критичних відміток до відмови. Однак, ефект зчеплення та обмеження, який матриця надає на шари тканини, переважає втрату гнучкості та покращує продуктивність броні за рахунок зменшення максимального прогину. Порівняння результатів для жорстких і м'яких полімерів дозволяють припустити, що більш жорсткий полімер дає можливість системі поглинати більше кінетичної енергії снаряда.

Приймаючи до уваги все вищеописане, стаю зрозумілими принципи вибору матеріалів для елементів м'якої броні, метою яких є протикульовий та протиуламковий захист особистого складу.





## Продовження таблиці 1.1

Видовження, за якого наступає розрив	%	3,6	2,4
Модуль пружності	МПа	70500	112400

В 1970-ті роки одним з найзначніших досягнень у розробці бронежилетів став винахід компанією Дюпон армуючого волокна з кевлару. Спочатку волокно було призначене для заміни сталевих арматур в автомобільних покришках. Розробка куленепробивного жилету з кевлару проводилася Національним інститутом правосуддя і відбувалася у чотири етапи протягом кількох років. На першому етапі тестувалося чи здатне волокно з кевлару зупинити кулю. Другий етап полягав у визначенні кількості шарів матеріалу, необхідного для запобігання пробиття кулями різного калібру і різної швидкості. Наступним кроком була розробка прототипу жилета, здатного захищати працівників від найпоширеніших загроз: кулі калібру .38 Special і .22 Long Rifle. У 1973 році був розроблений жилет з семи шарів волокна з кевлару для польових випробувань. Було встановлено, що при намоканні захисні властивості кевлару погіршувалися.

**Таблиця 1.2**

Щільність та стандартна вологість комерційної тканини[1]

Властивість	Од. вим.	Кевлар 29	Кевлар 49
Тип	Кількість ниток	1000	768
Щільність	кг/м <sup>3</sup>	1440	1440
Стандартна вологість тканини	%	7,0	3,5

З цих даних можна зробити висновок, що для використання в захисному спорядженні більше підходить Кевлар 49, який має меншу стандартну вологість тканини, більший модуль пружності та міцність на розрив.

Здатність захищати від куль також зменшувалася після дії ультрафіолету, у тому числі сонячного світла. Хімістка і відбілювачі також негативно позначалися на захисній властивості тканини зразку 1973 року. Щоб обійти ці проблеми, був розроблений водостійкий жилет, що має покриття з тканини для запобігання дії сонячних променів та інших факторів, що впливають негативно.

Однак нові моделі арамідної тканини мають інші властивості. Волокно випробовували в різних хімічних розчинах різної концентрації, таких як хлорид натрію, фосфат натрію і мідного купоросу. Кевлар виявився доволі резистивним при атаках кислот з різною концентрацією, температурою, часом, а їхній вплив на міцність виявився незначним. Це означає, що волокно може бути використано для спорядження техніки, яка буде доволі довгий час знаходитися в агресивному середовищі.

**Таблиця 1.3**

Ефекти на механічні властивості кевлару під дією різних хімічних сполук[1]

Хімічна сполука	Концентрація (%)	Температура (° C)	Час (год.)	Ефект на розривне навантаження
<b>Розчин солі металу</b>				
Мідний купорос	3	21	1000	Немає
Мідний купорос	3	99	100	Помірний
Хлорид заліза	3	99	100	Помітний
Хлористий натрій	3	21	1000	Немає
Хлористий натрій	3	99	100	Немає

Продовження таблиці 1.3

Хлористий натрій	10	121	100	Помітний
Фосфат натрію	5	99	100	Помірний
<b>Соленна вода</b>				
Вода	100	99	100	Немає
Вода(+NaCl)	5	21	24	Немає
Вода(Океанічна)	100	121	1 рік	Немає
<b>Паливно-мастильні матеріали</b>				
Бензин	100	21	1000	Немає
Керосин	100	60	600	Немає
Авіаційне пальне	100	21	24	Немає

Також були проведені дослідження впливу океанічної води на тканину. Результати показують, що кевлар можна використовувати в умовах постійного контакту з соленою водою, це ніяк не впливає на розривне навантаження, навіть на великій дистанції. Дослідження впливу різних паливно-мастильних матеріалів дають схожі результати.

Сучасні моделі кевлару мають відносно високі показники теплоти згорання (34,4 МДж/кг для Кевлар 49), але полум'я відразу зупиняється при усуненні стороннього джерела вогню[1].

На основі цих даних, можна сказати, що сучасні моделі кевларової тканини добре підходять для конструювання елементів м'якої броні. Матеріал є дуже витривалим та резистивним до агресивних середовищ, має високі показники міцності відносно маси, погано горить та відразу згасає без стороннього джерела полум'я.

### 1.3 Надвисокомолекулярний поліетилен

Надвисокомолекулярний поліетилен (НВМПЕ) — термопластичний полімер, конструкційний матеріал, придатний до роботи в екстремальних умовах експлуатації. Молекула НВМПЕ складається з довгих лінійних ланцюжків поліетилену (молекулярна маса – від 1,5 до 11,5 млн. а. о. м. [7]).

У зв'язку з будовою молекул НВМПЕ є термопластичною речовиною з відносно невисокою температурою плавлення (135—190 °С), тому виробу з НВМПЕ ми радимо не використовувати при температурах, що перевищують 80-100 °С. При нагріванні вище температури плавлення НВМПЕ не переходить у в'язкотекучий стан, а лише в високопластичний[5]. НВМПЕ володіє дуже низьким для органічних полімерних сполук водопоглинанням, в межах 0,01—0,05 %, що обумовлено відсутністю в молекулах НВМПЕ полярних груп (складноєфірних, амідних, гідроксильних угруповань). Тому властивості НВМПЕ не змінюються при впливі води (у кевлара міцність при намоканні зменшується в 2 рази через порушення слабких водневих зв'язків амідних груп, при висиханні міцність не відновлюється в повному обсязі), а поверхня виробів з НВМПЕ - гладка на дотик.

НВМПЕ також стійкі до впливу більшості кислот і лугів, ультрафіолетового та гамма випромінювання і мікроорганізмів. При наявності довгострокового статичного навантаження, що діє на розтягування, НВМПЕ деформується поки існує механічне напруження (така властивість називається повзучістю).

Питома густина чистого НВМПЕ - приблизно 0,93—0,94,г/см<sup>3</sup> з додатками — 0,95 г/см<sup>3</sup>. Відношення межі міцності на розрив до маси у НВМПЕ на 40 % більше, ніж у арамідних з'єднань типу кевлара.

НВМПЕ має досить високий модуль пружності на згин - близько 1 ГПа і руйнуючу розтягуючу або згинальну напругу 20-40 МПа, поступаючись, таким чином, по руйнівним напруженням кращим високолегованим маловуглецевим високочистим сталям в 50-100 разів, а по модулю пружності - в 200 разів (наприклад, інструментальна сталь 4Х5МФС після

низькотемпературної термомеханічної обробки або аусформінга має напругу руйнування  $\sigma_b \approx 250$  кгс/мм і межу плинності  $\sigma \approx 180-230$  кгс / мм[6]). Однак завдяки низькій густині, в 8-8,5 разів менше, ніж у сталей, і високу атомну міцність (витривалість), вироби з НВМПЕ можуть конкурувати за показником міцність / власна вага з виробами з низькоміцних конструкційних сталей і навіть перевершувати їх. Основні властивості НВМПЕ, що обумовлюють його застосування, - дуже висока зносостійкість, низький коефіцієнт тертя і висока в'язкість руйнування (низькотемпературна надійність). Так, по зносостійкості НВМПЕ при допустимих для нього температурах експлуатації перевершує тефлон і навіть вуглецеві сталі. Коефіцієнт тертя НВМПЕ (по сталі) - близько 0,1. Коефіцієнт ударної в'язкості - 170 кДж / м<sup>2</sup> (з надрізом - до 80 кДж / м<sup>2</sup>), робочі температури - від мінус 80 ° С до плюс 80-90 ° С.

Високі пружні модулі та досить великий коефіцієнт в'язкості, досить широкий проміжок робочих температур та висока стійкість до агресивних зовнішніх умов робить НВМПЕ досить привабливим для використання в елементах м'якої броні.

## 1.4 Дилатантні матеріали

Дилатантні матеріали) – це такі матеріали, в яких в'язкість зростає зі збільшенням швидкості деформації зсуву.

Дилатантний ефект спостерігається у матеріалах в яких щільно розташовані частинки перемішані з рідиною, що заповнює простір між ними. При низьких швидкостях зсуву шарів матеріалу один відносно іншого, рідина діє, як змазка і дилатантний матеріал здатен вільно перетікати. За високих швидкостей зсуву рідина не встигає заповнювати проміжки між частинками і їх тертя значно зростає, що призводить до підвищення в'язкості.

Один з найпоширеніших матеріалів(дилатантна рідина) являє собою густу суміш кукурудзяного крохмалю і води, і може використовуватись для демонстрації ряду контрінтуїтивних поведінок, які показує середовище: раптове затвердіння при зовнішньому навантаженні, швидка повторна флюїдизація після зняття навантаження, утворення отворів і виступів під дією сильної вібрації, тощо.

Така поведінка походить з сильного згущення при зсуві, яке колоїдний або щільний розчин гранул з рідиною часто показують. В'язкість при зсуві збільшується майже повністю дискретно на порядки величини за досягнення деякого критичного показника зсуву, що, під дією сильного та майже миттєвого навантаження, робить рідину майже твердою.

Є декілька своєрідних особливостей у зміцненні дилатантного матеріалу під дією навантаження: зміцнення миттєве і настільки сильне, що може бути використане навіть для зупинення кулі вогнепальної зброї; релаксація після навантаження швидка, але не миттєва, як зміцнення; середовище у зміцненому стані поводить ся, як твердий матеріал, що дозволяє невелику еластичну деформацію, поки знаходиться під навантаженням; графік в'язкості від швидкості зсуву показує петлю гістерезису; спостерігаються звукові флуктуації, як відповідь на зовнішнє напруження у режимі зміцнення.

Від самого початку, зміцнення при зсуві у колоїдних системах розглядалося, як результат неупорядкованого переходу шарів та/або

ланцюжків структури, які сформувалися в режимі низького навантаження зсуву. Розсіяні частинки впорядковуються завдяки зсувному руху потоку, щоб забезпечити краще ковзання у режимі низького напруження, але турбулентний рух потоку у режимі високого напруження знищує цю структуру, чим забезпечує зміцнення системи. Але є інший випадок, для якого не спостерігається ніякої значної зміни структури, окрім дискретного зростання міцності при зсуві. Тому була запропонована модель у якій утворюються кластери рідини, чим і пояснюється зміцнення.

Модель, яка представлена в роботі, створена Hiizu Nakanishi, Shin-ichiro Nagahiro та Namiko Mitarai, вона демонструє дискретне зміцнення при зсуві та петлю гістерезису зі зміною міри зсуву, як було показано в експериментах. Також відображено, що постійний зсувний потік стає нестабільним у певному діапазоні параметрів, на якому система переходить між зміцненням та релаксацією.

Модель базується на гідродинаміці із внутрішньою змінною стану, що описує локальну структуру частинок розсіяних в рідині. В'язкість матеріалу визначається лише внутрішнім станом матеріалу, який миттєво змінюється у відповідь до локального зсувного напруження[2]. Динаміка системи, як густої рідини, представлена полем швидкостей  $\vec{v}(\vec{r})$ , і описується рівнянням гідродинаміки в якому представлена похідна Лагранжа:

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{i,j} + \sigma_{i,j}) + \rho g_i \quad (1.1)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j} \quad (1.2)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу,  $P$  – тиск,  $\sigma_{i,j}$  – компонента  $(i, j)$  тензору напружень зсуву  $\hat{\sigma}$ .

Вважаємо рідину нестискаємою, тому тиск визначається умовою нестискаємості:



$$\vec{\nabla} \vec{v}(\vec{r}) = 0 \quad (1.3)$$

Тензор в'язкого напруження виражається через звичайну залежність:

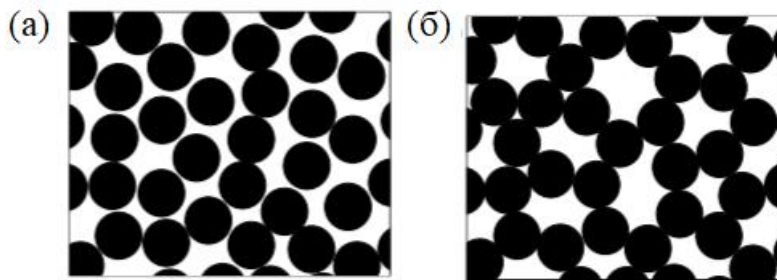
$$\sigma_{i,j} = \eta(\phi) \dot{\gamma}_{i,j} \quad (1.4)$$

Де тензор міри зсуву  $\dot{\gamma}_{i,j}$  має вигляд

$$\dot{\gamma}_{i,j} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{i,j} \quad (1.5)$$

Варто зауважити, що коефіцієнт в'язкості  $\eta$  не є константою, а залежить від параметру внутрішнього стану  $\phi$  системи.

Дилатантний матеріал містить дисперсні частинки, що надає системі внутрішній ступінь свободи для макроскопічного опису.



**Рис. 1.2** Схематичне зображення конфігурації гранул у спокійному(а) та у напруженому стані(б)

Внутрішній стан може бути векторним або мати вищий рівень симетрії в загальному випадку, але в моделі розглядається простий випадок, у якому стан виражений скалярним полем  $\phi(\vec{r})$ . Вважається, що  $\phi = 0$  для стану спокою та  $\phi = 1$  для напруження[2].

Для даного поля  $\vec{v}(\vec{r})$  припускаємо, що існує стаціонарна змінна  $\phi^*$  від якої змінна стану  $\phi$  залежить як

$$\tau \frac{d\phi}{dt} = (\phi^* - \phi) \quad (1.6)$$

де  $\tau$  – проміжок часу.

Можна припустити, що  $\tau$  є константою для випадку, коли внутрішній стан змінюється через термальну флуктуацію або інший механізм, незалежний від поля швидкостей (деформації потоку). Для інших випадків вважається, що проміжок часу залежить обернено пропорційно від локальної міри зсуву:

$$\tau = r\dot{\Gamma}^{-1} \quad (1.7)$$

Де  $r$  – безрозмірна константа, тому що природньо припустити, що зміна внутрішнього стану викликана деформацією течії. Слід зауважити, що така форма  $\tau$  не вводить нову змінну часу в систему, але відображає доволі своєрідну відповідь матеріалу на зовнішній вплив.

Стаціонарна змінна  $\phi^*$  визначається локальною течією і припускається що це зростаюча функція від локального напруження зсуву. У простій формі:

$$\phi^*(S) = \phi_M \frac{(S/S_0)^2}{1 + (S/S_0)^2} \quad (1.8)$$

де  $S$  – локальне напруження зсуву,  $S_0$  – локальне напруження зсуву на початковий момент,  $\phi_M$  – параметр. Параметр відображає значення змінної стану за виского показника напруження та має залежати від об'ємної частки гранул і деяких інших параметрів матеріалу[2].

Приймаються наступні співвідношення для визначення скалярних значень локальної міри зсуву та локального напруження зсуву, які спрощуються до звичайних міри зсуву та напруження зсуву у випадку простої зсувної течії.

$$\dot{\Gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} Tr[\hat{\gamma} \times \hat{\gamma}]} \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} Tr[\hat{\sigma} \times \hat{\sigma}]} \quad (1.9)$$

Властивість зміцнення при зсуві в моделі виходить з залежності  $\phi$  від в'язкості для якої приймається такий вираз:

$$\eta(\phi) = \eta_0 \exp\left[A \frac{\phi}{1 - \phi}\right] \quad (1.10)$$

де  $\eta_0$  – в'язкість у спокійному стані,  $A$  – безрозмірний параметр. У моделі представлена сильна розбіжність  $\phi = 1$  у точці напруги від  $\phi = 0$  у стані спокою, щоб показати значне зміцнення, яке спостерігається у дилатантному матеріалі. Варто зауважити, що змінна стану не може бути  $\phi > 1$  навіть коли  $\phi_M > 1$ .

Для числового представлення, вводиться система одиниць вимірювання

$$\eta_0 = S_0 = \rho = 1 \quad (1.11)$$

безрозмірні, а час, довжина, маса вимірюються в одиницях

$$\tau = \frac{\eta_0}{S_0} \quad l_0 = \sqrt{\frac{\eta_0}{\rho}} \tau_0 \quad m_0 = \rho l_0^3 \quad (1.12)$$

Міра  $1/\tau_0$  дає шкалу зсуву, де відбувається зміцнення, а довжина  $l_0$  відповідає гідродинамічній шкалі довжини.

Припускається, що проста зсувна течія під дією стороннього напруження зсуву передбачає поле швидкостей  $\vec{v} = (u(z, t), 0, 0)$  а зовнішнє напруження відповідає межовій умові

$$S(z, t)|_{z=\pm h} = S_e \quad (1.13)$$

де  $h$  - половина ширини потоку,  $S_e$  – зовнішнє напруження на краю потоку. Вводиться позначення для напруження зсуву

$$S(z, t) = \eta(\phi) \dot{\gamma}(z, t) \quad (1.14)$$

із мірою зсуву

$$\dot{\gamma}(z, t) = \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \quad (1.15)$$

Вирази (1) та (6) стають відповідно

$$\rho \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} S(z, t) \quad (1.16)$$

$$r \frac{\partial \phi(z, t)}{\partial t} = -|\dot{\gamma}(z, t)|(\phi(z, t) - \phi^*(S(z, t))) \quad (1.17)$$

Властивість дилатантних матеріалів до швидкого зміцнення при зовнішньому напруженні є досить цікавою. В даній моделі ця властивість матеріалу представлена виразом (7) у якому проміжок часу релаксації залежить від міри зсуву. Щоб показати це у моделі, припустимо, що шар матеріалу товщиною  $h$  приходить у рух через зміщення верхньої стінки посудини на висоті  $z = h$  у той час, як нижня стінка посудини залишається нерухомою на висоті  $z = 0$ . Нехай  $U(t) = u(h, t)$  швидкість верхньої стінки. Від самого початку, матеріал знаходився у стані спокою:

$$u(z, t) = 0, \quad \phi(z, t) = 0, \quad U(t) = 0, \quad \text{для } t < 0 \quad (1.18)$$

Тоді, верхня стінка різко почала рух із швидкістю  $u_0$  у момент часу  $t = 0$ .

Для  $t > 0$  швидкість верхньої стінки визначається виразами (16) та (17)

$$m \frac{dU(t)}{dt} = -\eta(\phi(h, t)) \left. \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right|_{z=h} \quad (1.19)$$

де  $m$  – маса одиниці довжини верхньої стінки.

Верхня стінка швидко уповільнюється зі зміцненням матеріалу і врешті-решт зупиняється.

Важливо зазначити, що остаточне переміщення верхньої стінки мало залежить від  $u_0$  за великих її показниках[3]. Це пояснюється тим, що матеріал проявляє максимальне зміцнення на деякому етапі деформації та не може деформуватися далі.

Властивість дилатантних матеріалів до швидкого зміцнення при зовнішньому зсувному напруженні може бути використана для додаткового зміцнення матеріалів у блоці та підвищити стійкість до куль та уламків з бойовою частиною з досить твердих матеріалів.

## II. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

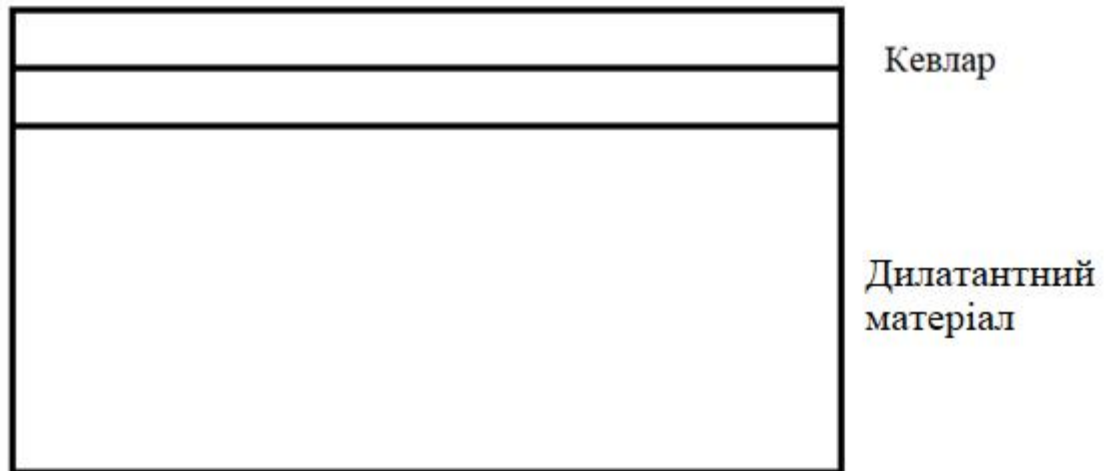
Елементи броні, що розглядаються у роботі були створені з одних і тих самих матеріалів: арамідної тканини(кевлар), надвисокомолекулярного поліетилену та дилатантного матеріалу, але за різними схемами.

У роботі використовувався дилатантний матеріал наступного складу: 80% полівінілацетат, 20% тетраборат натрію; епоксидна смола ЕД-14.

Для проведення дослідження були створені 3 варіанти елементів броні.

### I тип

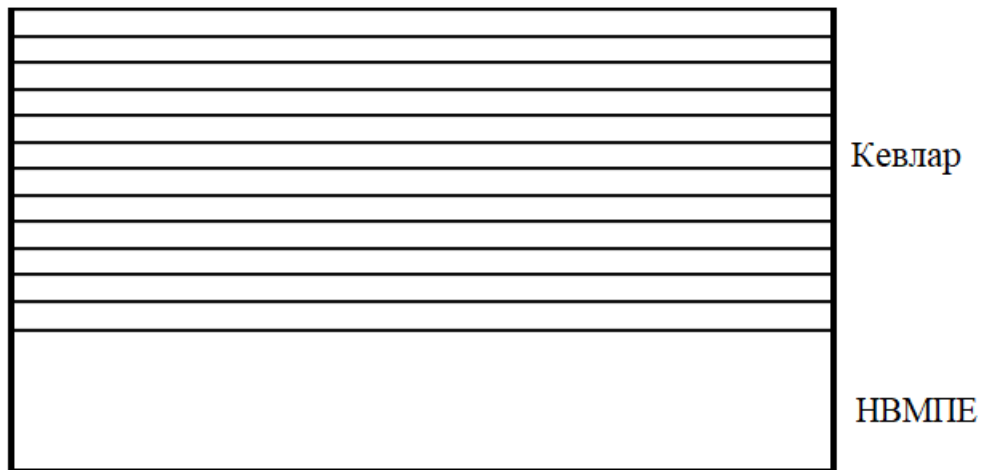
Елемент складається з двох шарів кевлару, поєднаних між собою епоксидною смолою та шару дилатантного матеріалу.



**Рис. 2.1** Схема I елементу. 2 шари кевлару поєднані епоксидною смолою, сумарна товщина 2,3 мм; шар дилатантного матеріалу товщиною 10 мм

### II тип

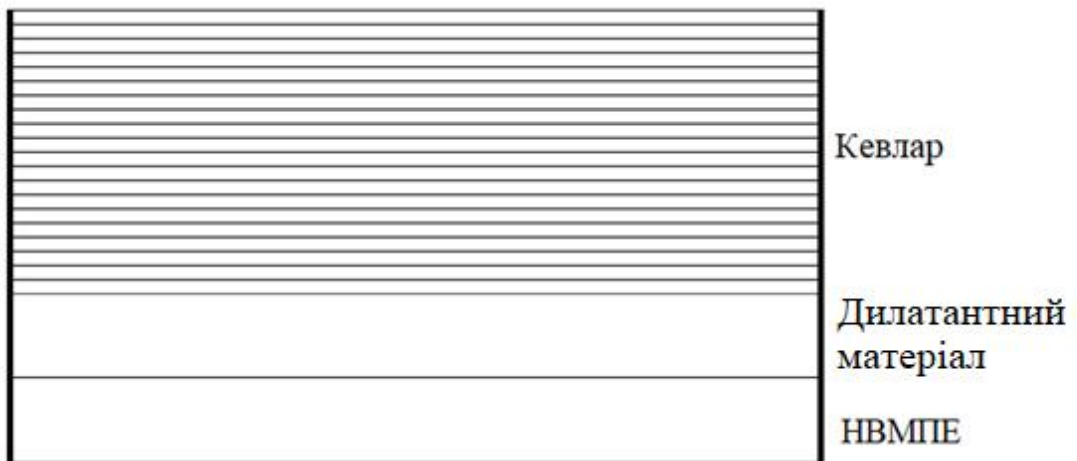
Елемент складається з 12 шарів кевлару, укладених гармошкою та поєднаних між собою епоксидною смолою та шар НВМПЕ.



**Рис. 2.2** Схема II елемента. 12 шарів кевлару поєднані епоксидною смолою, сумарна товщина 15 мм; шар НВМПЕ товщиною 10 мм

### III тип

Елемент складається з 20 шарів кевлару, укладених гармошкою та поєднаних між собою епоксидною смолою, шару дилатантного матеріалу та шару НВМПЕ.



**Рис. 2.3** Схема III елемента. 20 шарів кевлару поєднані епоксидною смолою, сумарна товщина 26,7 мм; шар дилатантного матеріалу товщиною 10 мм; шар НВМПЕ товщиною 10 мм

Для оцінки ефективності створених елементів були проведені експериментальні дослідження, а саме – випробування на полігоні. Точність

даних вимірів є доволі низькою, але добре підходить для базової оцінки захисних характеристик кожної з представлених схем та дозволяє зрозуміти, яка з них найбільш ефективна.

Відстріл проводився з вогнепальної зброї – пістолета Глок 17, який стоїть на озброєнні поліції та армії більш ніж 30 країн. Модель затверджена керівництвом НАТО у якості одного з основних зразків особистої зброї. Пістолет використовує набої 9 × 19 мм Парабеллум зі свинцевим осердям та латунною оболонкою.

### III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Результати відстрілу пластин

Дистанція до об'єкта – 8 метрів.

##### **I тип**

Результат: куля пробиває елемент наскрізь.

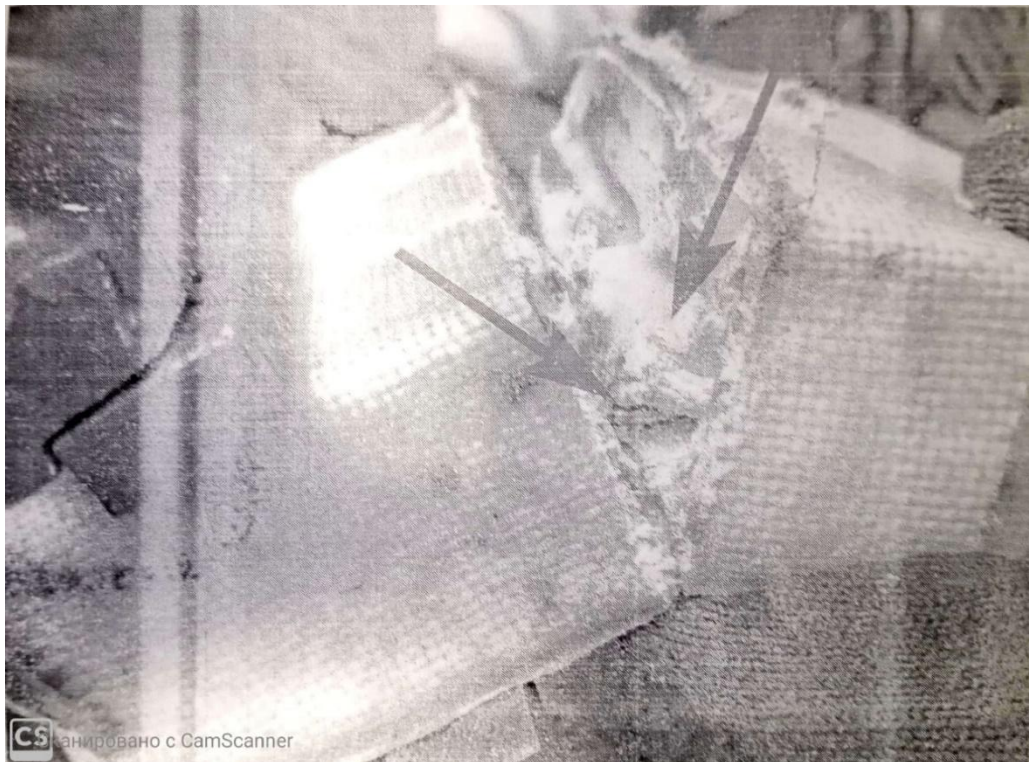
##### **II тип:**

Куля проходить через елемент наскрізь, якщо входить з боку шарів кевлару.

У випадку, коли куля входить з боку НВМПЕ, вона зупиняється останніми шарами кевлару, при цьому помітний вигин задніх шарів кевлару.

##### **III тип:**

Витримує влучання вищевказаної кулі в обох напрямках. У випадку влучання з боку поліетилену, куля проходить шар НВМПЕ, шар дилатантного матеріалу, декілька шарів кевлару і остаточно зупиняється на 4-5 його шарі. При цьому сама куля деформується до майже плоскої форми.



**Рис. 3.1** Розрізаний елемент типу III. Стрілками відмічена куля всередині елемента(влучання з боку НВМПЕ)



Значного вигину задніх шарів кевлару не спостерігається. На фотографії можна помітити, що у шарі НВМПЕ вхідна борозна від кулі зміщена та розширюється поступово.



**Рис. 3.2** Деформована куля(влучання з боку НВМПЕ)

У випадку влучання з боку кевлару, куля проходить 20 шарів кевлару і зупиняється шаром дилатантного матеріалу, не доходячи до шару НВМПЕ. Куля при цьому достатньо сильно деформується, а її форма нагадує грибовидну. Очевидно, що вигину шару НВМПЕ не спостерігається.



**Рис. 3.1** Розрізаний елемент типу III. Стрілками відмічена куля всередині елемента(влучання з боку кевлару)



**Рис. 3.2** Деформована куля(влучання з боку кевлару)

### 3.2 Обговорення результатів

Повна непридатність елемента I для зупинки кулі, вказує лише на те, що незважаючи на досить велику міцність і модулі пружності, кевлар здатен до протидії великим, майже миттєвим навантаженням лише у складі комплексної шаруватої системи, так само, як і дилатантні матеріали, що мають ряд цікавих та корисних властивостей, можуть ефективно використовуватися лише як частина системи, а не повністю самостійні матеріали.

Пробивання елемента II при влучанні з боку шарів кевлару, але його відсутність при влучанні з боку НВМПЕ вказує на те, що використання безпосередньо кевлару у первинних шарах броні не є ефективним для захисту від кулі.

Значна деформація кулі, а також відсутність вигину задніх шарів броні при влучанні у елемент III говорить про те, що з представлених він найкраще розподіляє по площі та поглинає кінетичну енергію влучившої кулі.

Шари арамідної тканини досить добре розподіляють по своїй площі та поглинають енергію вже деформованої кулі, що видно через вигин неушкоджених шарів кевлару, але вони не можуть надати необхідну міру деформації влучившій кулі, якщо вони є первинними шарами елемента броні. Також, пошкодження від влучання знижують ефективність шарів кевлару по всій їх площі, через деформацію та розтяг тканини, та розрив впорядкованої пряжі. Це відбувається через те, що кожний розрив на тканині виступає концентратором напружень, і навіть за невеликого зовнішнього навантаження, напруження біля розриву будуть більші, ніж середні по матеріалу.

Кевлар проявляє себе, як гарний компонент для шаруватої системи, який затримує вже деформований снаряд і поглинає його залишкову кінетичну енергію. Але він не підходить для використання в первинних шарах броні, через низьку витривалість та неспроможність до сильної деформації кулі.

Шар з НВМПЕ частково відповідає за досить високу ступінь деформації влучившої кулі, при цьому пошкодження самого шару НВМПЕ локалізовані у місці влучання.

Дилатантний матеріал проявив себе досить непогано. Зважаючи на те, що після деякої порогової швидкості дилатантний матеріал не зазнає додаткового зміцнення, його зупиняюча дія все одно виявилась помітною. Щоб це зрозуміти, необхідно порівняти результати влучання кулі у елементи II та III з боку НВМПЕ. У випадку елементу II куля пройшла майже всі шари кевлару і зупинилась на останніх, у той час як у випадку елементу III куля зупинилась вже на 4-5 шарі кевлару. Неможливо зробити однозначний висновок, щодо ролі дилатантного матеріалу у процесі деформації кулі, але значне спотворення профілю кулі у випадку проходження шарів НВМПЕ-ДМ порівняно з її деформацією при проходженні 20 шарів кевлару, вказує на те, що дилатантні матеріали можуть з доволі великою ефективністю використовуватись у конструюванні м'якої броні для надання додаткового захисту.

Детальніше розглянемо модель, а саме моделювання ударного зміцнення. Нехай  $U(t) = u(h, t)$  швидкість верхніх шарів. Від самого початку, матеріал знаходився у стані спокою:

$$u(z, t) = 0, \quad \phi(z, t) = 0, \quad U(t) = 0, \quad \text{для } t < 0$$

Тоді, верхні шари різко почали рух із швидкістю  $u_0$  у момент часу  $t = 0$ .

$$m \frac{dU(t)}{dt} = -\eta(\phi(h, t)) \left. \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \right|_{z=h}$$

У випадку влучання кулі, очевидно, що її швидкість починає залежати від  $h$  тільки після моменту влучання, а значить після ударного зміцнення дилатантного матеріалу. Тобто, можна зробити висновок, що товщина шару дилатантного матеріалу мало впливає на його властивість до ударного зміцнення і воно здебільшого залежить від внутрішніх параметрів рідини та швидкості, з якою рухається куля.

З результатів відстрілу пластин та розглянутої моделі динаміки дилатантного матеріалу також можна зробити припущення, що вона може бути ефективно використана у м'якій композитній броні, але не у вигляді одного доволі товстого шару, а у вигляді великої кількості тонких прошарків між іншими частинами композиту.

Також було показано, що зі збільшенням кількості шарів, системи, що містять матрицю більш ефективні, ніж ті, що мають лише тканину. Відзначається, що навіть незважаючи на гнучкість системи лише з тканини, що дозволяє їй поглинати більше кінетичної енергії снаряду, утворений снарядом конус занадто глибокий, щоб вважати її ефективною для захисту.

На основі отриманих даних проведемо розрахунки частини кінетичної енергії, яка поглинається у різних частинах елемента. Будемо вважати, що вся кінетична енергія витрачається на деформацію кулі та руйнування шарів композитного матеріалу, при цьому нехтуємо втратами енергії на створення теплових та звукових хвиль, тертя. Прийmemo, що куля рухається і влучає в елемент броні по нормалі до площини елемента.

Для оцінки енергії деформації кулі використаємо формулу питомої енергії зміни форми з енергетичної теорії міцності (Бельтрамі, 1885р.; Хубер 1904р.).

$$u = \frac{1 + \mu}{6E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] \quad (3.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $E$  – модуль Юнга,  $\sigma_i$  – нормальні напруження на відповідних осях. Оберемо систему координат так, щоб траєкторія кулі співпадала з віссю  $OZ$ . Зовнішнє навантаження співпадає з одною з осей, тобто маємо лише одне ненульове нормальне напруження у матеріалі. Вираз (3.1) приймає вид:

$$u = \frac{1 + \mu}{6E} [2\sigma_z^2] \quad (3.2)$$



Частка деформованого об'єму кулі складає 20% для елемента II, 50% для елемента III (з боку кевлару), близько 100% для елемента III (з боку НВМПЕ). Початковий об'єм кулі складає  $V = 0,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Тобто отримуємо енергію деформації кулі, як  $0,2uV$ ;  $0,5uV$ ;  $uV$  відповідно. Об'єм кулі можна розрахувати, знаючи її масу та густину свинця.

Запишемо закон збереження енергії для елементів II та III.

$$\begin{aligned} W &= 0,2uV + U_{\text{НВМПЕ}} + 10U_K \\ W &= uV + U_{\text{НВМПЕ}} + 4U_K + U_{\text{ДМ}} \\ W &= 0,5uV + 20U_K + U_{\text{ДМ}} \end{aligned} \tag{3.3}$$

де  $W$  – кінетична енергія кулі;  $U_K$  – енергія, яку поглинає один шар кевлару;  $U_{\text{НВМПЕ}}$  – енергія, яку поглинає один шар НВМПЕ, товщиною 10 мм;  $U_{\text{ДМ}}$  – енергія, яку поглинає один шар дилатантного матеріалу. Для використаного набою кінетична енергія кулі дорівнює 570 Дж.

Запишемо розв'язки для даної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

$$\begin{aligned} U_{\text{ДМ}} &= 0,23W - 0,73uV \\ U_{\text{НВМПЕ}} &= 0,62W - 0,32uV \\ U_K &= 0,038W + 0,012uV \end{aligned} \tag{3.4}$$

Перевіримо розмірності

$$\text{Дж} = \text{Дж} - \text{Па} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж}$$

Підставимо числові данні.

$$\begin{aligned} U_{\text{ДМ}} &= 0,23 \cdot 570 - 0,73 \cdot 4,3 \cdot 10^3 \cdot 0,61 \cdot 10^{-6} = 131,098 \text{ Дж} \\ U_{\text{НВМПЕ}} &= 0,62 \cdot 570 - 0,32 \cdot 4,3 \cdot 10^3 \cdot 0,61 \cdot 10^{-6} = 353,399 \text{ Дж} \\ U_K &= 0,038 \cdot 570 - 0,012 \cdot 4,3 \cdot 10^3 \cdot 0,61 \cdot 10^{-6} = 21,660 \text{ Дж} \end{aligned} \tag{3.5}$$

Відносно повної кінетичної енергії кулі це складає

$$\varepsilon_{\text{ДМ}} = 23\%; \varepsilon_{\text{НВМПЕ}} = 61\%; \varepsilon_{\text{К}} = 3,8\%$$

(3.6)

З розрахунків видно, що найбільшу частку енергії поглинає шар НВМПЕ, далі йде шар дилатантної рідини і менше всього енергії поглинає один шар кевлару в матриці з епоксидної смоли.

#### IV. ВИСНОВКИ

1. В результаті експерименту виявлено, що найбільш перспективною є трьохкомпонентна структура, що складається з шарів НВМПЕ, дилатантних матеріалів та кевлару.
2. Елементи броні, що містять тільки два шари кевлару та шар дилатантного матеріалу малоефективні для захисту від вогнепальної зброї(пістолет Глок 17) незважаючи на простоту їх виробництва.
3. Також перспективною структурою з розглянутих є шар НВМПЕ комбінований з декількома шарами кевлару. Структура має доволі високу ударну міцність, що дозволяє зупинити налітаючу кулю.
4. Порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками дозволяє зробити висновок, що основну роль в поглинанні енергії удару виконує шар НВМПЕ(61%), доволі велику частину енергії поглинає шар дилатантного матеріалу(23%), а один шар кевлару може поглинути лише невелику частину енергії кулі(38%).
5. Частина енергії, що витрачається на деформацію свинцевої кулі є малою відносно початкової кінетичної енергії кулі, а удар можна вважати абсолютно непружним.



## V. СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Fasil Mohi ud din EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF KEVLAR FIBRE. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 04, (2017) 3466-3473.
- [2] Hiizu Nakanishi, Shin-ichiro Nagahiro, Namiko Mitarai Fluid dynamics of dilatant fluid. Phys. Rev. E **85**(1), 011401 (2012)
- [3] Hiizu Nakanishi, Namiko Mitarai Fluid dynamics and jamming in a dilatant fluid.
- [4] G. Gopinath, J.Q. Zheng, R.C. Batra Effect of matrix on ballistic performance of soft body armor. Composite Structures 94 (2012) 2690–2696.
- [5] Андреева И. Н., Веселовская Е. В., Наливайко Е. И. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности., Л.: Химия, 1982., 80 с.
- [6] Иванова В. С., Городиенко Л. К., Геминев В. Н. и др. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / Иванова В.С., Наука, 1965., 180 с.
- [7] Kurtz, Steven M., The UHMWPE handbook : ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement., Amsterdam: Academic Press, 2004., 379.
- [8] G. Gopinath, J.Q. Zheng, R.C. Effect of frame size, frame type, and clamping pressure on the ballistic performance of soft body armor. Composites: Part B 39 (2008) 476–489.