

С. Л. Лігезін<sup>1</sup>, Ph.D. мол. наук. співроб., С. О. Рябінін<sup>1</sup>, Ph.D. ст. наук. співроб.,  
О. Ю. Федоренко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, В. О. Верещак<sup>2</sup>, мол. наук. співроб.,  
А. В. Захаров<sup>1</sup>, канд. техн. наук, заст. зав. НДЧ,  
М. М. Будьонний<sup>3</sup>, канд. техн. наук, пров. інженер

## УНІФІКОВАНИЙ УТИЛІЗАЦІЙНИЙ КУМУЛЯТИВНИЙ ЗАРЯД ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

<sup>2</sup> Державна наукова установа «Науково-технологічний комплекс  
«Інститут монокристалів» Національної академії наук України», Харків

<sup>3</sup> ДП «Харківстандартметрологія»

**Ключові слова:** утилізаційний кумулятивний заряд, гуманітарне розмінування, контрольований підрив, технологія 3D-друку, високонаповнений філамент, дисперсність наповнювача, технологічні властивості композиту.

**Вступ.** Однією з актуальних проблем сучасності залишається наявність вибухо-небезпечних залишків війни, що створюють значну загрозу для мирного населення та перешкоджають соціально-економічному розвитку постраждалих територій. Майже через три роки після початку повномасштабного вторгнення Росії наша країна стала найбільш замінованою серед країн світу: до 26 % території України «засіяно» вибухо-небезпечними боєприпасами. Значна частина сільськогосподарських угідь та земель, що підлягають охороні, ймовірно, буде недоступною протягом багатьох років, що ставить складні питання щодо майбутнього цих територій та їхніх мешканців [1]. У цьому контексті особливого значення набуває гуманітарне розмінування, яке потребує ефективних, безпечних, технологічно простих та економічно доцільних технічних рішень. Одним з перспективних напрямів є застосування малогабаритних утилізаційних кумулятивних зарядів (УКЗ) для контрольованого підриву мін та боєприпасів шляхом спрямованого енергетичного впливу [2].

Розробка нових технологій виготовлення інженерних засобів для гуманітарного розмінування є важливим завданням, вирішення якого обумовлює ефективність робіт фахівців для швидкого повернення постраждалих від війни територій країни до безпечного життя [3]. Виготовлення УКЗ з використанням адитивних технологій, зокрема 3D-друку, відкриває нові можливості щодо підвищення гнучкості конструктивних рішень, зниження маси та вартості виробів, а також локалізації виробництва в умовах обмеженого ресурсу [4]. 3D-друк дозволяє створювати складні геометричні форми. В свою чергу, удосконалення складу високонаповнених матеріалів на основі полімерів із функціональними наповнювачами має забезпечити необхідний рівень міцності, термостійкості та енергетичної ефективності виробів [5].

У межах даної роботи передбачено створення експериментальних зразків малих кумулятивних зарядів, оптимізацію їхньої геометрії та технології друку, а також оцінку їх ефективності на основі SWOT-аналізу. Отримані результати створять основу для формування нових підходів до виготовлення інженерних засобів гуманітарного розмінування, орієнтованих на безпеку, мобільність та технологічну незалежність.

**Об’єкт дослідження та його технологічний аудит.** Об’єкт дослідження – утилізаційні кумулятивні заряди (УКЗ), призначені для безпечного знешкодження боеприпасів із неповною детонацією або для ініціювання заряду вибухової речовини шляхом спрямованого підриву та попередження наслідків від неконтрольованого вибуху боеприпасів. Технологічний аудит УКЗ виявляє недостатню вивченість питання технології їх 3D-друку високонаповненим філаментом, що уповільнює процес виготовлення, здорожчає та ускладнює виробництво. Крім того, недоопрацьованими залишаються питання забруднення ґрунтів рештками УКЗ та можливих шляхів виключення їх негативного впливу на довкілля.

**Мета та задачі дослідження.** Мета роботи – дослідження можливості використання високонаповнених філаментів для утилізаційних кумулятивних зарядів, призначених для гуманітарного розмінування, шляхом 3D друку.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- дослідити існуючі рішення проблеми, визначити невирішені питання для масштабування технології 3D-друку УКЗ;
- розробити склади високонаповнених металовмісних філаментів для виготовлення кумулятивних воронок для УКЗ;
- дослідити технологічні властивості одержаних композитних філаментів;
- визначити переваги і недоліки використання для 3D друку кумулятивних воронок і вражаючих елементів та провести SWOT-аналіз результатів дослідження.

**Дослідження існуючих рішень проблеми.** Малогабаритні УКЗ призначені для безпечного розмінування (утилізації) боеприпасів, які неможливо вилучити, через що доводиться їх знешкодувати на місці виявлення. Це відбувається шляхом підриву спрямованої дії, що призводить до руйнації (часткової або повної) корпусів боеприпасів [6]. Відповідно, такий процес забезпечує подальшу роботу з залишковою вибуховою речовиною у снарядах. Важливим є те, що при використанні малих кумулятивних зарядів (МКЗ) відсутні негативні наслідки від штатного вибуху боеприпасів. Зокрема: руйнація об’єктів, забруднення навколишньої території осколками, зміна рельєфу місцевості [7].

Для 3D-друку деталей, які потребують високої міцності, жорсткості, термостійкості або інших спеціальних властивостей використовують високонаповнені філаменти. Висконаповнений філамент – це матеріал, в який додано велику кількість наповнювачів. У порівнянні зі звичайним філаментом такі наповнювачі як скловолокно, вуглецеве волокно, метал або кераміка значно покращують властивості виробів: міцність, твердість, температурну стійкість [8, 9]. Можливість варіювання властивостей залежить від виду наповнювача, що дозволяє використовувати їх у широкому спектрі застосувань. Для збільшення міцності і жорсткості виробів як наповнювачі можна використовувати скловолокно; для зниження густини при одночасному збільшенні міцності доцільним є використання вуглецевого волокна; використання як наповнювача металів покращує теплопровідність, а застосування керамічних наповнювачів дозволяє підвищити абразивну і температуростійкість [10, 11].

Основними перевагами високонаповнених філаментів є:

- підвищені фізико- механічні властивості дозволяють створювати більш надійні деталі;
- підвищена температуростійкість при використанні жаростійкого наповнювача дозволяє використовувати надруковані деталі в умовах високих температур;
- зменшена усадка забезпечує кращу точність друку.

На наш погляд, 3D-друк високонаповненим філаментом є дуже перспективним для виготовлення кумулятивних воронок різних форм, від класичних до воронок, що утворюють ударні ядра (рис. 1). Як видно з рис. 1, деякі види кумулятивних воронок через змінну конусність та товщину мають досить складну форму та профіль, але при друці на це майже не потрібно звертати увагу, що дозволить створювати воронки різних калібрів для знешкодження вибухонебезпечних предметів з урахуванням їх особливостей.

Визначення комплексної діелектричної проникності ВВКМ, згідно з представленою моделлю, може бути реалізоване із застосуванням метода високочастотної діагностики, що дозволяє реєструвати зміну  $\epsilon'(\omega)$  та  $\epsilon''(\omega)$  у широкому частотному діапазоні. На рисунку 1 наведено характерну частотну залежність дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності для ВВКМ, змодельовану на основі моделі Максвелла-Вагнера.

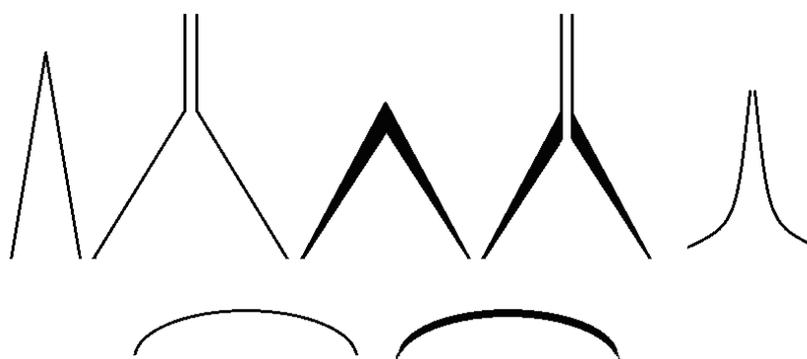


Рисунок 1 – Приклади кумулятивних воронок різних форм, доступних до друку

Завдяки можливості створення металофіламентів заданого складу, можна виготовляти кумулятивні воронки, з використанням різних наповнювачів – металів та їхніх сумішей, а також природних неметалів. Таким чином, завдяки корегуванню складу металофіламентів можна досягати бажаної ефективності з точки зору бронепробиття за умови мінімальної собівартості виробництва. Для підвищення здатності УКЗ до бронепробиття до філаменту в якості складової наповнювача слід вводити високощільні метали (наприклад, вольфрам), що дозволить підвищити густину композиту для збільшення кумулятивного потоку [12]. Для ілюстрації вищевикладеного наводимо, як приклад, дані щодо впливу добавки вольфраму до складу суміші на основі міді (табл. 1).

Таблиця 1 – Умовний приріст густини сумішей на основі міді, допованої вольфрамом, за результатами прогнозного розрахунку

Вміст вольфраму, мас. %	Умовна густина суміші, г/см <sup>3</sup>	Приріст умовної густини суміші Cu–W відносно чистої міді	Зміна собівартості виробу, %
0	8,96	1,00	–
5	9,47	1,06	+3,89
10	9,99	1,11	+7,78
15	10,50	1,17	+11,67
20	11,02	1,23	+15,55
25	11,53	1,29	+19,44

Ці дані, одержані розрахунковим шляхом з використанням адитивного методу не враховують хімічних взаємодій, але в достатній мірі характеризують порядок значень умовної густини сумішей системи «Cu–W» при використанні як наповнювача метало-полімерних філаментів для виготовлення кумулятивних воронок.

Завдяки можливості створення різних сумішей металів можна підібрати такі що задовольнятимуть як за ефективністю дії (ступенем бронепробиття), так і за вартістю. Для зменшення собівартості виробу слід також розглянути можливість створення кумулятивних керамічних воронок з використанням дешевих природних мінеральних наповнювачів. Але ці ідеї всі вимагають проведення додаткових досліджень для визначення впливу складу метало-полімерних і не металополімерних композитів на рівень потужності кумулятивних воронок та їхньої придатності при використанні для утилізації різних вибухонебезпечних предметів.

### **Обговорення результатів досліджень**

В рамках проведених досліджень був розроблений склад високонаповненого філаменту на основі мідно-полімерної композиції для 3D друку кумулятивної воронки. Слід зазначити, що технологічні властивості високонаповнених філаментів для 3D друку залежать у великій мірі від дисперсності часток наповнювача. Враховуючи цей факт в задачу досліджень входило визначення технологічно оптимального фракційного складу порошку наповнювача для PLA-філаментів з високим ступенем наповнення.

Мідний порошок, який використовували як основну складову наповнювача, отримували хімічним відновленням водорозчинної мідної солі органічним відновником у водному середовищі. Як відомо, розміри часток металу, одержаних таким способом, залежать від тривалості хімічної реакції відновлення. Одержання мікронізованих порошоків різної дисперсності здійснювали шляхом контролю температури реакції та варіювання швидкості внесення органічного відновника, що дозволяло регулювати тривалість процесу відновлення міді. Утворення найбільш дисперсних часточки (0,1-0,5 мкм) відбувалось за температури, близької до температури початку відновлення міді, але швидкість реакції в цьому випадку є мінімальною, а тому синтез в таких умовах не матиме практичного значення через надзвичайно велику тривалість та енерговитрати на роботу обладнання (мішалок, термостатів тощо).

З використанням отриманих порошоків досліджували вплив дисперсності наповнювача для забезпечення необхідних для стабільної екструзії та якісного друку технологічних властивостей філаменту. Експериментально встановлено, що дрібнодисперсний мідний наповнювач (нано- та субмікронний діапазон) краще диспергується у PLA і забезпечує отримання більш рівномірної мікроструктури філаменту. Натомість частки розміром від 10 до 100 мкм і більше схильні створювати агломерати, які порушують плинність розплаву та можуть спричинити виникнення дефектів при екструзії через закупорку сопла та неоднорідність суміші. В той же час надто дрібні частки можуть зробити матеріал занадто в'язким для екструзії, оскільки зменшення розмірів часток і збільшення питомої поверхні порошку наповнювача викликає підвищення в'язкості внаслідок зростання інтенсивності міжфазних взаємодій. Це може викликати небажане підвищення тиску у соплі, що призводить до нерівномірної подачі.

Слід зазначити, що грубодисперсні частки «забивають» сопло. Крім того вони діють як концентратори напружень, які можуть викликати появу мікротріщин, особливо при високому ступені наповнення філаменту (понад 50 %) [13]. Натомість дисперсні частки мають кращу адгезію з полімером, що в кінцевому рахунку дозволяє одержати більш міцний та ударостійкий виріб. Крім того, тонкодисперсний наповнювач забезпе-

чує більш рівномірне нагрівання і охолодження шарів. Однак, нанорозмірні часточки з одного боку дозволяють покращити механічні властивості виробу, а з іншого вимагають ретельного диспергування та поверхневої модифікації. На наш погляд, використання нанорозмірних наповнювачів є економічно недоцільним через порівняно високу вартість і складну технологію їх одержання.

Враховуючи вищевикладені спостереження, що ґрунтуються на практичному досвіді, зроблено висновок, що збільшення розмірів часток наповнювача понад 50 мкм негативно позначається на процесах екструзії і друку. Оптимальним для високонаповнених PLA більш тонкої, втім не нанодисперсної фракції наповнювача з вузьким розподілом розмірів часток у діапазоні ~1–10 мкм. Слід також враховувати, що при використанні ультрадисперсного наповнювача з високою твердістю є ризик абразивного зношування сопла та шнека через високу питому поверхню порошку. В такому разі слід використовувати карбідні сопла або ті, які виготовлені із загартованих сталей.

Друк воронки здійснювали з використанням високонаповненого філаменту, виготовленого з мідно-полімерного композиту, що містив 20 мас. % PLA і 80 мас. % наповнювача, до складу якого входили ультрадисперсні порошки міді і вольфраму у співвідношенні 15:1 (рис. 2а). Фото філаменту, виготовленого на лабораторному екструдері (рис. 2б), надано на рисунку 2в.

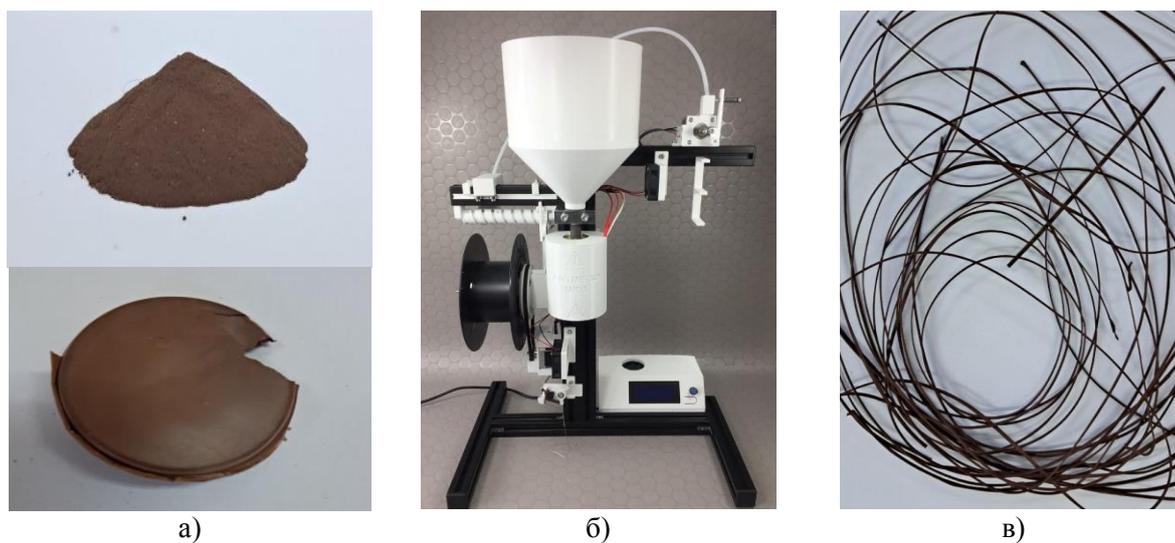


Рисунок 2 – Фотоілюстрація виготовлення високонаповненого філаменту:  
а) високонаповнений мідно-полімерний композит; б) лабораторний екструдер;  
в) філамент для друку воронки

Креслення і 3D модель кумулятивної воронки представлені на рисунку 3.

Друк кумулятивної воронки здійснювали на лабораторному 3D принтері (рис. 4а). Тривалість друку воронки при використанні програми Cura соплом 0,6 мм при висоті шару 0,4 мм становила 26 хв. Вага готової воронки 11 г. Зовнішній вигляд надрукованої воронки представлений на рис. 4б. Слід також зазначити, що класичні кумулятивні воронки, надруковані з використанням філаменту на основі металополімерних композитів, не вимагають додаткової термічної обробки, що є їх беззаперечною перевагою.

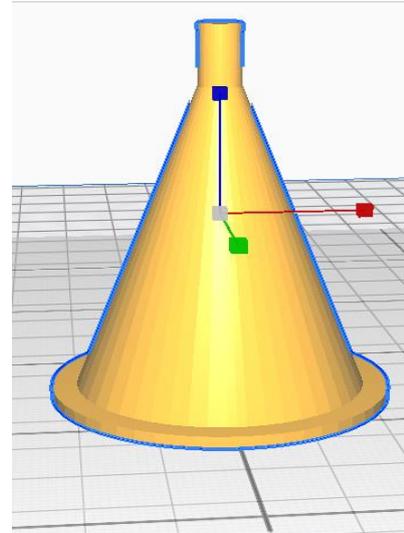
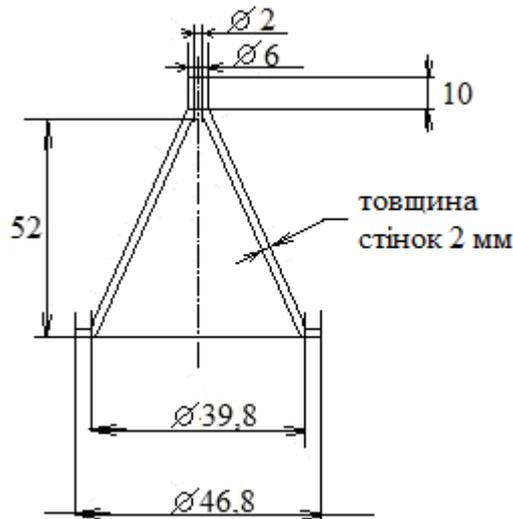


Рисунок 3 – Креслення та 3D модель кумулятивної воронки



а)

б)

Рисунок 4 – Фотоілюстрація друку композитної мідно-пластикової кумулятивної воронки, виготовленої за вищевказаним кресленням

На 3D принтерах можна друкувати як кумулятивні воронки різних форм і розмірів (див. рис. 1), так і повні комплекти УКЗ. Можливе найпростіше, на наш погляд, виконання УКЗ ілюструє рисунок 5. Технологічна схема виготовлення УКЗ такого типу включає такі операції:

- 1) друк різьбової кришки з отвором під детонатор;
- 2) друк кумулятивної воронки;
- 3) друк фокусної трубки для правильного формування кумулятивного потоку;
- 4) друк трубки для спорядження вибуховою речовиною;
- 5) зборка УКЗ;
- 6) складання комплектів з різних калібрів УКЗ та їх пакування.

Серед переваг повного 3D друку УКЗ слід назвати наступні:

- повна локалізація та децентралізація виробництва;
- можливість друкувати УКЗ різних форм-факторів і діаметрів;
- УКЗ легко збирається з базового конструктору безпосередньо на місці;
- надзвичайно низька собівартість одного виробу, як з точки зору грошового еквіваленту так і з точки зору витрат людино-годин на виріб.

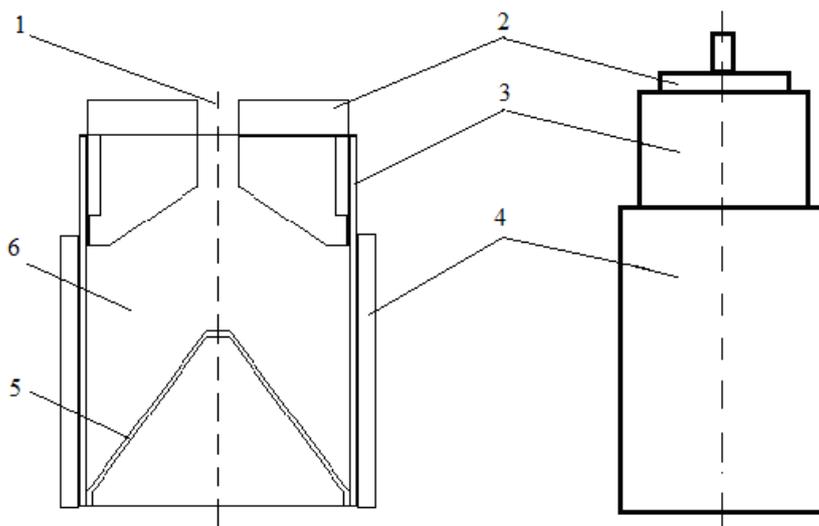


Рисунок 5 – Принципове креслення утилізаційного кумулятивного заряду УКЗ (один з можливих варіантів виконання): 1 – місце під детонатор, 2 – друкована різьбова кришка з отвором під детонатор; 3 – трубка для спорядження ВР; 4 – фокусна трубка для правильного формування кумулятивного потоку; 5 – кумулятивна воронка; 6 – вибухова речовина

На рисунку 6 продемонстровано вигляд готового неспорядженого УКЗ на штативі.



а)



б)

Рисунок 6 – Зовнішній вигляд надрукованого УКЗ

Така технологія дозволяє виготовляти і більш складні вироби для отримання лінійних утилізаційних кумулятивних зарядів (ЛУКЗ). Також готовий виріб можна додатково модифікувати без суттєвої переробки для роботи з роботизованими системами чи дистанційним підривом. Враховуючи умови застосування, УКЗ також доцільно використовувати для утилізації для дефрагментації корпусів боєприпасів.

**SWOT-аналіз результатів дослідження.** Сильними сторонами (S – Strengths) запропонованої розробки є використання як наповнювача ультрадисперсного порошку міді з додаванням вольфраму, що забезпечує високу густину композиту, що є критично важливим для формування кумулятивного струменя з високою пробивною здатністю. Застосування як матричного матеріалу PLA є вигідним з економічної та екологічної точок зору: цей полімер є доступним у великій кількості і має відносно низьку вартість; в природних умовах він здатний до біодеструкції, що виключає засмічення земель залишками використаних УКЗ. Перевагами виготовлення виробів шляхом 3D-друку є гнучкість дизайну: є можливість швидко змінювати геометрію лійки для адаптації до різних задач, а також використання пасивної вставки (лінзи), яка збільшує швидкість обтискання прилеглих до верхівки лійки ділянок облицювання за рахунок скорочення кута між ним і фронтом детонаційної хвилі. Крім того така технологія здатна забезпечити повний цикл виробництва без складного металообробного обладнання лише за допомогою FDM-принтера. Важливими позитивними факторами є також зменшення складності конструкції ваги УКЗ у порівнянні з металевими аналогами, а також безпечність виробів при транспортуванні та спорядженні з точки зору утворення вражаючих елементів, оскільки всі деталі виробу виготовлені з полімер матричного композиту.

Серед недоліків (W – Weaknesses) слід назвати недостатню адгезію твердого наповнювача до PLA, що при використанні надмірної кількості наповнювача підвищує крихкість композиту та може спричинити виникнення мікротріщин під час виникнення ударних навантажень при транспортуванні. Крім того, слід враховувати, що філаменти з високим вмістом твердих неорганічних наповнювачів (80 % і більше) потребують особливих умов друку, зокрема зменшення швидкості. Також, необхідно зважати на те, що абразивні частки W або кераміки швидко зношують латунні/мідні сопла, що в ідеалі потребуватиме використання високовартісних сопел (загартованих сталевих або сапфірових тощо).

Характеризуючи (O – Opportunities), тобто можливості і шляхи удосконалення розробки слід зосередитись на оптимізації складу композиту, а саме на розробці полімерної матриці з поліпшеною адгезією до твердих наповнювачів (наприклад, модифікований PLA або суміш PLA/PETG), а також дослідити можливість заміни порошку Cu/W на дешевші (наприклад, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), що дозволить зменшити собівартість УКЗ. Розглядаючи можливості підвищення ефективності технології, слід розглянути потенціал мобільних виробництв – створення мобільних лабораторій друку з розгорнутим обладнанням у вантажних автомобілях або в контейнерах. Також важливим, на наш погляд, є вирішення питання масштабування виробництва УКЗ для участі в міжнародних проєктах з гуманітарного розмінування.

Серед загроз (T – Threats), що здатні загальмувати впровадження розробки, можна назвати, по-перше, відмінності регуляторних обмежень на поводження із вибухонебезпечними речовинами у різних країнах; по-друге – це ризик деградації УКЗ, виготовлених з композиту на основі PLA при тривалому зберіганні в умовах підвищеної вологості, що може спричинити втрати точності лінійних розмірів кумулятивного конусу. Серед технологічних ризиків слід назвати уповільнення швидкості друку та необхідність ретельного контролю параметрів друку. Крім того, висока ціна порошку вольфраму обумовлює певні обмеження для широкого використання та залежність від постачальників.

**Висновки.** Застосування 3D-друку з високонаповнених філаментів відкриває нові можливості для створення ефективних і доступних утилізаційних кумулятивних

зарядів, які призначені для безпечного знешкодження боєприпасів безпосередньо на місці виявлення у випадку якщо їх неможливо вилучити.

В результаті проведених досліджень встановлено вплив дисперсності часток наповнювача на технологічні властивості філаменту та виробів з нього. Показано, що із зменшенням середніх розмірів часток від грубодисперсних (понад 50 мкм) до високодисперсних (в межах 1–10 мкм) відбувається суттєве підвищення міцності виробів (в 2,5 рази), однак помітно погіршується плинність високонаповненої (80 %) розплавленої маси: показник текучості розплаву (ПТР) дослідного композиту становить 5,1 г/10 хв, що уповільнює процес екструзії і вимагає більшої потужності екструдера. Щодо електроопору дослідної полімерної дисперсії, то рівень його залишається близьким до аналогічного показника PLA (2,99·10<sup>13</sup> Ом·мм<sup>2</sup>/м і 10<sup>13</sup> Ом·мм<sup>2</sup>/м відповідно). Цей факт пояснюється тим, що часточки металів у процесі перемішування розплавленої маси вкриваються шаром полімеру, що виключає їх контактування між собою, а отже теплопровідність і електропровідність композиту відповідають показникам його безперервної фази, тобто PLA. Експериментально встановлено, що оптимальна дисперсність часток наповнювача знаходиться в межах 1–10 мкм.

Результати експериментів підтверджують доцільність використання адитивних технологій для виготовлення УКЗ для гуманітарного розмінування, які стануть у пригоді при знешкодженні боєприпасів із неповною детонацією або для ініціювання заряду вибухової речовини боєприпасу на невеликій відстані. На основі проведеного SWOT-аналізу та виявлених внутрішніх і зовнішніх факторів для різних типів їхньої взаємодії обрано основні та допоміжні стратегії для різних сценаріїв розвитку та визначено пріоритетні напрямки подальших досліджень. Розробка має високу прикладну цінність і потенціал до масштабування, проте потребує технологічної оптимізації матеріалу й друку. Зокрема – підвищення термостійкості PLA, покращення зчеплення з наповнювачами та підбір оптимального складу. Подальші дослідження також будуть спрямовані на масштабування виробництва, автоматизацію процесу зборки та адаптацію зарядів до використання з безпілотними платформами. За умови кваліфікованої підтримки запропоновані інженерні рішення можуть стати проривом у напрямку доступних засобів розмінування.

### Література

1. Vasyliuk O. Danger! Mines! The terrible environmental and human cost of Ukraine's minefields. *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. URL: <https://uwecworkgroup.info/danger-mines-the-terrible-environmental-and-human-cost-of-ukraines-minefields/> (дата звернення: 27.08.2025).
2. Park J., Kwon S. Study on the Penetration Performance of a Double-Angle Linear Shaped Charge: Performance Improvement and Miniaturization. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. P. 310. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11040310>.
3. *Humanitarian demining of Ukraine: a problem for 30 years*. URL: <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71> (дата звернення: 27.08.2025).

4. Xue H., Zhou Q., Xiao C., Huang G. Perspectives on additive manufacturing for warhead applications. *Defence Technology*. 2025. Vol. 43. P. 225–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.010>.
5. Angelopoulos P. M., Samouhos M., Taxiarchou M. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37, Part 4. P. 4031–4043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.069>.
6. Walters W. P., Zukas J. A. *Fundamentals of shaped charges*. New York 1989. 398 p. ISBN 0-471-62172-2.
7. Baker E. L., Daniels A., Defisher S., Al-Shehab N., Ng K. W., Fuchs B. E., Cruz F. Development of a small shaped charge insensitive munitions threat test. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 103. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.005>.
8. Chacón J. M., Caminero M. A., Núñez P. J., García-Plaza E., García-Moreno I., Reverte J. M. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 181. P. 107688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>.
9. Shanmugam V., Johnson Rajendran D. J., Babu K., Rajendran S., Veerasimman A., Marimuthu U., Singh S., Das O., Neisiany R. E., Hedenqvist M. S., Berto F., Ramakrishna S. The mechanical testing and performance analysis of polymer–fibre composites prepared through additive manufacturing. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 93. P. 106925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106925>.
10. Majewski T., Trzciński W. A., Szymańczyk L. Studying the Effectiveness of Shaped Charge Jets Created by Graphene-containing Shaped Charge Liners. *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. Probl. Mechatronics. Armament Aviat. Saf. Eng.* 2024. Vol. 15, No. 1. P. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4487>.
11. Liu Z., Lei Q., Xing S. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, iss. 5. P. 3741–3751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>.
12. Dong L. L., Ahangarkani M., Chen W. G., Zhang Y. S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: fabrication, modification and applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 75. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>.
13. Lambos N., Vosniakos G.-C., Papazetis G. Low-cost automatic identification of nozzle clogging in material extrusion 3D printers. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. P. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.039>.

#### Bibliography (transliterated)

1. Vasyliuk O. Danger! Mines! The terrible environmental and human cost of Ukraine's minefields. *Ukraine War Environmental Consequences Work Group*. URL: <https://uwecworkgroup.info/danger-mines-the-terrible-environmental-and-human-cost-of-ukraines-minefields/> (дата звернення: 27.08.2025).

2. Park J., Kwon S. Study on the Penetration Performance of a Double-Angle Linear Shaped Charge: Performance Improvement and Miniaturization. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. P. 310. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11040310>.

3. *Humanitarian demining of Ukraine: a problem for 30 years*. URL: <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71> (дата звернення: 27.08.2025).

4. Xue H., Zhou Q., Xiao C., Huang G. Perspectives on additive manufacturing for warhead applications. *Defence Technology*. 2025. Vol. 43. P. 225–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.010>.

5. Angelopoulos P. M., Samouhos M., Taxiarchou M. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37, Part 4. P. 4031–4043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.069>.

6. Walters W. P., Zukas J. A. *Fundamentals of shaped charges*. New York 1989. 398 p. ISBN 0-471-62172-2.

7. Baker E. L., Daniels A., Defisher S., Al-Shehab N., Ng K. W., Fuchs B. E., Cruz F. Development of a small shaped charge insensitive munitions threat test. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 103. P. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.005>.

8. Chacón J. M., Caminero M. A., Núñez P. J., García-Plaza E., García-Moreno I., Reverte J. M. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 181. P. 107688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>.

9. Shanmugam V., Johnson Rajendran D. J., Babu K., Rajendran S., Veerasimman A., Marimuthu U., Singh S., Das O., Neisiany R. E., Hedenqvist M. S., Berto F., Ramakrishna S. The mechanical testing and performance analysis of polymer–fibre composites prepared through additive manufacturing. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 93. P. 106925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106925>.

10. Majewski T., Trzeciński W. A., Szymańczyk L. Studying the Effectiveness of Shaped Charge Jets Created by Graphene-containing Shaped Charge Liners. *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. Probl. Mechatronics. Armament Aviat. Saf. Eng.* 2024. Vol. 15, No. 1. P. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4487>.

11. Liu Z., Lei Q., Xing S. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8, iss. 5. P. 3741–3751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>.

12. Dong L. L., Ahangarkani M., Chen W. G., Zhang Y. S. Recent progress in development of tungsten-copper composites: fabrication, modification and applications. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018. Vol. 75. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.03.014>.

13. Lambos N., Vosniakos G.-C., Papazetis G. Low-cost automatic identification of nozzle clogging in material extrusion 3D printers. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 51. P. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.039>.

УДК 623.454.372:681.6

С. Л. Лігезін, Ph.D. мол. наук. співроб., С. О. Рябінін, Ph.D. ст. наук. співроб.,  
О. Ю. Федоренко, д-р техн. наук, професор, В. О. Верещак, мол. наук. співроб.,  
А. В. Захаров, канд. техн. наук, заст. зав. НДЧ, М. М. Будьонний, канд. техн. наук,  
пров. інженер

## УНІФІКОВАНИЙ УТИЛІЗАЦІЙНИЙ КУМУЛЯТИВНИЙ ЗАРЯД ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ

У роботі представлено комплексне дослідження перспектив застосування адитивних технологій і матеріалознавчих підходів для розробки малогабаритних утилізаційних засобів гуманітарного розмінування на базі композиційних філаментів із високим ступенем наповнення. Метою дослідження було оцінити матеріалознавчу обґрунтованість підходу й виявити ключові чинники, що визначають баланс між ефективністю дії, технологічністю виготовлення, мобільністю виробництва та екологічною прийнятністю. Аналітична частина включала огляд сучасних підходів до проектування складних геометрій ліжок і критеріїв відбору наповнювачів за техніко-економічними та екологічними показниками, а також обґрунтування критеріїв вибору матеріалів з урахуванням дисперсності наповнювача, адгезії до полімерної матриці та впливу на плинність розплаву. Емпірична частина була спрямована на порівняння матеріальних властивостей надрукованих зразків залежно від характеристик філаменту та якості його дисперсії, оцінку впливу складу матеріалу на механічні й експлуатаційні параметри та придатність до локалізованого виготовлення за ресурсних обмежень. Проведено якісний техно-економічний і стейкхолдерський аналіз, а також SWOT-аналіз, який виокремлює сильні сторони (локалізація виробництва, гнучкість дизайну, потенційно низька собівартість), слабкі сторони (взаємодія матеріал–матриця, питання довговічності), можливості масштабування і ключові ризики, пов'язані з експлуатацією, зберіганням та регуляторними й етичними обмеженнями. Okремо обговорено екологічні та етичні аспекти застосування біорозкладних матриць і шляхи мінімізації негативного впливу на довкілля. Висновки підтверджують перспективність поєднання адитивних процесів із цілеспрямованим матеріальним інжинірингом для створення адаптивних, мобільних і більш доступних рішень гуманітарного розмінування за умови подальшої технологічної оптимізації, комплексної оцінки безпеки та відповідності нормативам. Отримані результати можуть бути корисними для планування дослідницьких програм, технічної експертизи та політико-організаційних рішень у цій сфері.

**Ключові слова:** утилізаційний кумулятивний заряд, гуманітарне розмінування, контрольований підрив, технологія 3D-друку, високонаповнений філамент, дисперсність наповнювача, технологічні властивості композиту.

S. L. Lihezin, S. O. Riabinin, O. Yu. Fedorenko, V. O. Vereshchak, A. V. Zakharov,  
M. M. Budonnyi

**STANDARDIZED DISPOSAL SHAPED CHARGE FOR HUMANITARIAN  
DEMINEING OF TERRITORIES**

This paper presents a comprehensive study of the prospects for applying additive manufacturing technologies and materials-science approaches to the development of compact disposal devices for humanitarian demining, based on highly filled composite filaments. The aim of the study was to evaluate the materials-science justification for the approach and to identify the key factors that determine the balance between operational effectiveness, manufacturability, production mobility, and environmental acceptability. The analytical part included a review of current approaches to the design of complex nozzle geometries and criteria for selecting fillers according to techno-economic and environmental indicators, as well as the formulation of material selection criteria taking into account filler dispersion, matrix–filler adhesion, and effects on melt flow. The experimental part focused on comparing the material properties of printed samples depending on filament characteristics and dispersion quality of the filler, assessing the influence of material composition on mechanical and service properties, and evaluating suitability for localized manufacturing under resource-limited conditions. A qualitative techno-economic and stakeholder analysis, together with a SWOT assessment, highlights strengths (production localization, design flexibility, potentially low unit cost), weaknesses (material–matrix interaction, durability concerns), opportunities for scaling, and key risks related to operation, storage, and regulatory and ethical constraints. Environmental and ethical aspects of using biodegradable matrices and approaches to minimizing adverse environmental impact are discussed separately. The conclusions confirm the promise of combining additive processes with targeted materials engineering to create adaptive, mobile, and more accessible solutions for humanitarian demining, provided further technological optimization, comprehensive safety assessment, and regulatory compliance. The obtained results may be useful for planning research programs, technical evaluations, and policy-organizational decisions in this field.

**Keywords:** disposal shaped charge, humanitarian demining, controlled neutralization, 3D-printing technology, highly filled filament, filler dispersion, composite material properties.