https//doi.org/10.33136/stmaXXXX.XX.XXX
УДК 669.13/.14:669.715:621.74.045:629.7.02
ISSN 2617-5525 (Print)
ISSN 2617-5533 (Online)
Creative Commons Attribution 4.0

Д-р техн. наук В. С. Дорошенко, https://orcid.org/0000-0002-0070-5663,
В. А. Слюсарев

ТЕРМОМЕХАНІЧНА ФРАГМЕНТАЦІЯ КОРПУСНИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ЛИТТІ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Обґрунтовано й розроблено науково-технологічні засади керування характером деструкції легковагих корпусних конструкцій разового циклу застосування для технічних виробів, ракетної техніки та безекіпажних літальних апаратів. На основі аналізу умов експлуатації аерокосмічних об'єктів в умовах інтенсивних вібраційних і знакозмінних навантажень доведено ефективність інтеграції регулярних систем концентраторів напружень безпосередньо в процес точного лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні узагальненого геометричного критерію фрагментації, який встановлює аналітичний зв'язок між густиною ливарного сплаву, товщиною стінки оболонки та площею ділянки, обмеженої внутрішніми розподільними канавками, стосовно умов високоенергетичного руйнування за схемою газового клину. На відміну від фіксованих параметрів руйнування запропоновано математичну залежність, яка масштабується під широкий спектр інженерно-технічних завдань завдяки використанню ливарних матеріалів із різними фізико-механічними властивостями. Запропоновано застосування кремній-алюмінієвих сплавів (силумінів) низької густини для формування легких, але просторово об'ємних і жорстких фракцій масою 1–3 г, призначених для створення елементів безпечної спрямованої деструкції конструкцій аерокосмічних систем. Для класичного руйнування сталевих оболонок дотримувались параметрів одержання фрагментів масою 2–5 г із залізовуглецевих сплавів, а для систем підвищеної кінетичної міцності закладено алгоритм формування важкого сегмента масою 3–10 г. Інженерне рішення сприяє стабільному статичному та динамічному балансуванню літального апарата на траєкторії польоту за рахунок прецизійного симетричного виконання внутрішнього рифлення без застосування механічного оброблення виливків. Наведено результати експериментальної апробації способу під час виготовлення тонкостінних циліндричних оболонок із використанням склеєних полімерних моделей. Додатково розроблено енергоефективну безпіротехнічну безударну систему дистанційного розвантаження та відокремлення елементів на основі разових легкоплавких полімерних строп, які руйнуються методом термічної деструкції («електроніж») за низьковольтним електричним сигналом, що виключає виникнення шкідливих ударних хвиль (pyroshock) для бортової апаратури.

Ключові слова: корпусні конструкції ракет, контрольована фрагментація, концентратори напружень, ефект газового клину, лиття за моделями, що газифікуються, безекіпажні літальні апарати, силуміни, залізовуглецеві сплави, безударне розвантаження, ливарні сплави.

The authors substantiate the scientific and technological foundations for controlling the behavior of degradation in lightweight single-use shell structures intended for engineering applications, missile hardware, and unmanned aerial vehicles (UAVs). Based on the analysis of operational environments where aerospace objects experience intense vibration and alternating loads, the paper demonstrates the efficiency of integrating regular systems of stress concentrators directly into the precision metal casting process using expendable patterns. This process is known as Lost Foam Casting (LFC). The scientific novelty of the conducted research lies in the substantiation of a generalized geometric criterion for fragmentation, which establishes an analytical relationship between the density of the casting alloy, the shell's wall thickness, and the area of the section bounded by internal distribution grooves under high-energy structural failure conditions that the "gas wedge" mechanism generates. In contrast to the fixed parameters of structural failure, the authors propose a mathematical dependence that scales across a wide range of engineering tasks due to the use of casting materials with diverse physical and mechanical properties. The authors propose low-density silicon-aluminum alloys (silumins) for lightweight, yet spatially bulky and rigid fragments weighing 1 to 3 grams, intended to provide elements for the safe directional destruction of aerospace systems' structures. For the conventional structural failure of steel shells, the parameters for obtaining fragments of 2 to 5 grams from iron-carbon alloys were maintained, while for systems with increased kinetic strength, an algorithm was established to form heavy segments weighing 3 to 10 grams. This engineering solution supports the stable static and dynamic balancing

of a flying vehicle along its trajectory due to the precise symmetry of internal rifling without the machining of castings. The paper presents the results of validating this method experimentally during the manufacturing of thin-walled cylindrical shells using glued polymer models. Additionally, the authors have developed an energy-efficient, non-pyrotechnic, shockless system for the remote release and separation of elements using expendable low-melting polymer straps. These straps are destroyed via thermal degradation triggered by a low-voltage electrical signal ("electric knife"), eliminating the occurrence of pyroshock waves that are harmful to onboard electronics.

Keywords: missile shell structures, controlled fragmentation, stress concentrators, gas wedge effect, lost foam casting, unmanned aerial vehicles, silumins, iron-carbon alloys, shockless release, casting alloys.

Вступ

Проєктування сучасних ракетних комплексів і безекіпажних літальних апаратів (БЕЛА) вимагає суворого дотримання критеріїв масової ефективності (weight efficiency) та конструкційної надійності матеріалів. У сучасному аерокосмічному матеріалознавстві особливе місце посідає проблема створення тонкостінних оболонкових корпусних конструкцій технічного призначення разового циклу застосування, для яких критично важливою функціональною властивістю є забезпечення прогнозованої (детермінованої) фрагментації за інтенсивного імпульсного чи високоенергетичного термомеханічного впливу. Традиційний підхід до конструювання таких виробів тривалий час базувався суто на забезпеченні максимальних міцнісних характеристик металу, які б гарантували цілісність конструкції під час транспортування, старту й автономного польоту. Проте на сучасному етапі розвитку ракетних і безекіпажних пристроїв інженерне завдання суттєво ускладнилося: окрім несучої здатності під час експлуатації, виріб у момент цільового спрацювання повинен руйнуватися за строго заданою геометричною схемою на уламки з оптимальними кінетичними, об'ємними та масовими параметрами, мінімізуючи розпорошення металу на дрібні безпечні (некорисні) фракції.

Сучасний кінетичний і механічний вплив на конструкції в процесі експлуатації висуває принципово нові вимоги до матеріалознавчого супроводу виробництва. Зокрема, завдання створення легких елементів одноразового технічного призначення потребує створення специфічних легких корпусних конструкцій. У цьому контексті використання традиційних важких сталей або чавунів не завжди є раціональним, оскільки для захисних руйнованих екранів або елементів екстреного розвантаження апаратів критичним параметром є не стільки надлишкова пробивна маса уламка, скільки його просторовий об'єм, жорсткість і кількість утворених фракцій зі збереженням мінімальної загальної ваги літального апарата. Перспективним вирішенням цієї проблеми є використання у виробництві корпусів легких кремній-алюмінієвих литих сплавів (силумінів). Завдяки високому вмісту кремнію силуміни поєднують низьку густину із конструкційною крихкістю (подібно до сірих чавунів), що забезпечує їхню миттєву спрямовану деструкцію на задані фрагменти масою 1–3 г. При однаковій вазі із залізовуглецевими сплавами силумінoвий уламок матиме в рази більший фізичний об'єм, що підвищує ефективність заповнення простору під час контрольованого руйнування. Водночас для ураження живої сили на відкритій місцевості класичним стандартом залишається формування фракцій масою 2–5 г [1], а для важчих вузлів, де визначальною є висока кінетична енергія, потрібне формування важчого сегмента масою 3–10 г з метою інтенсивного впливу на металеві елементи рухомої техніки та її моторних відсіків. Таким чином, виникає науково-технічна потреба розроблення універсальної математично обґрунтованої ливарної технології, здатної масштабувати параметри деструкції під цілу лінійку інженерних завдань.

Особливістю функціонування корпусних елементів ракетних систем є те, що вони зазнають екстремальних знакозмінних навантажень, високочастотних вібрацій від роботи реактивних двигунів, а також значних термічних напружень під час проходження густих шарів атмосфери. Застосування класичних методів нанесення регулярних сіток концентраторів напружень

(поздовжніх і поперечних канавок) шляхом механічного оброблення внутрішніх порожнин малогабаритних тонкостінних корпусів є технологічно складним, економічно неефективним, а в багатьох випадках – фізично неможливим завданням для серійного виробництва. Використання ж різноманітних збірних конструкцій, що складаються з окремих вставок або попередньо сформованих уражальних елементів, які укладають в ливарну форму або механічно фіксують у корпусі [2], може призвести до суттєвого збільшення маси виробу, появи додаткових зварних чи нарізних з'єднань, що послаблюють загальну жорсткість оболонки та порушують статичне і динамічне балансування ракети відносно її поздовжньої осі. Найменший ексцентриситет маси аерокосмічного об'єкта, що обертається на траєкторії, призводить до критичного відхилення від заданого курсу. Саме тому актуальним є створення способів отримання монолітних корпусних конструкцій із заздалегідь інтегрованою внутрішньою системою регулярного дроблення на основі різних ливарних сплавів, які не потребують подальшого механічного оброблення.

Процес деструкції як високошвидкісного руйнування оболонкових корпусних конструкцій має детермінований характер і відбувається спрямовано по перерізах стінок, які штучно локально ослаблені системою розподільних канавок, що виконують роль конструкційних концентраторів напружень. Регулярне дроблення корпусів літальних апаратів і ракетних систем на уламки заданої маси та геометричної форми може гарантовано досягатись шляхом формування на внутрішніх поверхнях стінок глибоких проточок, які локально знижують опір матеріалу зсувним і розтягувальним деформаціям. При цьому, як показує практика проєктування та випробувань, руйнація корпусів, що мають лише зовнішнє рифлення або канавки, часто є незадовільною: під час імпульсного навантаження понад 60 % металу оболонки розпорошується на дрібні непродуктивні фрагменти (пил та мікрочастинки), що критично знижує загальну функціональну ефективність системи [3–5].

Оскільки виготовлення оболонкових корпусних елементів із канавками саме на внутрішній поверхні є традиційно технологічно складним інженерним завданням, а вироби із зовнішніми канавками малоефективні, у масовому виробництві оболонкових корпусів, у тому числі й для аерокосмічної техніки, тривалий час домінують оболонки без канавок так званого природного дроблення [3, 6, 7]. Основними їх перевагами є простота отримання формувальної оснастки та відносно низька вартість, а ключовим недоліком – хаотичне, нерегулярне руйнування. Дослідження підтверджують, що значна частина класичного чавунного або сталевого оболонкового корпусу внаслідок імпульсного високоенергетичного руйнування розпорошується на дрібні безпечні уламки, і лише близько 37,8 % фрагментів від загальної маси конструкції потрапляють у діапазон ефективного руйнівного впливу на тестові об'єкти [5].

Теоретичні принципи фрагментації металевих циліндричних оболонок детально розглянуто в класичній літературі через призму статистичного розподілу Мотта [8, 9], де ефективність процесу руйнування прямо пов'язують з радіусом оболонки, міцнісними характеристиками сплаву та кінетичною енергією розльоту частинок. Проте наявні фундаментальні джерела не надають конкретних чисельних значень оптимальних мас і об'ємів, які виробнику слід закласти на етапі проєктування оснастки для стабільної фрагментації корпусів різної товщини, у тому числі з урахуванням сучасних завдань безекіпажної авіації. Більшість наявних інформаційних рішень у вітчизняній технічній і патентній літературі щодо способів виливання оболонкових металовиробів не вирішує проблеми контрольованої фрагментації стінок монолітного литого корпусу під конкретне тактичне завдання, а спрямована переважно на загальне зміцнення конструкцій методами термічного або термомеханічного оброблення [10, 11]. Таким чином, стосовно тонкостінного лиття, у тому числі в аерокосмічній галузі, досі відсутнє універсальне технологічне рішення, яке б дозволяло в єдиному технологічному циклі лиття монолітного корпусу гарантовано забезпечити формування елементів заданої лінійки мас і об'ємів для повітряного чи наземного застосування.

Метою роботи є науково-технічне та матеріалознавче обґрунтування універсального способу лиття оболонкових корпусів із використанням ЛГМ-процесу, що дозволяє масштабувати параметри деструкції та керованого дроблення монолітного корпусу на фрагменти заданої величини (від легких силумінових елементів для протидронних перехоплювачів до важких наземних фракцій) залежно від густини сплаву, об'єму ділянки стінки та конкретного інженерного завдання.

Методологія обґрунтування геометричного критерію та матеріалознавчий вибір

Суть запропонованого інженерного підходу полягає в інтеграції принципу детермінованої фрагментації безпосередньо в процес комп'ютерного моделювання та виготовлення разової полімерної моделі. Виготовлення таких моделей включає формування поперечних і поздовжніх канавок на внутрішній поверхні порожнини, які точно відтворюються в металі під час заливання розплаву в ливарну форму з такою моделлю, створюючи регулярну зону майбутнього спрямованого руйнування виливка.

Ключовим технологічним критерієм, покладеним в основу проєктування лінійки корпусів, є геометрична умова утворення ділянки стінки, обмеженої канавками. Ця умова аналітично пов'язує локальний об'єм матеріалу ділянки $V_{діл}$ із товщиною стінки h та площею поверхні S, яка відокремлюється суміжними концентраторами напружень: $V_{діл} = S \times h$, де S – площа кожної ізольованої рифленням ділянки; h – товщина стінки оболонкового корпусу.

Для забезпечення детермінованого розпаду оболонки під впливом високоенергетичного внутрішнього тиску за схемою газового клину локальний об'єм матеріалу ділянкових елементів ($V_{діл}$, см^3) має задовольняти узагальнену математичну залежність, яка враховує числове значення густини обраного ливарного сплаву (ρ, г/см^3), та межі маси фрагмента (A та B), диференційовані під конкретне тактичне завдання: $A / \rho \le V_{діл} \le B / \rho$. Масу утвореного фрагмента в загальному вигляді визначають як $m = \rho \times V_{діл}$, що дозволяє розрахувати кроки нанесення концентраторів напружень для трьох основних експлуатаційних підпунктів.

1. **Для повітряного протидронного бою (перехоплення БЕЛА ворога)** межі маси уламка встановлюються в діапазоні $1 \text{ г} \le m \le 3$ г ($A = 1$; $B = 3$). Для цього завдання можливе застосування достатньо ламких кремній-алюмінієвих сплавів – силумінів, середня густина яких становить $\rho \approx 2{,}65\ldots2{,}70$ г/см^3. Завдяки низькій густині за заданої маси об'єм силумінового фрагмента $V_{діл}$ є значно більшим, ніж у сталі чи чавуну. Такі легкі, але просторово об'ємні та жорсткі фрагменти придатні для механічного руйнування пластикових гвинтів, пошкодження крихкої оптики або залітання в повітрозабірники та реактивні сопла двигунів, де вони миттєво викликають помпаж і деструкцію рухомих елементів турбіни.

2. **Для класичного руйнування систем** межі маси становлять $2 \text{ г} \le m \le 5$ г ($A = 2$; $B = 5$) [1]. Розрахунок виконано для традиційних залізовуглецевих сплавів (сірого чавуну з густиною $\rho \approx 7{,}0$ г/см^3 або вуглецевої сталі з $\rho \approx 7{,}8$ г/см^3) [3, 12]. Фрагменти менше 2 г у цьому випадку неефективні через швидку втрату кінетичної енергії, а збільшення маси понад 5 г недоцільне через зменшення загальної щільності уламкового поля.

3. **Для інтенсивного впливу на металеві елементи рухомої наземної та повітряної техніки** межі маси закладаються у важчому сегменті $3 \text{ г} \le m \le 10$ г ($A = 3$; $B = 10$) для залізовуглецевих сплавів зазначеної густини. Це забезпечує уламкам високу пробивну здатність і надлишкову кінетичну енергію, необхідну для пробиття металевих капотів, пошкодження радіаторів, паливних баків та елементів шасі транспортних засобів.

Використання ЛГМ-процесу як методу точного лиття дозволяє перенести спроєктовану геометрію канавок із полімерної моделі у виливок без застосування механічного оброблення внутрішньої порожнини. Для корпусів з осьовою симетрією доцільне виконання розподільних канавок одночасно в обох напрямках – уздовж і впоперек осі виробу. Таке технічне рішення не лише гарантує статичне та динамічне балансування маси корпусу на траєкторії, що є критичним для стабілізації БЕЛА і ракет, але й суттєво спрощує конструкцію металевої

прес-форми для серійного спінювання (спікання) в ній моделей.

Технологія ЛГМ-процесу для тонкостінних оболонкових елементів з внутрішніми концентраторами напружень базується на тому, що геометрію майбутніх розподільних канавок закладають ще на етапі проєктування та виготовлення разової моделі з пінополістиролу (ППС, пінопласту). Модель корпусу, яка містить внутрішню сітку поздовжніх і поперечних канавок, виготовляють шляхом спінювання гранул полістиролу в металевій прес-формі. Оскільки видалення суцільного металевого стрижня з рельєфом із цільної корпусної моделі є геометрично неможливим, модель оболонки виготовляють з двох окремих практично симетричних поздовжніх половин, які згодом з'єднують за допомогою клею.

Склеєні моделі з ППС монтують у блоки (кущі) по 4–6 штук на моделі центрального стояка, що виконує функцію головного каналу ливникової системи. Модельний блок фарбують вогнетривкою суспензією, яка після висихання утворює на поверхні тонке (0,5–0,8 мм) газопроникне протипригарне покриття. Далі модельні блоки поміщають у ливарні контейнери-опоки, де їх засипають сухим кварцовим піском, який на вібростолі ущільнюють протягом 2–3 хв з частотою вібрації 40–50 Гц і амплітудою 0,3–0,5 мм. Під час заливання розплавленого металу в піщану контейнерну форму (чи буде те залізовуглецевий сплав за температури 1380–1440 °С, чи силумін за 710–740 °С) рідкий метал миттєво газифікує та замінює ППС. Продукти деструкції полімеру під дією високої температури переходять у газоподібну фазу і виводяться через протипригарне покриття в сухий пісок, який протягом заливання і тверднення металу у формі вакуумують із залишковим тиском 40–50 кПа. Лита внутрішня сітка концентраторів напружень формується з точністю до десятої частки міліметра, що повністю виключає зміщення геометрії або появу дисбалансу маси відносно поздовжньої осі виробу – критичного фактора для балістичної стабільності літальних пристроїв. Механіка подальшого функціонування розробленої конструкції спирається на фізичні закономірності розвитку газового клину. Під час екстремального зростання внутрішнього термомеханічного або імпульсного тиску газове середовище миттєво створює вектор сили, спрямований перпендикулярно до внутрішньої поверхні оболонки. Кутові вершини внутрішніх канавок починають виконувати роль геометричних ініціаторів локальних тріщин. Поєднання інтенсивного газового тиску й термічних напружень викликає розклинювальний і зсувно-розтягувальний ефект, унаслідок якого монолітний корпус руйнується строго по лініях концентраторів, формуючи детерміноване поле фрагментів із наперед розрахованими масо-об'ємними параметрами.

Для забезпечення комплексного підходу до проєктування та експлуатації легковагих конструкцій логічним етапом роботи стало створення рішень для їхнього оперативного доставлення та дистанційного скидання з використанням автономних транспортних комплексів різного типу базування: повітряного, наземного або водного. З цією метою було розроблено та запатентовано безпіротехнічний пристрій для безударного розділення елементів апарата [13, 14]. Таке рішення орієнтоване на планове або аварійне відокремлення функціональних модулів, транспортувальних контейнерів, малогабаритних супутніх пристроїв, а також для контрольованого відкриття корпусних панелей. Застосування стандартних піротехнічних вузлів (піропатронів або піроболтів) супроводжується різким виділенням кінетичної енергії та генерацією шкідливих акустичних хвиль (ефект pyroshock), що нерідко призводить до відмови або збоїв у роботі бортової мікроелектроніки, оптичних модулів чи систем навігації. Запропонована альтернатива базується на принципі локального теплового розплавлення полімерів (технологія «електроніж»). Надійне позиціонування корисного навантаження або знімних вузлів усередині транспортного засобу під час руху забезпечується разовими легкоплавкими стропами, які мають значну статичну тримальну здатність, але миттєво втрачають цілісність з досягненням температури плавлення полімеру. Структура вузла руйнування містить низьковольтний тепловий елемент із ніхромового провідника марки Х20Н80 діаметром 0,2–0,3 мм, інтегрований безпосередньо в зону контакту з поверхнею гнучкої стропи.

Під час стендових випробувань як джерело енергії застосовували автономний низьковольтний акумуляторний елемент із робочою напругою 3,6–4,2 В. Подача електричного сигналу на ніхромову ділянку викликає її практично миттєве розігрівання до діапазону температур 450–500 °С, що ініціює швидку локальну деструкцію полімеру під дією постійного механічного натягу від маси закріпленого вантажу (у тестах фіксували стабільне утримання та подальше скидання маси вагою 15–20 кг). Повний цикл термодеструкції та безперешкодне вивільнення відокремлюваного вузла триває 0,8–1,2 с. Оскільки процес має суто тепловий характер і позбавлений будь-яких динамічних ударних хвиль, імпульсний вплив на корпус літального пристрою повністю відсутній. Система є багаторазово переставною, енергетично незалежною та безпечною для використання у мобільних комплексах будь-якого середовища функціонування.

Практичну перевірку запропонованого методу точного лиття [13] здійснювали під час виготовлення експериментальних циліндричних зразків оболонок із сірого чавуну. Полімерні моделі з ППС склеювали з двох дзеркальних частин, отриманих у прес-формах, контур яких мав розраховане регулярне рифлення під формування фрагментів із цільовою масою 2–5 г. Отримані металеві виливки продемонстрували повну відповідність геометричним параметрам внутрішніх канавок, що доводить можливість безпосереднього перенесення мікрорельєфу на метал без потреби в подальшому механічному або слюсарному обробленні. Лабораторні випробування виливків на спрямоване руйнування шляхом контрольованого механічного динамічного впливу підтвердили детермінований характер деструкції: поділ оболонки відбувався виключно по заданих лініях концентраторів із виходом фрагментів у межах розрахованого масового діапазону.

Для виробів з осьовою симетрією найбільш раціональним є нанесення рельєфної сітки одночасно в поздовжньому та поперечному напрямках відносно головної осі. Це сприяє збереженню динамічного балансу виробу та значно спрощує геометрію оснастки для масового виробництва. Технологічна гнучкість методу дозволяє застосовувати як широковідомі залізовуглецеві сплави, так і спеціальні легкі кольорові системи, забезпечуючи високий коефіцієнт корисного виходу фрагментів під впливом екстремальних енергетичних навантажень.

Висновки

1. Розроблено й теоретично обґрунтовано комплексний підхід до створення тонкостінних елементів із керованою деструкцією за рахунок суміщення ЛГМ-процесу й оригінальної безпіротехнічної системи розвантаження.

2. Впровадження узагальненого геометричного критерію, що пов’язує фізичні константи ливарного сплаву (зокрема, його густину) з геометричними параметрами сітки канавок, дозволяє стабільно програмувати масу утворених елементів, використовуючи ефект газового клину.

3. Експериментально доведено, що перенесення контуру концентраторів на етап виготовлення разової пінополістирольної моделі виключає складні операції механічного оброблення та використання ливарних стрижнів (як для типового піщаного формування), що робить технологію високорентабельною та придатною для широкого промислового впровадження.

4. Інтеграція розроблених корпусів із безпіротехнічним обладнанням «електроніж» забезпечує плавне, безударне відокремлення функціональних модулів за рахунок локального теплового перепалювання строп, створюючи вагомі техніко-економічні переваги перед важкими механічними аналогами.

Список використаної літератури

1. Зіновєєв І. В. Моделювання локальних воєнних протистоянь двох сторін на основі теорії клітинних автоматів. *Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки*. 2015. № 3. С. 78–87.

2. Шинський О. Й., Остапенко О. Г., Чередниченко С. П., Калюжний П. Б., Шинський В. О. Спосіб виготовлення литого корпусу боєприпасів : пат. 133074 Україна : МПК B22D 25/00. №u201810411; заявл. 22.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 6.

3. Balanskij I. A., Merzhiievskij L. A. Dejstviie sredstv porazheniia i boiepripasov. 2012. 408 s.

4. Leonidov F. Podgotovit granaty. *Oruzhyie*. 1999. № 8. C. 60–65.

5. Pashchenko V. I., Sidorenko Yu. M. O vozmozhnosti ispolzovaniia kinematicheskikh parametrov oskolochnogo polia ruchnoj granaty F-1 dlia provedeniia sudebnoj vzryvotekhnicheskoj ekspertizy. *Kryminalistychnyj visnyk*. 2013. № 1(19). S. 155–169.

6. Boiepripasy: uchebnik: v 2 t. / pod obshch. red. V. V. Selivanova. 2016. T. 1. 506 s.

7. Boiepripasy: uchebnik: v 2 t. / pod obshch. red. V. V. Selivanova. 2016. T. 2. 551 s.

8. Mott N. F. Fragmentation of shell cases. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*. 1947. Vol. 189, Iss. 1018. P. 300–308. https://doi.org/10.1098/rspa.1947.0042

9. McNeill S. K. Determining Fragment and Debris Hazards. *Photonsquared Engineering*. 2018. URL: https://photonsquared.com/engineering/fragment-and-debris-hazards/

10. Дорошенко В. С., Шинський В. О. Спосіб лиття корпусів боєприпасів з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску : пат. 139559 Україна : МПК B22D 7/00, B22D 23/00. № u201906835; заявл. 18.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.

11. Дорошенко В. С., Шинський В. О. Спосіб виготовлення виливків з бейнітного або аусферитного чавуну з кулястим графітом : пат. 123731 Україна : МПК B22D 7/00, B22D 23/00, C21D 5/02, C21D 1/20, B22D 27/04. № u201708132; заявл. 04.08.2017; опуб. 12.03.2018, Бюл. № 5.

12. Grey Iron in ISO 185. *Sand Casting, Investment Casting & CNC Machining in China*. URL: https://castingquality.com/casting-technology/casting-material/grey-cast-iron/grey-iron-in-iso-185.html (date of access: 07.08.2026).

13. Дорошенко В. С. Лиття оболонкових корпусів з контрольованою геометрією фрагментації. *Металознавство та обробка металів*. 2026. Т. 32, № 1(117). С. 46–54. https://doi.org/10.15407/mom2026.01.046.

14. Дорошенко В. С., Янченко О. Б. Спосіб доставки вантажу до заданого місця : пат. 160595 U Україна ; опубл. 2025, Бюл. № 38.

Стаття надійшла 25.06.2026

Дата прийняття статті до друку
після рецензування 22.07.2026

Дата публікації 02.11.2026