УДК 669.18:621.74.045:620.17

В. А. Слюсарев, О. Б. Янченко, В. С. Дорошенко

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МОДЕЛІ ДЛЯ КОНТРОЛЬОВАНОЇ ФРАГМЕНТАЦІЇ ЛИТОГО ТОНКОСТІННОГО КОРПУСУ

Анотація. *Розроблено науково-технологічні засади керування характером деструкції литих корпусних конструкцій разового застосування з інтеграцією концентраторів напружень у процес точного лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ-процес). Новизна роботи полягає в обґрунтуванні узагальненого геометричного критерію фрагментації, який встановлює аналітичний зв'язок між густиною ливарного сплаву, товщиною стінки корпусу та площею ділянки, обмеженої внутрішніми розподільними канавками, стосовно умов руйнування за схемою «газового клину».*

Ключові слова: *корпусні виливки, контрольована фрагментація, концентратори напружень, ефект «газового клину», лиття за моделями, що газифікуються.*

Abstract*. Scientific and technological principles have been developed for controlling the destruction behavior of single-use cast housing structures by integrating stress concentrators into the expendable pattern casting process (EPC / Lost Foam process). The novelty of the work lies in the substantiation of a generalized geometric fragmentation criterion, which establishes an analytical relationship between the density of the foundry alloy, the wall thickness of the housing, and the area bounded by internal distribution grooves with respect to destruction conditions under the "gas wedge" scheme.*

Keywords*: cast housings, controlled fragmentation, stress concentrators, "gas wedge" effect, expendable pattern casting, Lost Foam casting.*

У сучасному матеріалознавстві та інженерії металевих конструкцій існує потреба розробки нових технологічних підходів для створення оболонкових корпусів спеціального призначення, яким властива прогнозована фрагментація при інтенсивному високоенергетичному впливі. Актуальність виробництва переважно тонкостінних (оболонкових) металевих корпусів із заданою схемою руйнування зумовлена необхідністю забезпечення високої функціональної ефективності конструкцій в умовах швидкоплинного термомеханічного навантаження та імпульсного руйнування. Сучасні безпекові виклики актуалізували інженерне завдання, що полягає не лише у досягненні високої міцності матеріалу, але й у забезпеченні його контрольованої фрагментації на уламки з оптимальними кінетичними та геометричними параметрами.

Метою роботи є науково-технічне обґрунтування універсального способу лиття оболонкових корпусів із використанням методу лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ), що дозволяє масштабувати параметри деструкції та керованого дроблення литого 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.

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

Ключовим технологічним критерієм, покладеним в основу проектування 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 узагальненій математичній залежності, яка враховує числове значення

густини обраного ливарного сплаву (ρ, г/см³), та межі маси фрагмента (A та B), диференційовані під конкретну тактичну задачу: $A / \rho \le V_{діл} \le B / \rho$. Маса утвореного фрагмента (осколка) в загальному вигляді визначається як $m = \rho \times V_{діл}$, що дозволяє розрахувати кроки нанесення концентраторів напружень для трьох основних експлуатаційних підпунктів.

1. Для повітряного протидронного бою (перехоплення БПЛА ворога):

межі маси уламка встановлюються в діапазоні $1 \le m \le 3$ г, (A=1; B=3). Для цієї задачі можливо застосування достатньо ламких кремній-алюмінієвих сплавів — силумінів, середня густина яких становить $\rho \approx 2{,}65…2{,}70$ г/см³. 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 гвинтів, пошкодження крихкої оптики або залітання у повітрозабірники та реактивні сопла двигунів, де вони викликають деструкцію рухомих елементів турбіни.

2. Для класичного руйнування систем:

межі маси фрагменту становлять $2 \le m \le 5$ г, (A=2; B=5) [1, 2]. Розрахунок ведеться для традиційних залізовуглецевих сплавів (сірого чавуну з густиною $\rho \approx 7{,}0$ г/см³ або вуглецевої сталі з $\rho \approx 7{,}8$ г/см³ [3, 11]. Фрагменти менше 2 г у даному випадку неефективні для ураження живої сили 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 $3 \le m \le 10$ г (A=3; B=10) для залізовуглецевих сплавів вказаної густини. Це забезпечує уламкам високу пробивну здатність та 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 спроектовану геометрію канавок із полімерної моделі у виливок без застосування механічної обробки внутрішньої порожнини. Для корпусів з осьовою симетрією доцільне виконання розподільних канавок одночасно в обох напрямках — уздовж та поперек осі виробу. Таке технічне рішення не лише гарантує статичне та динамічне балансування маси корпусу на траєкторії польоту, але й суттєво спрощує конструкцію металевої прес-форми для серійного спікання в ній з гранул пінополістиролу ливарних моделей.

Практична перевірка запропонованого методу точного лиття [1] здійснювалася при виготовленні 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 у подальшій механічній або слюсарній обробці. 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 у 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 та теоретично обґрунтовано комплексний підхід до створення тонкостінних елементів із керованою деструкцією за рахунок суміщення ЛГМ-процесу та 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 механічної обробки та використання ливарних стрижнів (як для типового піщаного формування), що робить технологію високорентабельною та придатною для широкого промислового впровадження.

Список використаних джерел:

1. Киселев М. А., Манько Н. И., Зиновеев И. В. Моделирование локальных военных противостояний двух сторон на основе теории клеточных автоматов. Вісник Запорізького національного університету. Серія : Фізико-математичні науки. 2015. № 3. С. 78 – 88.

2. Дорошенко В. С. Лиття оболонкових корпусів з контрольованою геометрією фрагментації. Металознавство та обробка металів. 2026. № 1. С. 46 – 54. https://doi.org/10.15407/mom2026.01.046

Слюсарев Вадим Анатолійович – *молодший науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, вул. Акад. Вернадського, буд. 34/1, інд. 03142 e-mail: a0509162132@gmail.com, ORCID https://orcid.org/ 0000-0002-2912-3149*

Дорошенко Володимир Степанович *– доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, м. Київ, вул. Акад. Вернадського, буд. 34/1, інд. 03142, e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-0070-5663*

Янченко Олександр Борисович *– кандидат технічних наук, доцент кафедри військової підготовки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 21021, e-mail: 1961yab@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-3888-3772*

Vadym Anatoliiovych Sliusarev *– Junior Researcher, Department of Physical Chemistry of Casting Processes, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, 34/1 Acad. Vernadsky Ave., Kyiv, 03142, e-mail: a0509162132@gmail.com, ORCID https:// ORCID.org/ 0000-0002-2912-3149*

Volodymyr Stepanovych Doroshenko *– Doctor of Sciences (Engineering), Lead Researcher, Department of Physical Chemistry of Casting Processes, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, 34/1 Acad. Vernadsky Ave., Kyiv, 03142, e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID https:// ORCID.org/0000-0002-0070-5663*

Oleksandr Borysovych Yanchenko *– PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University (95Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine, e-mail: 1961yab@gmail.com,*

ORCID https://orcid.org/0000-0002-3888