УДК 621.74.045:623.445:669.018

І. А. Небожак, В. С. Дорошенко, О. Б. Янченко

АРМУВАННЯ ЛИТОЇ БРОНЕПЕРЕШКОДИ МЕТОДОМ ЛИТТЯ ЗА МОДЕЛЯМИ, ЩО ГАЗИФІКУЮТЬСЯ

Анотація. *Розглянуто інноваційний спосіб виготовлення армованої бронеперешкоди методом лиття за моделями, що газифікуються (ЛГМ), із застосуванням у внутрішніх порожнинах разової полімерної моделі пружних елементів (пружин), зафіксованих у стиснутому стані легкоплавкими елементами. Показово, що руйнування фіксаторів в інтервалі температур кристалізації викликає розтискання пружин, створення активного поля попереднього напруження стиску та здрібнення зерна матриці. Застосування залізовуглецевого сплаву з наступним ізотермічним гартуванням забезпечує формування структури із збереженням 25…35% залишкового аустеніту, приданого до TRIP-ефекту (деформаційного мартенситного перетворення) безпосередньо у вершині тріщини при динамічному ударі.*

Ключові слова: *лиття за моделями, що газифікуються, армований виливок, бронеперешкода, попереднє напруження, TRIP-ефект, динамічна дисипація енергії.*

Abstract. *An innovative method for producing a reinforced armor barrier by lost foam casting (LFC) using elastic elements (springs) fixed in a compressed state by low-melting elements inside the cavities of a sacrificial polymer pattern is considered. It is shown that the destruction of the retainers in the crystallization temperature range causes the springs to uncoil, creating an active pre-compression stress field and refining the matrix grain structure. The use of an iron-carbon alloy followed by isothermal quenching provides the formation of a structure with 25…35% retained austenite suitable for the TRIP effect (transformation-induced plasticity) directly at the crack tip under dynamic impact loading.*

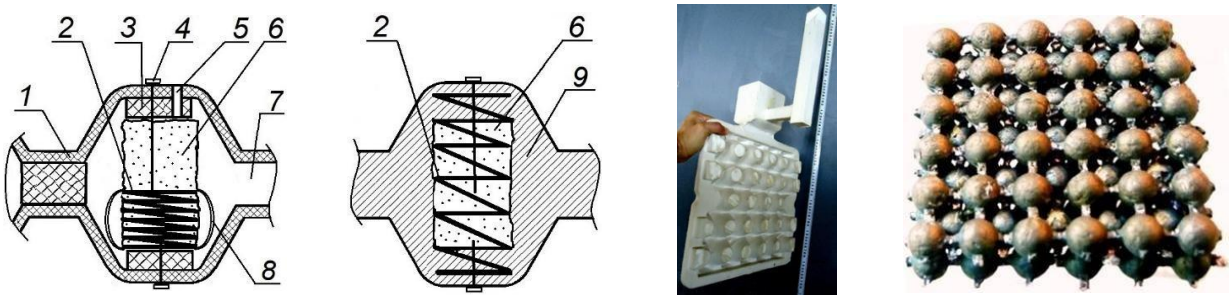
Keywords*: lost foam casting, reinforced casting, armor barrier, prestress, TRIP effect, energy dissipation.*

Сучасна концепція розвитку засобів захисту бронетехніки і захисних споруд прагне переходу до інтелектуальних метаматеріалів, здатних протидіяти динамічним навантаженням. Для цього застосовували метод лиття металу за моделями, що газифікуються (ЛГМ), де при виготовленні захисних елементів - бронеперешкод армований метало-керамічний композит реалізує принцип динамічної дисипації енергії. Особливість виготовлення разової ливарної моделі для ЛГМ-процесу полягала в отриманні її з пінополістиролу (ППС) у вигляді оболонок - двосторонніх рельєфних панелей (типу блістерів для пакування яєць чи цукерок), у порожнини яких розміщують армувальні елементи та вогнетривкі наповнювачі.

Такі оболонки можуть бути виготовлені методами спікання у прес-формах, термоформування термопластичного полімерного листа товщиною 0,2…2,0 мм, або 3D-друку. Особливість останнього дозволяє виготовляти на лише плоскі, а й фігурні секційні сегменти (модулі) армованих виливків залежно від конфігурації предмета, для захисту якого вони призначаються.

У цій системі вогнетривкі стрижні разом із вставками з ППС виконують між оболонками роль розпірок, що формують «різнокутне» розташування стінок металевої матриці відносно напрямку дії силового вектора руйнування, що нерідко застосовують для конструкцій бронеперешкод. Підвищення механічних властивостей переважно для бронеперешкод досягали створенням в структурі активного поля попереднього напруження та реалізації ефекту трансформаційно-фазового зміцнення (рис. 1).

Спосіб включає виготовлення разової полімерної моделі з оболонок 1, розміщення в її порожнинах металевих пружних елементів (пружин) 2, зафіксованих у стиснутому стані легкоплавкими фіксаторами 8, та заповнення внутрішніх порожнин пружин валиками 6 із муліто-кремнеземного волокна [1]. Елементи моделі скріплюють гвіздками 4 через розпірки 3. Для відведення газів у вакуумований пісок ливарної форми, типової для ЛГМ, виконують вентканали 5.



а б в г

Рис. 1. Схема встановлення арматури в модель (а), частина виливка навколо однієї пружини (б), модельний комплект (в) та армований виливок (г): 1 – полімерна оболонка; 2 – пружний елемент (пружина); 3 – розпірки з пінополістиролу; 4 – фіксуючий гвіздок; 5 – вентканал; 6 – валик із муліто-кремнеземного волокна; 7 – вільний простір; 8 – легкоплавкий фіксатор; 9 – метал виливка

Між оболонками 1 утворюється газопроникний простір 7. На рис. 2, б показано ділянку виливка з литого металу 9 і з розтиснутою пружиною 2 та валиком 6, який в моделі був вставлений в середину гвинтової пружини. Фіксація пружин 2 здійснюється фіксаторами 8, матеріал яких руйнується в інтервалі температур між ліквідусом і солідусом матричного металу 9. При заливанні вакуумованої форми розплавом формується поверхнева його кірка. Руйнування фіксаторів викликає розпрямлення пружин до упору в напівтверду кірку, що перетворює виливок на напружену конструкцію ще до завершення кристалізації, а пружина діє як холодильник, подрібнює зерно та створює зони попереднього стиску.

Як матрицю використовують залізовуглецевий сплав. Охолодження виливка у формі виконують до 1000…900 °С з подальшим його видаленням із форми та ізотермічним гартуванням (austempering) при збереженні 25…35% залишкового аустеніту, придатного до TRIP-ефекту (Transformation Induced Plasticity) [2, 3]. Внутрішні мікродеформації від розтискання пружин сприяють частковому перетворенню аустеніту в мартенсит («самозагартування»). При ударному руйнуванні чи виникненні тріщини пружний елемент дотискає матрицю, провокуючи утворення мартенситу деформації (фазовий перехід до високоміцної мікроголчастої структури якого «зшиває» зону деформації) безпосередньо у вершині тріщини, сам зовнішній удар, від якого захищаються, ініціює ще більше деформаційне поле в металі з фазовим аустенітно-мартенситним перетворенням, що фізично забезпечує ефективне поглинання та дисипацію динамічної енергії удару за рахунок локального зростання властивої TRIP-ефекту протидії механічним напруженням і збільшення пластичності металу.

Застосування такого комплексного способу армо-лиття разом з гартуванням сегментів, зокрема для протимінного захисту днища бронетехніки, створює дворівневу систему: макроскопічну пружність пружин і мікроскопічну міцність мартенситу деформації. Валики 6 із муліто-кремнеземного волокна додатково знижують масу та підвищують демпфувальні властивості.

Висновок. Розроблений підхід до армування виливків у процесі ЛГМ забезпечує комплексний вплив на якість бронеструктури. Використання моделі як монтажної основи-носія арматури поліпшує стабільність геометрії інтегрованого каркаса, використання сухого піску вакуумованої форми при ЛГМ – для видалення гарячого виливка і гартування його безпосередньо з литого стану до рівня набуття здатності до деформаційного зміцнення, а армувальні елементи працюють як внутрішні холодильники та акумулятори пружної енергії, підвищуючи питому міцність і живучість захисних елементів, зокрема для техніки та споруд Сил оборони України у нинішній час екстремального зростання безпекових викликів.

Список використаних джерел:

1. Мазур В. В. Розвиток технології виробництва теплоізоляційних матеріалів для використання в металургії та машинобудуванні. Метал та лиття України. 2023. Т. 31, № 4. С. 59 –
63. DOI: https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.063.

2. Патент 139560 Україна, МПК B22D 7/00, B22D 23/00, F41H 5/00. Спосіб виробництва броньової перешкоди з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску / Дорошенко В. С., Шинський В. О.; заявник ФТІМС НАНУ. заявник ФТІМС НАНУ. № u2019 06841; заявл. 18.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.

3. Дорошенко В. С., Небожак І. А. Армування виливків при литті за моделями, що газифікуються. Металознавство та обробка металів. 2026. №2. С. 48 – 60. DOI: https://doi.org/10.15407/mom2026.02.048

Небожак Іван Анатолійович *– кандидат технічних наук, 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: nebozhak@ukr.net, ORCID* https://orcid.org/0000-0002-0291-8144

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*

Ivan Anatoliyovych Nebozhak *– PhD in Engineering Sciences, 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: nebozhak@ukr.net, *ORCID* https://orcid.org/0000-0002-0291-8144

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