

**В. С. Дорошенко<sup>1</sup>**  
**О. Б. Янченко<sup>2</sup>**  
**М. В. Лисий<sup>2</sup>**

## ЛИТІ МОДУЛЬНІ ТРАЛИ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*Умови воєнного часу роблять першочерговими дослідження, спрямовані на підвищення обороноздатності країни. Необхідна також інтенсифікація зусиль по створенню матеріалів із підвищеними властивостями, розроблення ефективних методів, технічних засобів і технологій для збільшення ресурсу різного обладнання та конструкцій як військового, так і цивільного призначення. Розробка високоміцних литих модульних конструкцій для обладнання оборонного чи подвійного застосування сприяє поширенню передових ливарних технологій у галузі оборонно-промислового комплексу. В роботі удосконалено конструкцію модульного тралу шляхом переведення зі зварних деталей на литі модулі (з двох частин), що за вагою доступні для збирання цих точних чавунних виливків в польових умовах, а також при виготовленні для експлуатації в екстремальних умовах рекомендовано їх додатково зміцнювати термообробкою. Запропоновано з науково-технологічним обґрунтуванням новий вид термообробки – гартування литих робочих органів для досягнення диференційної твердості їхніх поверхонь, що в умовах зношування буде приводити до самозагострювання робочих органів землерийного та ґрунтообробного обладнання. Також наведено приклади деталей модульних конструкцій, виготовлених точним литтям за моделями, що газифікуються (метод ЛГМ, Lost Foam Casting). Ці приклади виливків є, по суті, приклади деталей – змінних модулів, якими замінюють зношені деталі. Їхнє виготовлення відпрацьовано методом ЛГМ часто у литому стані з отворами для кріплення, вони практично не потребують механічної обробки. Як і розглянуті трали, так і плуги, культиватори, диско-чизельні борони до сучасних потужних тракторів встановлюються рядами. Зуби для ковшів екскаваторів чи подавальних конвеєрів також монтують рядами. Модульна будова дозволяє заміну зіпсованих модулів (як розхідних матеріалів) на нові чи більш досконалі з мінімальною затримкою експлуатації основних несучих конструкцій, що пов'язані з привідним механізмом чи машиною.*

**Ключові слова:** модульні конструкції, виливки, зношування, високоміцний чавун, гартування, ґрунтооброблювальні, землерийні, твердість металу, термообробка.

### Постановка проблеми

Умови воєнного часу роблять першочерговими дослідження, спрямовані на підвищення обороноздатності країни. Необхідна також інтенсифікація зусиль по створенню матеріалів із підвищеними властивостями, розроблення ефективних методів, технічних засобів та технологій для збільшення ресурсу різного обладнання, конструкцій як військового, так і цивільного призначення. Відповідно до цих проблем та викликів, за урядовими програмами Україна планує виготовляти готову металопродукцію, переробляючи на метал більшість руди власного видобутку. Ці рішення викладено у статті [1] першого віце-прем'єра міністра – міністра економіки Юлії Свириденко.

Україна дев'ята у світі за експортом металів (19 млн т на рік). Ми експортуємо велику кількість руди, яку за планом післявоєнного відновлення слід переробляти всередині країни. Адже тонна руди коштує 100...150 доларів (США, тут і далі), тонна металу – 500...1000 доларів, а готовий металевий виріб – 1,5...2 тис доларів. Якщо з металевих виробів виготовляти енергетичні машини, то ціна доходить до 15...20 тис доларів за тону [1].

Безпека України залежить лише від нас самих, для цього нам потрібне власне виробництво зброї. Для цього є стартові майданчики у вигляді підприємств військово-промислового комплексу (ВПК). Поставивши питання перед західними партнерами про трансфер військових технологій, уряд планує швидко налагодити виробництво усіх основних видів озброєння: від протиповітряної оборони до бронетехніки, ракет, стрілецької зброї, боеприпасів, літаків та кораблів [1], поставивши завдання – сформувати потужний військово-промисловий комплекс, що стане базою для подальшого розвитку у тому числі аерокосмічних технологій.

Ключова вимога – локалізація виробництва не менше 60%. Важливу роль у цьому секторі відіграватиме ІТ з тим акцентом, що Україна робитиме ставку на military-tech. У цьому прикладом для

наслідування може бути Ізраїль, який демонструє, як високі військові технології можуть стати двигуном цивільної економіки [1].

Розробка високоміцних литих модульних конструкцій для обладнання оборонного значення сприятиме поширенню передових ливарних технологій у галузі оборонно-промислового комплексу. Виробництво таких металевих виливків для експлуатації за екстремальних умов стимулює розвиток високотехнологічних процесів лиття, сприяє впровадженню у ливарне виробництво 3D-технологій.

### Огляд засобів подолання мінних полів та проектування для цього лито-збірних механізмів

На розмінування окупованих східних територій України, за словами міністра оборони О. Резнікова ([www.pravda.com.ua](http://www.pravda.com.ua), 2021) потрібно близько 25...30 років. Також потрібні надійні засоби подолання мінних полів військовою технікою для проведення оборонних операцій. Огляд останніх досліджень та публікацій за такою проблемою показав, що на виставці «Інтерполітех–2018» було представлено модульний мінний трал для бронетехніки, як один із засобів подолання мінних полів (рис. 1) [2].



Рис. 1. Макет модульного мінного тралу на виставці "Інтерполітех-2018" [2] та приклади бронетехніки для його застосування (на ескізі справа на трал встановлено на прутах додаткові легкі щитки)

Така конструкція тралу дозволяє збирати його з металевих модулів та швидко змінювати пошкоджені елементи у польових умовах. Модульний мінний трал під час подолання мінно-вибухових загорож робить практично невразливими танки та важкі БМП, у тому числі на вітчизняній платформі «Оплот», що дозволить забезпечити високу рухливість військ. Його призначення – знешкоджувати міни різних типів, у тому числі виставлені системами дистанційного мінування. При вазі близько 950 кг, він створює смугу тралення шириною до 4 м. При цьому швидкість руху техніки може досягати 25 км/год. Час встановлення на бойову машину – 30 хв. Усього близько 15 секунд достатньо, щоб перевести систему у бойове становище. Трал складається з механізму підвіски, що несе рами двовідвальної конфігурації з закріпленими на валу поворотними секціями, що мають плужки чи зубці-культиватори для оранки землі на певну глибину подібно ґрунтообробній сільгосптехніці. На тралі [2] також можливо встановити електромагнітну приставку, що ініціює підрив мін заздалегідь.

Наша розробка полягала у проектуванні литих конструкцій полегшеної ваги для зменшення трудомісткості та собівартості виготовлення конструкцій тралів та ініціації створення серії таких модульних лито-збірних високоміцних металовиробів для роботи в екстремальних умовах, типу [3]. Так, поворотні ободи з передніми щитками та зубцями-культиваторами (їх по 8 шт. встановлено по обидва боки від центральної осі бронемашини вздовж напрямку руху, рис. 1), нами запропоновано лиття з високоміцного чи сірого чавуну високих марок, на відміну від конструкції [2], на якій вони виготовлені зі сталі з застосуванням зварювання.

Також методу лиття металу за моделями, що газифікуються, (ЛГМ, Lost Foam Casting, LFC) властива достатня точність, що дозволяє застосовувати виливки в конструкції тралу без механічної обробки. Так за технологією ЛГМ (лиття за графітисуючими моделями) виливають робочі органи ґрунтообробної техніки. На рис. 2 показано приклади серійного точного лиття культиваторів для сільгосптехніки методом ЛГМ та ескіз захисних ободів (мінних тралів) з двох частин.

Розробка конструкції з двох півободів дозволяє зробити вагу цих виливків не більшою 50 кг, що згідно з нормативно-правовими актами охорони праці (НПАОП 52.0-1.01-96 та НПАОП 63.12-1.03-96), для чоловіків віком понад 18 років допускає ручне переміщення вантажів з робочої поверхні не більше 50 кг. Це полегшить заміну зруйнованих деталей у польових умовах та дозволить зменшити їхнє число. Конструкції елементів потенційного контакту з перешкодами мають бути поворотними та відкидатись вгору навколо осі при можливому вибуху, що спричиняє часткове гасіння енергії ударом при повороті модуля об ґрунт з обертанням на  $180^\circ$ , для чого верхня частина полицки 1 на передньому півободі 2 виконується під відповідним кутом.

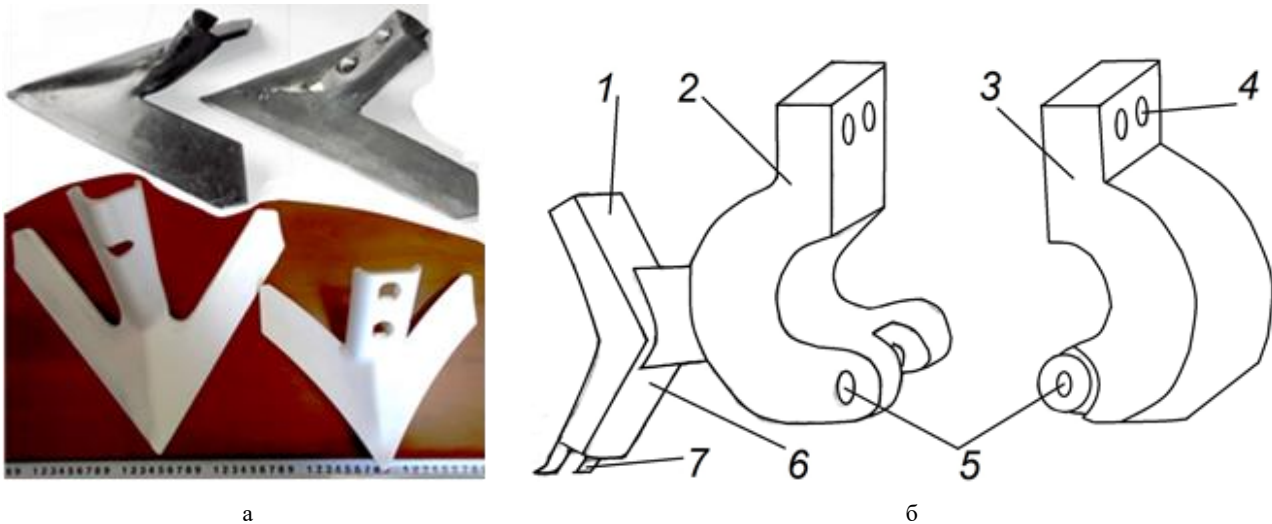


Рис. 2. Приклади лиття культиваторів (вилівки та їх пінопластові моделі) методом ЛГМ (а) та ескіз литих модульних ободів з двох частин (б)

Під час збиранні ободу з двох частин 2 та 3 передбачено скріплювати, зокрема, зверху болтами крізь отвори 4. А знизу передбачено кріплення крізь отвори 5 на палець з шплінтуванням (аналогічно гусеничній тракам) з наступним заведенням півободів під вісь на підкладках та потім скріпленням зверху болтами. Тоді нижня полицка 6 встановлюється на такій висоті, що зуби 7 занурюються у землю на певну глибину, що забезпечують відповідні фіксатори.

Значний потенціал зміцнення виливків для експлуатації за екстремальних умов забезпечує їхня термообробка (ТО) методом ізотермічного гартування (ІГ) до утворення у металі бейнітної структури, в тому числі з залишковим аустенітом, що під час їхньої експлуатації спричиняє утворення мартенситу деформації за рахунок тріп-ефекту [3], а також вельми важливий розроблений нами варіант ІГ для регулювання механічних властивостей виливків, що описаний нижче.

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАНУ) напрацьовано під керівництвом проф. О. Шинського науково-технологічні основи ЛГМ та значний досвід точного виливання деталей – робочих органів землерийної та ґрунтообробної техніки (рис. 3), як виробів подвійного використання як у цивільних будівельних чи промислових умовах, так і в оборонному плані, наприклад, щоб копати окопи, траншеї, котловани для укриття, бліндажів тощо. Саме для таких виливків буде корисний описаний нижче спосіб ІГ.

На сьогоднішній наявний значний науково-технологічний доробок зі створення процесів ТО литих виробів, зокрема з графітізованого чавуну, що дозволяють створити у ньому бейнітну структуру, яка підвищує показники міцності виливка у 1,5–2 рази, порівняно з традиційними виливками, що отримані в піщаних формах. Такі дослідження виконано, зокрема, як у ФТІМС НАНУ, так і у Вінницькому Національному Технічному Університеті (ВНТУ), що відображено у статтях та монографіях цих двох інститутів, які представляють автори цієї публікації. Зазначені високі показники міцності особливо важливі для деталей, що орудують в умовах, які призводять до їхнього зношування (див. рис. 2, 3). Саме способи ІГ рекомендовано для зміцнення таких виливків з залізобуглецевих сплавів, у тому числі чавунів.



Рис. 3. Приклади литих робочих органів землерийної техніки і їхніх моделей для ЛГМ

Розглянемо процес ІГ для виливків з чавунів, який починається з їх нагрівання до температури аустенізації металу та наступному ступінчастому охолодженні виливків. Зокрема, для високоміцного чавуну (ВЧ) вплив температури аустенізації, з якої виконують гартування, на твердість виливка, показано на рис. 4. При цьому вимірювали твердість загартованих зразків з ВЧ з наступним відпуском [4].

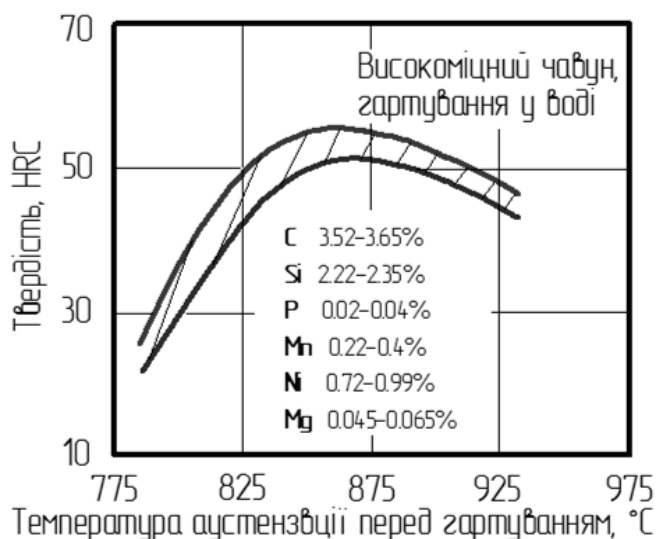


Рис. 4. Вплив температури аустенізації на твердість загартованих зразків (вказано хімічний склад ВЧ)

Найновіші способи підвищення властивостей залізовуглецевих сплавів полягають в отриманні двофазних (dual phase, DP) [5] чи багатофазних (зокрема, вітчизняні праці Л. С. Малинова, К. І. Узлова та ін.) мікро- та макронеоднорідних структур (аусферит, бейніт, мартенсит тощо) у метали виливків. Прикладом цього є двофазні за металевою матрицею ізотермічно загартовані чавуни DP-ADI, структура яких складається з аусфериту, вільного (проевтектоїдного), пересиченого вуглецем фериту та графіту. DP-ADI чавуни мають більшу пластичність, кращу оброблюваність, ніж звичайні ADI, що містять, наприклад, аусферит та графіт [5].

На рис. 5 [6] показано вертикальні розрізи потрійної діаграми Fe-C-Si паралельно стороні Fe-C з вмістом: Si – 2,0 % та Si – 3,8 %. Область міжкритичного інтервалу температур (МКІТ), що містить  $\alpha$  – ферит,  $\gamma$  – аустеніт та C – графіт (вуглець), зафарбовано сірим кольором.

Методом ІГ з області МКІТ, що показана на рис. 5, забезпечують певну частку у структурі DP-ADI вільного (проевтектоїдного) пересиченого вуглецем фериту і тим самим регулюють твердість DP-DI аналогічно рис. 4.

Так, у зразках [5] чавуну хімічного складу, мас. %: 3,53 C; 2,53 Si; 0,35 Mn; 0,045 Cu; 0,07 Ni; 0,055 Mg; 0,031 P; 0,015 S; при частці 18,4 % та 78,8 % (за об'ємом) такого фериту (решта – аусферит та графіт) твердість DP-ADI, відповідно, знаходиться у межах від 300...178 HB (рис. 6).

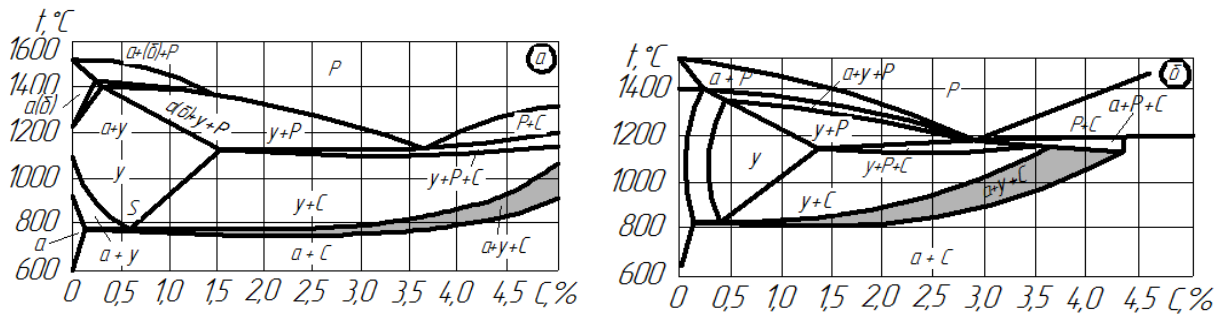


Рис. 5. Вертикальні розрізи потрійної діаграми Fe–C–Si паралельно стороні Fe–C при Si – 2,0 % (а) та Si – 3,8 % (б)  
[6]: α – ферит, γ – аустеніт, P – рідина, С – вуглець (графіт);  
область міжкритичного інтервалу температур (МКІТ) зафарбовано сірим кольором

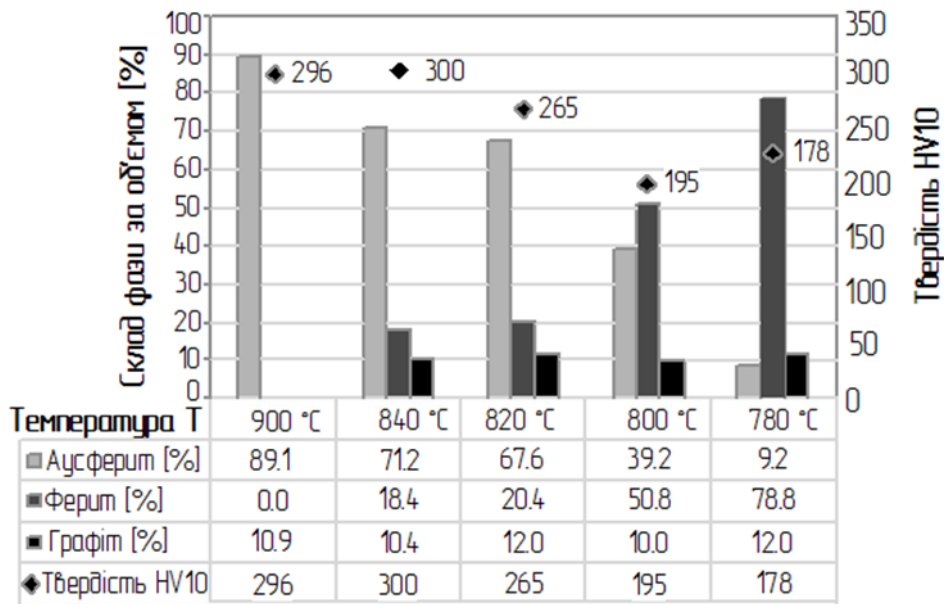


Рис. 6. Вплив відносного вмісту фаз (% за об'ємом) в структурі чавуну DP–ADI на його твердість [5];  
T<sub>γ</sub> – температура аустенізації

Оскільки у ФТІМС НАНУ запатентовано низку способів взаємного доповнення процесів лиття та термообробки – ІГ (або термообробки з литого стану) виливків з чавуну, то нами розроблено (як варіант ІГ) спосіб зовнішнього впливу на затверділий виливок для створення його диференційованих механічних властивостей. ФТІМС НАНУ давно удосконалює ЛГМ-процес, та й у розробленому способі регулювання та підвищення властивостей виливків застосували потенціал «сипкого піску» під час ЛГМ, що дозволяє легке вибивання чи видалення виливка з ливарної форми. Тому гарячий виливок в аустенітному стані нескладно видалити з сипкого піску ливарної форми та провести його ІГ, підвищивши механічні показники чавуну не менше ніж 1,5 рази, або виконавши більш складне ТО для підвищення фізико-механічних властивостей.

З прикладу на рис. 6 видно, якщо одну поверхню виливка під час ІГ загартувати з температури 820 °C, а другу з 800 °C, то твердість першої поверхні буде 265 НВ, а другій 195 НВ. Запропонований нами спосіб ґрунтувався на тому, що слід одну поверхню гарячого виливка захистити від охолодження, а на другій прискорити охолодження, досягнувши, наприклад, вказаного перепаду температур. При цьому застосували прийом під умовною назвою «холодильник-навпаки» або металевий «нагрівник чи теплоізолятор».

Металеві зовнішні холодильники давно застосовують для регулювання охолодження виливка у піщаній формі. Наведемо такий приклад. Якщо у термічній печі (термосі) тримати, наприклад, металеві пластини нагрітими до температури 820 ± 5 °C, видалити чавунний виливок з сипкого піску форми (під час ЛГМ) при температурі 830 ± 10 °C, накласти гарячу пластину на одну стінку виливка, а другу відкриту охолодити до температури 800 °C самовільною конвекцією повітря чи обдуванням повітря (в тому числі, вологого чи з аерозолем), і при досягненні 800 °C провести гартування виливка у воді чи іншому гартувальному середовищі з подальшим виконанням операцій згідно ІГ, то одна поверхня

загартується з температури 820 °С, а друга – з 800 °С, відповідно буде і твердість цих поверхонь (як ми вище розглянули), а також міцність, що прямо залежить від твердості. А сучасними пірометрами, що дають похибки  $\pm 3$  °С та менше, неважко контролювати ці температури.

З такими диференційованими механічними властивостями виливків їх доцільно застосувати для деталей, що служать в умовах зношування (рис. 7), потребують однієї поверхні твердої та міцної, а другої – більш м'якої, в'язкої чи з неважкою оброблюваністю тощо.

При цьому металева матриця [7] однієї поверхні вилівка може бути аустеритною з твердістю 300...550 НВ, а друга – майже повністю феритною з твердістю 150...200 НВ (як крайній варіант).

При зношеності вилівка – литого робочого органу землерийної чи ґрунтообробної техніки, що працюють в екстремальних умовах, прошарки металу від м'якшої поверхні будуть швидше зношуватись, ніж від твердішої, і цей робочий орган буде самозагострюватись у процесі зношення. Це призведе до зменшення зусиль та енерговитрат для руху таких робочих органів чи інструментів.

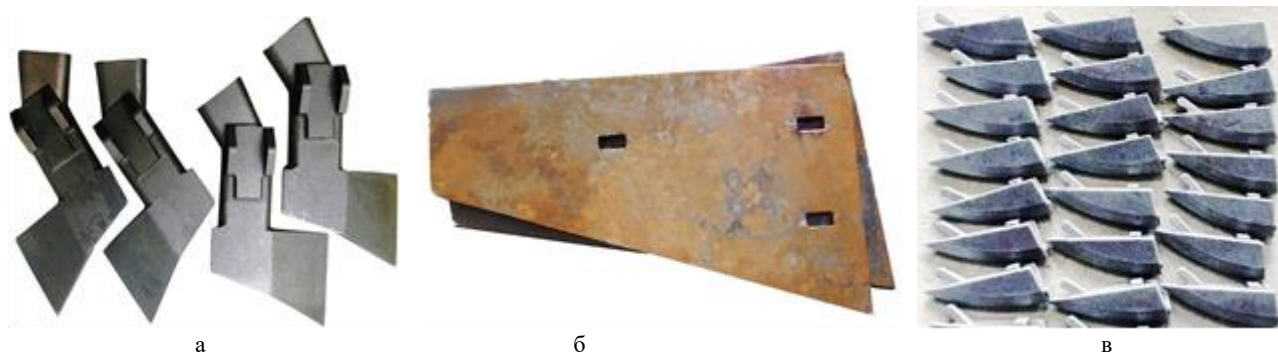


Рис. 7. Приклади виливків (а, б), що застосовують в умовах зношування, та їх пінополістирольні моделі (в) для ЛГМ

Показані нами приклади виливків є, по суті, прикладами деталей – змінних модулів, якими заміщують зношені деталі. Їх виготовлення відпрацьовано методом ЛГМ часто з отворами для кріплення, вони практично не потребують механічної обробки. Як і розглянуті трали, так і плуги, культиватори, диско-чизельні борони до сучасних потужних тракторів встановлюються рядами. Зуби для ковшів екскаваторів чи подавальних конвеєрів також монтують рядами.

Модульна будова дозволяє заміну зіпсованих модулів (як розхідних матеріалів) на нові чи більш досконалі з мінімальною затримкою експлуатації основних несучих конструкцій, що пов'язані з привідним механізмом чи машиною.

### Висновки

Таким чином, у роботі удосконалено конструкцію мінного тралу шляхом переведення зі зварних деталей на литі модулі (з двох частин), що за вагою доступні для збирання таких точних чавунних виливків у польових умовах, а також під час виготовлення для експлуатації в екстремальних умовах рекомендовано їх додаткове зміцнення термообробкою.

Запропоновано та обґрунтовано новий вид гартування литих робочих органів для досягнення диференційної твердості їхніх поверхонь, що в умовах зношування буде приводити до самозагострювання робочих органів землерийного та ґрунтообробного обладнання. Також наведено приклади деталей модульних конструкцій, виготовлених точним литтям методом ЛГМ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ю. Свириденко, «Як буде відновлюватися Україна?». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pravda.com.ua/columns/2022/04/21/7341214/>. Дата звернення: Квіт. 21, 2022.
- [2] Модульный минный трал с улучшенными характеристиками. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://photos.rg.ru/2018/10/24/2c3a3bc0.html/>. Дата звернення: Дек. 19, 2018.
- [3] В. С. Дорошенко, В. О. Шинський, «Спосіб виробництва броньової перешкоди з високоміцного чавуну у ливарних формах з сипкого піску», Патент України № 139560, МПК (2006), B22D 7/00, B22D 23/00, F41H 5/00, опубл. 10.01.2020, Бюл. №1.
- [4] Jon L. Dossett, Howard E. Boyer. *Practical Heat Treating: Second Edition*. ASM International, 2006, 296 p. Doi: 10.1361/pht2006\_FM.
- [5] Olivera Eric et al. "Dual Phase Austempered Ductile Iron - The Material Revolution and Its Engineering Applications", in *Computational and Experimental Approaches in Mat. Sc. and Engineering*. CNNTech, p. 22-38, September 2019.
- [6] Ю. А. Геллер, А. Г Рахштадт, *Материаловедение*. М.: Металлургия, 1989, 456 с.
- [7] К. В. Макаренко «Рациональное структурирование графитизированных чугунов», *Труды Нижегородского ГТУ им. Алексева*, № 2, с. 196-205, 2014.

**Дорошенко Володимир Степанович** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів, e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

**Янченко Олександр Борисович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com)

**Лисий Михайло Вікторович** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, e-mail: [m.lysyi64@gmail.com](mailto:m.lysyi64@gmail.com)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**V. Doroshenko<sup>1</sup>**  
**O. Yanchenko<sup>2</sup>**  
**M. Lysyi<sup>2</sup>**

## **Cast modular trawls and promising methods of making castings for earthmoving and tillage equipment**

<sup>1</sup>Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*The development of high-strength cast modular structures for defense or dual-use equipment contributes to the spread of Wartime conditions make research aimed at increasing the country's defense capabilities a priority. It is also necessary to intensify efforts to create materials with increased properties, develop effective methods, technical means and technologies to increase the resource of various equipment and structures, both military and civilian. The development of high-strength cast modular structures for defense or dual-use equipment contributes to the spread of advanced foundry technologies in the field of the defense-industrial complex. In the work, the design of the modular trawl was improved by switching from welded parts to cast modules (from two parts), which by weight are available for assembling these precise cast iron castings in the field, and when manufactured for operation in extreme conditions, their additional strengthening by heat treatment is recommended. A new type of heat treatment is proposed with scientific and technological justification - hardening of cast working bodies to achieve differential hardness of their surfaces, which in conditions of wear will lead to self-sharpening of working bodies of earthmoving and soil processing equipment. Also given are examples of details of modular constructions made by precision casting on patterns that are gasified (Lost Foam Casting, LFC). These examples of castings are, in fact, examples of parts - replacement modules that replace worn parts. Their production is developed using the LFC method, often in a cast state with holes for fastening, they practically do not require mechanical processing. Like the discussed trawls, plows, cultivators, disk-chisel harrows are installed in rows to modern powerful tractors. Teeth for buckets of excavators or feed conveyors are also mounted in rows. The modular structure allows the replacement of damaged modules (as consumables) with new or more advanced ones with minimal delay in the operation of the main supporting structures associated with the drive mechanism or machine.*

**Key words:** modular constructions, castings, wear, high-strength cast iron, hardening, tillage, earthmoving, metal hardness, heat treatment.

**Doroshenko Volodymyr** – Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Physical Chemistry of Foundry Processes, e-mail: [doro55v@gmail.com](mailto:doro55v@gmail.com)

**Yanchenko Olexander** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Engineering, e-mail: [1961yab@gmail.com](mailto:1961yab@gmail.com)

**Mykhailo Lysyi** – Ph. D. (Phys. And Math), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, e-mail: [m.lysyi64@gmail.com](mailto:m.lysyi64@gmail.com)