

<https://doi.org/10.15407/plit2025.01.011>

УДК 669.14.018.29:669.11; 669.14.018.9:669.11, 621.746.5:67.02,
621.74.04:623.1/.3

О.Й. Шинський, д-р. техн. наук, проф., зав. відділу;
e-mail: aluprt@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6200-0709>

Г.Є. Федоров, кад. техн. наук, доц., старш. наук. співроб.;
e-mail: odus@ptima.kiev.ua; <https://orcid.org/0009-0006-3284-0137>

Ю.Г. Квасницька, чл.-кор. НАН України, зав. відділу;
e-mail: jul.kvasnitskaya@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

І.А. Шалевська, д-р. техн. наук., доц., заступник директора;
e-mail: innashalevska@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8410-7045>

П.Б. Калюжний, канд. техн. наук, заступник директора;
e-mail: kpb.ptima@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1111-4826>

О.В. Нейма, мол. наук. співроб.; e-mail: Neima_Alex@ukr.net;
<http://orcid.org/0000-0001-5438-7253>

А.В. Шалевський, головний технолог.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України (м. Київ)

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ПОРОЖНИСТИХ МЕТАЛЕВИХ МОДУЛІВ ЗАХИСНИХ СПОРУД

Проаналізовано вітчизняні й світові аналоги металевих матеріалів, які використовують для виготовлення захисних модулів багатофункціонального призначення методами лиття. Установлено, що серед сплавів на основі заліза найефективнішими та найперспективнішими для досягнення вимогових фізико-механічних властивостей можуть бути низько- та середньовуглецеві низьколеговані, мікролеговані та модифіковані сталі. Ці сталі повинні мати такі фізико-механічні властивості: межу міцності від 500 МПа до 950 МПа; межу плинності від 450 МПа до 800 МПа, відносне звуження від 15 % до 30 %; ударну в'язкість від 50 Дж/см² до 70 Дж/см² та ливарні властивості: рідкоплинність, лінійну та об'ємну усадку, тріщиностійкість тощо, які б забезпечували виготовлення якісних тонкостінних виливків різних габаритних розмірів в умовах великосерійного та масового виробництва. Для дослідження фізико-механічних властивостей і мікроструктури дослідних сталей використано сучасні методики й прилади. Враховуючи, що металоконструкції для захисних споруд багатоцільового призначення працюють в умовах статичного навантаження, з метою мінімальних енерговитрат на їх масове або великосерійне виробництво досліджено вплив режимів термічного оброблення на фізико-механічні властивості сталей і визначено найефективніші з них залежно від умов експлуатації литих деталей. Установлено, що серед досліджених сталей найвищі механічні властивості має розроблена й рекомендована для виготовлення литтям за газифікованими

моделями тонкостінних порожнистих модулів для захисних споруд сталь 35ХГАФЛ після гартування виробів із температури 930 °С у воді з подальшим відпуском при температурі 510 °С. При цьому режимі термічного оброблення сталь набуває таких значень властивостей, не менше: межа міцності σ_b — 1150 МПа, межа плинності σ_s — 1010 МПа, відносне видовження δ — 16%, відносне звуження ψ — 20%, ударна в'язкість (КСУ) — 70 Дж/см², твердість — 31 НРС. Отже, рекомендована сталь 35ХГАФЛ має фізико-механічні властивості, які набагато перевищують вимоги для сплавів, що застосовуються у виробництві елементів захисних споруд.

Ключові слова: армоване сталеве лиття, тонкостінні литі модулі, лиття за газифікованими моделями, мікролегування, модифікування, дослідний зразок.

Вступ

Сучасні умови диктують потребу в литих конструкціях із підвищеними експлуатаційними характеристиками. Тому розробка науково обґрунтованих технологій для виготовлення оболонкових бінарних литих конструкцій із високими функціональними властивостями є актуальним завданням, що потребує додаткових досліджень. Такі конструкції створюють методом лиття з використанням газифікованих моделей.

Зростаюча потреба у захисних спорудах і високі вимоги до їх складових елементів — зокрема до фізико-механічних характеристик сталей та можливості виготовлення модулів із металевими й неметалевими армуючими фазами — зумовлюють необхідність вибору високоміцних економнолегованих сталей. Ці матеріали не повинні містити дорогих і рідкісних легувальних компонентів. Крім того, потрібно створювати ефективні технології для виробництва литих елементів із стільниковою структурою, а також визначати оптимальні режими термічної обробки таких виробів.

Метою дослідження є вибір марки сталей для використання їх як матричного сплаву при одержанні порожнистих литих виливків та визначити їх структури й фізико-механічних властивостей.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання: визначити марку сталей, розробити методику досліджень мікроструктури та фізико-механічних властивостей сталей; виплавити в лабораторних умовах зразки запропонованих марок сталей, виготовити зразки для дослідження мікроструктури сталей й визначити їх фізико-механічні властивості за різними режимами термічної обробки.

Огляд вітчизняних і зарубіжних металевих матеріалів, що застосовуються для виготовлення захисних модулів багатофункціонального призначення методом лиття, показав, що найбільш доцільними для виконання поставлених завдань є низько- і середньовуглецеві низьколеговані, мікролеговані та модифіковані сталі. Зіставлення міжнародних аналогів цих сталей підтвердило, що вони повинні забезпечувати такі характеристики: межа міцності в межах 500–950 МПа, межа плинності — 450–800 МПа, відносне звуження 15–30 % і ударна в'язкість 50–70 Дж/см². Крім того, зважаючи на високий попит на захисні споруди, сталі для литих модулів мають бути економічно доцільними й не містити дефіцитних або дорогих легувальних елементів, таких як нікель, молібден чи мідь.

Аналіз сучасної технічної літератури показав, що для литих модулів захисних споруд необхідний рівень фізико-механічних властивостей сталей системи С–Si–Mn досягається за рахунок комплексного легування хромом, молібденом, нікелем, ванадієм та застосуванням складних режимів термічної обробки [1–8].

Згідно з міжнародними стандартами [9], на ливарні сталі А352...А732 передбачено для виготовлення литих деталей, що їх використовують як елементи захисних споруд, сталі системи С–Si–Mn, які легують наведеними вище хімічними елементами. Це дає змогу після відповідних режимів термічного оброблення одержати метал у формах з межею плинності понад 400 МПа.

З огляду на багаторічний досвід науковців ФТІМС НАН України [10–12], установлено, що застосування методів додаткового легування, мікролегування карбідо- та нітридоутворювальними елементами, а також модифікування азотом дає змогу

досягти необхідних фізико-механічних характеристик. Зокрема, це межа міцності 550...900 МПа, межа плинності — 450...750 МПа, відносне видовження — 15...30 %, ударна в'язкість — 55...75 Дж/см².

Матеріали та методи

За результатами попередніх комплексних досліджень [10–13] впливу процесів мікролегування та модифікування на структуру й фізико-механічні властивості сталей як матеріал для виготовлення захисних модулів у подальших дослідженнях використано сталі 45Л [14] і 35ХГАФЛ; остання має найвищі показники властивостей серед групи вивчених нами мікролегованих і модифікованих сталей.

Сталі виплавляли в індукційній печі з основною футеровкою й місткістю тигля 3 кг. Температуру металу перед додаванням легувальних елементів у залізовуглецевий розплав і його випусканням із печі вимірювали за допомогою вольфрам-ренієвої термопари ВР 5/20, підключеної до електронного потенціометра нового покоління МикРА 610.

Заготовки для зразків різного призначення виготовляли в сухих підігрітих піщано-глинястих формах. Для визначення механічних властивостей зразки виготовляли із заготовок діаметром 12 мм і довжиною 70 мм, для визначення ударної в'язкості сталей відливали заготовки розмірами 12 мм×12 мм×60 мм, з яких виготовляли стандартні зразки.

Для порівняння фізико-механічних властивостей і результатів металографічних досліджень використано зразки із заготовок, виготовлених із використанням розробленої нами оснастки та вирізаних із тріфи відповідно до вимог ДСТУ 8781:2018, варіант 2 [14].

Метал в обох випадках мав практично однакові фізико-механічні властивості, але ефективнішою й набагато дешевшою для виготовлення заготовок є комплексна проба.

Хімічний склад сталей визначали за стандартними методиками, відповідно до нормативних документів: вміст марганцю, фосфору та сірки визначали за [16–18], азоту — методом відновлювального плавлення в інертному середовищі з використанням газоаналізатора Т114 від компанії «Леко» (Німеччина). Інші елементи визначали спектральним аналізом.

Механічні характеристики сталей оцінювали за загальноприйнятими методиками, зокрема для випробувань зразків на розтягування використовували сервогідравлічну машину INSTRON 8802. Твердість металу вимірювали на приладі ТК-2 при навантаженні 150 кг. Ударну в'язкість сталей визначали за нормальних умов [19] на копрі МК 30 з максимальною енергією удару 294 Дж. Дослідження мікроструктури сталей здійснювали на мікроскопі Neofot 2 відповідно до [20]. Забрудненість металу неметалевими вкраплинами визначали за вимогами [21] з використанням трьох зразків кожної марки сталі. Бал зерна визначали на зразках після їх нормалізації, гартування та відпуску [20].

Результати дослідження

Для порівняння фізико-механічних властивостей ливарних сталей різного класу за результатами попередніх досліджень вибрано сталь 35ХГАФЛ, яка має найвищі показники, та стандартну сталь 45Л [14].

Хімічний склад одержаних зразків дослідних сталей перебував у межах, наведених у табл. 1.

Зразки, виготовлені зі сталі 45Л, піддавали стандартному термічному обробленню згідно з [14], а саме: нормалізації при температурі 860 °С, витримуванню при цій температурі протягом 30 хв з подальшим відпуском при температурі 600 °С протягом 1 год.

Враховуючи термодинамічні розрахунки рівновагової температури розчинення й утворення VN фази в твердому розчині встановлено, що для сталі 35ХГАФЛ температура аустенізуючого нагрівання під нормалізацію та гартування становить від 920 °С до 940 °С, час витримування зразків у печі при цих температурах – 1 год.

Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, мас. %										
	C	Si	Mn	Cr	N	V	Al	Ni	Cu	S	P
	не більше										
45Л [14]	0,42... 0,50	0,20... 0,52	0,45... 0,90	≤ 0,25	—	—	—	0,25	0,25	0,035	0,035
35ХГАФЛ	0,30... 0,40	0,55... 0,65	0,45... 0,90	0,30... 0,7	0,011... 0,014	0,08... 0,11	0,015... 0,020	—	—	0,025	0,025

Після нормалізації зразки для визначення фізико-механічних властивостей і металографічних досліджень охолоджували на повітрі. Гартування зразків здійснювали у воді. Відпуск зразків після нормалізації та гартування виконували при температурах 510 °С, 550 °С і 600 °С. Після витримування при цих температурах протягом 1 год зразки охолоджували на повітрі. Фізико-механічні властивості металу визначали з використанням зразків після нормалізації, гартування та відпуску.

Залежно від призначення литих виробів, виготовлених зі сталей, відповідними режимами термічного оброблення можна одержати фізико-механічні властивості, які наведено в табл. 2.

Розмір зерна визначали після нормалізації (аустенізації) сталей 45Л і 35ХГАФЛ за бальною шкалою. Досліджувані сталі мають дрібнозернисту структуру: 6...7 бал — у сталі 45Л і 7...8 бал — у сталі 35ХГАФЛ.

Залежно від умов експлуатації захисних споруд режимами термічного оброблення можна отримати необхідні фізико-механічні властивості та структуру сталей.

Для зниження собівартості литва із сталі 35ХГАФЛ зменшенням енерговитрат на термічне оброблення литих заготовок доцільно використовувати їх нормалізацію при температурі 930 °С з подальшим охолодженням на повітрі (див. табл. 2). Одержані після такого режиму термічного оброблення виробів фізико-механічні властивості повною мірою відповідають поставленим технічним завданням. При такому режимі термічного оброблення бал зерна сталі перебуває в межах 7...8.

Мікроструктури сталей після нормалізації та відпуску показано на рис. 1. Мікроструктура сталі 35ХГАФЛ після нормалізації при температурі 930 °С перлітно-феритна: перліт тонкопластинчастий, ферит розташований за межами зерен аустеніту у вигляді розірваних сіток. Відпуск сталі після нормалізації сприяє підвищенню твердості внаслідок дисперсійного виокремлення всередині зерен нітридванадієвої (VN) фази.

Актуальним завданням під час виробництва виливків із використанням газифікованих моделей є визначення рівня неметалевих вкраплень (НВ) у металі середніх і великих розмірів. Важливо знати не тільки рівень забрудненості металу НВ, а й морфологію, розміри, форму та джерела, що сприяють утворенню цих вкраплень. У цьому разі можна буде використати певні технологічні заходи, які зменшуватимуть їх кількість або змінюватимуть їх форму, наприклад переводитимуть НВ із гострокутної форми в глобулярну, що суттєво підвищуватиме фізико-механічні властивості металу.

Індекс забрудненості металу неметалевими вкрапленнями визначали лінійним методом відповідно до вимог [21] на нетравлених шліфах, виготовлених із заготовок обох сталей. Загальний вигляд розташування неметалевих вкраплень у металі показано на рис. 2, а числові значення кожного типу НВ і загальний індекс забрудненості металу — на рис. 3.

Дослідженнями металу шліфів зі сталі 45Л встановлено, що загальний індекс забрудненості металу неметалевими вкрапленнями не перевищує 0,0034. Для сталі

Таблиця 2
Режими термічного оброблення та фізико-механічні властивості вуглецевої сталі 45Л і мікролегованої та модифікованої сталі 35ХГАФЛ

Марка сталі	Режими термічного оброблення		Фізико-механічні властивості сталі				
			σ _т , МПа	σ _в , МПа	ψ, %	KCU, Дж/см ²	твердість, HRC
	нормалізація, гартування, °С, середовище охолодження	відпуск, °С	не менше				
45Л	нормалізація при температурі 860 °С, повітря	600	314	540	20	59	17
		без відпуску	600,0	850,0	22,0	72,0	20,0
35ХГФЛ	нормалізація при температурі 930 °С, повітря	510	600,0	850,0	24,0	82,0	22,5
		550	600,0	890,0	24,0	82,0	22,0
		600	605,0	915,0	23,0	67,0	25,0
		510	1010,0	1150,0	20,0	75,0	31,0
	гартування з температури 930 °С, вода	550	795,0	980,0	27,0	84,0	26,0
		600	850,0	1010,0	24,0	75,0	26,0
Вимоги за технічним завданням			450...750	550...900	15...30	55...75	≥15

35ХГАФЛ цей показник не перевищує 0,0024 (див. рис. 3). Індекс забрудненості сталі 35ХГАФЛ оксидами дещо вищий у порівнянні із сталлю 45Л унаслідок додаткового легування сталі хімічними елементами, що мають високу спорідненість до кисню (хром) та модифікування сталі азотом для нітридного зміцнення металу.

На рис. 4 показано залежність частоти випадків від величини індексу забрудненості металу неметалевими вкрапленнями.

Аналіз одержаних результатів дослідження НВ у сталях дозволив визначити таке:
– загальний індекс забрудненості литого металу зразків, вирізаних із реальних модулів, виготовлених із використанням газифікованих моделей, перебуває на

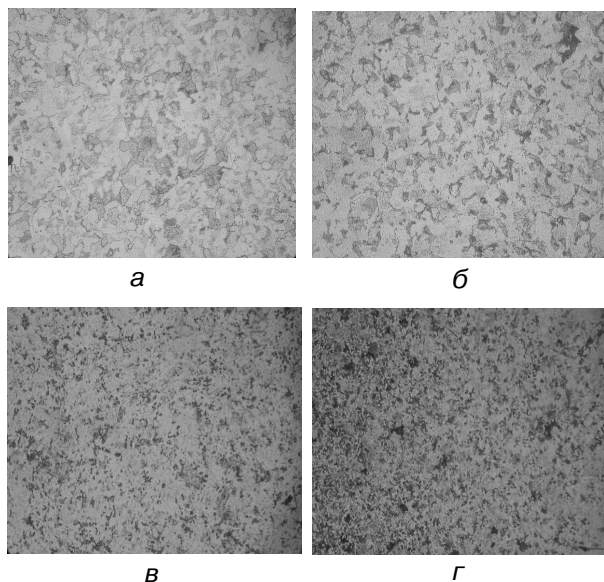


Рис. 1. Мікроструктури сталей 45Л (а, б) і 35ХГАФЛ (в, г) після нормалізації при 860 °С (а) і 930 °С (в) і нормалізації при 860 °С (б) і 930 °С (г) й відпуску при температурі 600 °С (б) і 510 °С (г), $\times 200$

рівні значень для металу виробів із вуглецевих сталей, одержаних за традиційними технологіями — литтям в разові об'ємні піщано-глинясті форми;

– у металі сталі 35ХГАФЛ трапляються порівняно великі неметалеві вкраплення оксидів (див. рис. 2, б). Такі вкраплення можуть бути часточками шлаку (оскільки зразки вирізали з верхньої частини литого модуля) або результатом вторинного окиснення розплаву під час заливання форм;

– режими термічного оброблення сталей мало впливають на зміну морфології неметалевих вкраплень та їх кількості за винятком нормалізації. Тривале охолодження металу на повітрі сприяє певному перерозподілу морфології НВ: збільшується

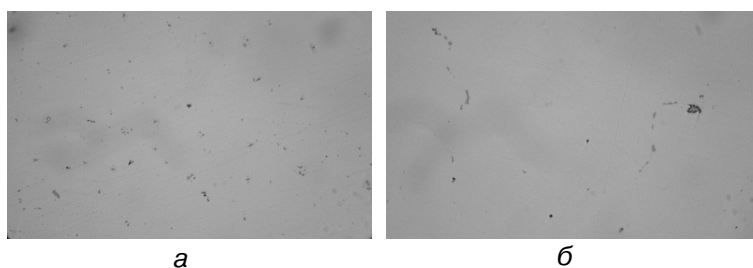


Рис. 2. Забрудненість неметалевими вкрапленнями металу сталей для виготовлення модулів багатофункціонального призначення: а — зразок №1 (сталь 45Л); б — зразок №2 (сталь 35ХГАФЛ), $\times 200$

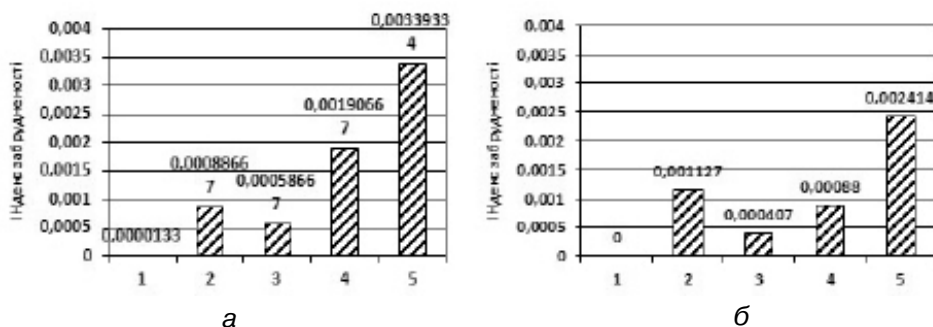


Рис. 3. Індекс забрудненості металу модулів багатофункціонального призначення неметалевими вкрапленнями різної морфології та загальний індекс забрудненості: 1 — нітриди; 2 — оксиди; 3 — силікати; 4 — сульфіді; 5 — загальний індекс забрудненості сталі НВ

кількість сульфідів, оскільки вони утворюються внаслідок зменшення розчинності сірки в залізі зі зниженням температури металу.

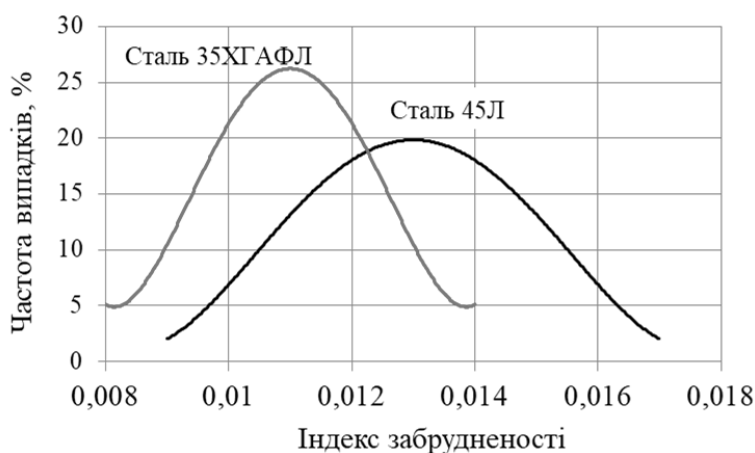


Рис. 4. Індекс забрудненості сталі 45 і сталі 35ХГАФЛ

Висновки

З огляду на зазначені особливості сталей та вимоги до них, на основі досліджень їх фізико-механічних властивостей установлено, що для виготовлення литих порожнистих модулів захисних споруд недоцільно використовувати сталь 45Л, оскільки її фізико-механічні властивості як після нормалізації, так і після гартування з відпуском нижчі за вимогові (див. табл. 2 та [14]).

Розроблена та рекомендована для виготовлення порожнистих тонкостінних модулів захисних споруд литтям за газифікованими моделями сталь 35ХГАФЛ перевищує вимогові показники фізико-механічних властивостей за технічним завданням (див. табл. 2) і може бути використана в будь-яких умовах експлуатації захисних споруд після вибору відповідного режиму термічного оброблення модулів.

Найкращий комплекс фізико-механічних властивостей для сталі 35ХГАФЛ можна досягти після гартування з температури 930 °С у воду й відпуску при температурі 510 °С: $\sigma_B = 1150$ МПа, $\sigma_T = 1010$ МПа, $\delta = 16\%$, $\psi = 20\%$, KCU = 70 Дж/см², твердість — 31 HRC.

Ці дослідження є теоретичною передумовою для перевірки під час виготовлення дослідних литих порожнистих конструкцій із металевою та неметалевою армуючою фазою. У наведених дослідженнях здійснено порівняння фізико-механічних властивостей тільки двох марок сталей. Отже, для уможливлення використання більш широкої номенклатури сталей під час впровадження технологій у виробництво елементів захисних споруд необхідні додаткові дослідження, систематизація та розширення рекомендованих сплавів.

Список літератури

- 1 Singla, Y. K., Maughan, M. R., Arora, N., & Dwivedi, D. K. (2024). Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes*, 120, 135–160. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>.
- 2 Harshad K.D.H. Bhadeshia, Robert W.K. Honeycombe, 12 - Stainless steel// *Steels* (Fifth edition), Structure, Properties and Design, 2024, Pages 347-381. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-318491-8.00018-6>.
- 3 Muhammad Azeemullah, Q.P. Cao, X.D. Wang, S.Q. Ding M. Abubaker, D.X. Zhang, J.Z. Jiang. Carbon effect on tensile and wear behaviors for a dual-phase Fe61.5Cr17.5Ni13Al8 alloy// *Materials Science and Engineering: A*, Volume 914, November 2024, 147128. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147128>

- 4 Narivskiy, A., Shinsky, O., Shalevska, I., Kvasnitska, Y., Kaliuzhnyi, P., & Polyvoda, S. (2024). The influence of external actions and methods of alloying alloys on the operational characteristics of cast products. In *Structural materials: Manufacture, properties, conditions of use* (Chapter 4). <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-97-8.ch4>.
- 5 Tsyganov, V., Naumik, V., Byalik, H., Ivschenko, L., & Mokhnach, R. (2019). Steel-copper nano-composited materials. In *Contributed Papers from Materials Science and Technology 2019 (MS&T19)* (pp. 439–443). <https://doi.org/10.7449/2019/MST-2019-439-443>.
- 6 Bastola, A., McCarron, R., Shipway, P., Stewart, D., & Dini, D. (2024). Experimental and numerical investigations of sliding wear behaviour of an Fe-based alloy for PWR wear resistance applications. *Wear*, 540–541, 205186. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205186>.
- 7 Wakai, E., Noto, H., Shibayama, T., Furuya, K., Ando, M., Kamada, T., Ishida, T., & Makimura, S. (2024). Microstructures and hardness of BCC phase iron-based high entropy alloy Fe-Mn-Cr-V-Al-C. *Materials Characterization*, 211, 113881. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113881>.
- 8 Kondratyuk, S. Y., Veis, V. I., Parkhomchuk, Z. V., Kvasnytska, Y. H., & Kvasnytska, K. H. (2023). Thermokinetic parameters of solidification and gradient structure of steel castings. *Metallifizika i Noveishie Tekhnologii*, 45(7), 865–872.
- 9 ASTM A732/A732M-20. (2020). Standard specification for castings, investment, carbon and low-alloy steel for general application, and cobalt alloy for high strength at elevated temperatures. *Book of Standards*, 01.02. https://doi.org/10.1520/A0732_A0732M-20.
- 10 Шипицин, С. Я., Федоров, Г. Є., Кірчу, І. Ф., Лиховой, Д. І., & Степанова, Т. В. Підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей високомарганцевих сталей удосконаленням технологічних процесів їх плавлення, мікролегування та модифікування. *Процеси лиття*. 2024. № 1. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.014>.
- 11 Ямшинський, М. М., Федоров, Г. Є., & Радченко, К. С. Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2015. № 3. С. 33–37. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddma_2015_3_7.
- 12 Ямшинский, М. М., & Федоров, Г. Е. Литейные и механические свойства жаростойких сталей. *Металлургия. Машиностроение*. 2015. № 2. С. 17–24.
- 13 Шалевська, І. А., Дорошенко, В. С., Калюжний, П. Б., & Квасницька, Ю. Г. Огляд застосування металевих литих матеріалів у будівництві підземних та захисних споруд. *Метал і лиття України*. 2022. № 30(4). С. 54–61. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.054>.
- 14 ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови. 2018.
- 15 Steel castings — General technical delivery requirements (2023) ISO 4990:2023 <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/84185/33d9639ba3db417ab01fe2a41751f295/ISO-4990-2023.pdf>.
- 16 ДСТУ 8901:2019. Сталь та чавун. Методи визначення фосфору. 2019.
- 17 ДСТУ 9055:2020. Сталь та чавун. Методи визначення марганцю. 2020.
- 18 ДСТУ ГОСТ 12345:2004 (ISO 671:1982, ISO 4935:1989). Сталі леговані та високолеговані. Методи визначення сірки. 2004.
- 19 ДСТУ ISO 148-1:2022. Металеві матеріали. Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Ч. 1. Метод випробування (ISO 148-1:2016, IDT). 2022.
- 20 ДСТУ 9074:2021. Сталь. Еталони мікроструктури. (2021).
- 21 ДСТУ 8966:2019. Сталь. Металографічні методи визначення неметалевих включень. 2019.
- 22 ISO 643:1983. (1983). Steels: Micrographic determination of the ferritic or austenitic grain size. Retrieved from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/4773/6ad7e45fca0d4d-aa86654405f6e2d12e/ISO-643-1983.pdf>.
- 23 ДСТУ 7809:2015. Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. 2015.

Надійшла 14.11.2024

References

- 1 Singla, Y. K., Maughan, M. R., Arora, N., & Dwivedi, D. K. (2024). Enhancing the wear resistance of iron-based alloys: A comprehensive review of alloying element effects. *Journal of Manufacturing Processes*, 120, 135–160. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.038>.
- 2 Harshad K.D.H. Bhadeshia, Robert W.K. Honeycombe, 12 - Stainless steel// *Steels* (Fifth edition), Structure, Properties and Design, 2024, Pages 347-381. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-318491-8.00018-6>.
- 3 Muhammad Azeemullah, Q.P. Cao, X.D. Wang, S.Q. Ding M. Abubaker, D.X. Zhang, J.Z. Jiang. Carbon effect on tensile and wear behaviors for a dual-phase Fe61.5Cr17.5Ni13Al8 alloy// *Materials Science and Engineering: A*, Volume 914, November 2024, 147128. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147128>
- 4 Narivskiy, A., Shinsky, O., Shalevska, I., Kvasnitska, Y., Kaliuzhnyi, P., & Polyvoda, S. (2024). The influence of external actions and methods of alloying alloys on the operational characteristics of cast products. In *Structural materials: Manufacture, properties, conditions of use* (Chapter 4). <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-97-8.ch4>.
- 5 Tsyganov, V., Naumik, V., Byalik, H., Ivshenko, L., & Mokhnach, R. (2019). Steel-copper nano-composited materials. In *Contributed Papers from Materials Science and Technology 2019 (MS&T19)* (pp. 439–443). <https://doi.org/10.7449/2019/MST-2019-439-443> [in English].
- 6 Bastola, A., McCarron, R., Shipway, P., Stewart, D., & Dini, D. (2024). Experimental and numerical investigations of sliding wear behaviour of an Fe-based alloy for PWR wear resistance applications. *Wear*, 540–541, 205186. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205186> [in English].
- 7 Wakai, E., Noto, H., Shibayama, T., Furuya, K., Ando, M., Kamada, T., Ishida, T., & Makimura, S. (2024). Microstructures and hardness of BCC phase iron-based high entropy alloy Fe-Mn-Cr-V-Al-C. *Materials Characterization*, 211, 113881. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113881> [in English].
- 8 Kondratyuk, S. Y., Veis, V. I., Parkhomchuk, Z. V., Kvasnytska, Y. H., & Kvasnytska, K. H. (2023). Thermokinetic parameters of solidification and gradient structure of steel castings. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*, 45(7), 865–872 [in English].
- 9 ASTM A732/A732M-20. (2020). Standard specification for castings, investment, carbon and low-alloy steel for general application, and cobalt alloy for high strength at elevated temperatures. *Book of Standards*, 01.02. https://doi.org/10.1520/A0732_A0732M-20 [in English].
- 10 Shipitsyn, S. Y., Fedorov, G. E., Kirtchu, I. F., Likhovey, D. I., & Stepanova, T. V. (2024). Enhancing the physical-mechanical and operational properties of high-manganese steels by improving technological processes of melting, microalloying, and modification. *Casting Processes*, (1)(155). <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.014> [in Ukrainian].
- 11 Yamshinsky, M. M., Fedorov, G. E., & Radchenko, K. S. (2015). Heat resistance of heat-resistant steels for extreme conditions. *Bulletin of Donbass State Machine-Building Academy*, (3), 33–37. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddma_2015_3_7 [in Ukrainian].
- 12 Yamshinsky, M. M., & Fedorov, G. E. (2015). Casting and mechanical properties of heat-resistant steels. *Metallurgy and Mechanical Engineering*, (2), 17–24 [in Russian].
- 13 Shalevska, I. A., Doroshenko, V. S., Kalyuzhny, P. B., & Kvasnytska, Y. G. (2022). Review of the application of metal cast materials in the construction of underground and protective structures. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(4)(331), 54–61. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.054> [in Ukrainian].
- 14 DSTU 8781:2018. (2018). Steel castings. General technical specifications [in Ukrainian].
- 15 ISO 4990:2023. (2023). Steel castings — General technical delivery requirements. Retrieved from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/84185/33d9639ba3db417ab01fe2a41751f295/ISO-4990-2023.pdf> [in English].

- 16 DSTU 8901:2019. (2019). Steel and cast iron. Methods for determining phosphorus [in Ukrainian].
- 17 DSTU 9055:2020. (2020). Steel and cast iron. Methods for determining manganese [in Ukrainian].
- 18 DSTU GOST 12345:2004. (2004). (ISO 671:1982, ISO 4935:1989). Alloyed and high-alloy steels. Methods for determining sulfur [in Ukrainian].
- 19 DSTU ISO 148-1:2022. (2022). Metallic materials. Charpy pendulum impact test. Part 1: Test method (ISO 148-1:2016, IDT) [in Ukrainian].
- 20 DSTU 9074:2021. (2021). Steel. Reference microstructures [in Ukrainian].
- 21 DSTU 8966:2019. (2019). Steel. Metallographic methods for determining non-metallic inclusions [in Ukrainian].
- 22 ISO 643:1983. (1983). Steels: Micrographic determination of the ferritic or austenitic grain size. Retrieved from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/4773/6ad7e45fca0d4daa86654405f6e2d12e/ISO-643-1983.pdf> [in English].
- 23 DSTU 7809:2015. (2015). Rolled section, calibrated with special surface treatment from high-quality carbon structural steel. General technical specifications [in Ukrainian].

Received 14.11.2024

O. Shinsky, Dr. Sci. (Engin.) Professor, Department Chair; e-mail: aluprt@ukr.net;
<https://orcid.org/0000-0001-6200-0709>

G. Fedorov, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor; Senior Researcher;
e-mail: odus@ptima.kiev.ua; <https://orcid.org/0009-0006-3284-0137>

I. Kvasnytska, Dr. Sci. (Engin.), Department Chair; e-mail: jul.kvasnitskaya@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

I. Shalevska, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor; Deputy Director
e-mail: innashalevska@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8410-7045>

P. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Deputy Director,
e-mail: kpb.ptima@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1111-4826>

O. Neima, Junior Researcher, e-mail: Neima_Alex@ukr.net;
<http://orcid.org/0000-0001-5438-7253>

A. Shalevskyi, Chief Technologist

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine (Kiev, Ukraine)

SELECTION OF MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF CAST HOLLOW METAL MODULES OF PROTECTIVE STRUCTURES

Ukrainian and global analogs of metal materials used for the production of multi-purpose protective modules by casting methods were analyzed. It has been established that low- and medium-carbon low-alloyed, microalloyed and modified steels can be the most effective and promising for achieving the required physical and mechanical properties among iron-based alloys. These steels must have the following physical and mechanical properties: strength limit from 500 MPa to 950 MPa; yield strength from 450 MPa to 800 MPa, relative shrinkage from 15% to 30%; impact viscosity from 50 J/cm² to 70 J/cm² and foundry properties - fluidity, linear and volumetric shrinkage, crack resistance, etc., which would ensure the production of high-quality thin-walled castings of various dimensions in conditions of large-scale and mass production. Modern methods and devices were used to study the physical and mechanical properties and microstructure of the experimental steels. Taking into account that metal structures for multi-purpose protective structures work under static load conditions, with the aim of minimal energy consumption for their mass or large-scale production, the influence of heat

treatment modes on the physical and mechanical properties of steels was investigated and the most effective of them were determined depending on the operating conditions of cast parts. It was established that among the studied steels, the 35ХГАФЛ (35CrMnAlV) cast steel developed and recommended for the production of thin-walled hollow modules for protective structures by casting according to gasified models has the highest mechanical properties after quenching the products at a temperature of 930 °C in water with subsequent tempering at a temperature of 510 °C. Under this mode of heat treatment, steel acquires the following properties, $\sigma_u = 1150$ MPa, $\sigma_y = 1010$ MPa, $\delta - 16\%$, $\psi - 20\%$, impact toughness (KCU) – 70 J/cm², hardness – 31 HRC. Therefore, the recommended 35ХГАФЛ (35CrMnAlV) cast steel has physical and mechanical properties that far exceed those required for alloys used in the production of elements of protective structures.

Keywords: reinforced steel casting, lost foam casting, thin-walled cast modules, gasified model casting, microalloying, modification, prototype

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу прохання при подачі статей користуватися сайтом <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Для спілкування з редакцією та подання статей у перехідний період користуйтеся тільки **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»