

<https://doi.org/10.15407/plit2025.04.022>

УДК 621.74.002.6:669.131.6

В.В. Кудін*, канд. техн. наук, доц.; e-mail: kudin@zp.edu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-8553-6685>

В.М. Сажнев*, канд. техн. наук, доц.; e-mail: sajhnev@zp.edu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-2095-4958>

Є.М. Парахневич*, канд. техн. наук, доц.; e-mail: g1028913@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-6674-5609>

В.Г. Єфременко,****, докт. техн. наук., проф.;

e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-0657-4510>

М.О. Кармазін*, аспірант; e-mail: maksimkarmazin604@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0003-6018-9108>

О.М. Шалдін*, аспірант; e-mail: o.shaldin@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0009-3895-0769>

* Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

** ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (Дніпро, Україна)

*** Institute of Materials Research, Slovak Academy of Science (Košice, Slovakia)

ПОЛІПШЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ ЛЕГУВАННЯМ ВАНАДІЄМ

Досліджено вплив легування ванадієм аустенітної високомарганцевої сталі 110Г13Л на формування структури та якості виливків, щільність металу, стан неметалевих включень та механічні властивості. Описано вплив термічного оброблення виливків на механічні властивості високомарганцевої сталі із ванадієм з урахуванням особливостей і тривалості витримки при гартуванні. Встановлено, що в сталі, крім основних карбідних та фосфідних фаз, формуються додаткові фази, збагачені ванадієм. Аналіз показав, що 70–80 % ванадію міститься в твердому розчині і лише 7–8% — в карбідах, що зумовлює зміцнення аустеніту. Легування ванадієм сприяло подрібненню зерен за рахунок утворення нітридів та карбонітридів, які слугували зародками зерен та формували дрібнозернисту структуру аустеніту. Завдяки цьому зменшувалась міжкристалічна порожнистість та підвищувалась щільність сталі. Досліджено вплив легування ванадієм на індекс забрудненості високомарганцевої сталі неметалевими включеннями (окисульфідами, силкатами, нітридами, карбонітридами, оксидами, шпінеллю). Встановлено, що для поліпшення механічних властивостей тривалість витримки при температурі 1050 °С необхідно збільшити на 25–30 %, що сприяє подрібненню карбідів ванадію. Легування ванадієм та оптимальний режим термічної обробки виливків дозволили суттєво

підвищити міцність, пластичність та ударну в'язкість сталі. При вмісті ванадію 0,15–0,30 % було отримано найвищі механічні характеристики виливків, при цьому приріст межі міцності, ударної в'язкості, відносного подовження і звуження склав 5 %, 70 %, та 45–50 %, відповідно. Подальше збільшення кількості ванадію призводило до погіршення механічних властивостей. Легування ванадієм також підвищувало механічні характеристики високомарганцевої сталі з високим вмістом фосфору (до 0,12 %) за рахунок утворення дрібнодисперсних включень карбонітридів ванадію, які були додатковими центрами кристалізації та подрібнювали аустенітне зерно. Протяжність границь зерен зростала і включення фосфідної евтектики розподілялися на більшій довжині, завдяки чому відбувалося очищення границь зерен, що сприяло підвищенню міцності та енергоємності руйнування виливків.

Ключові слова: високомарганцева сталь, ванадій, термічна обробка, мікроструктура, неметалеві включення, механічні властивості.

Вступ

Серед багатьох марок сталей, які застосовуються для виробництва фасонного лиття, високомарганцева сталь аустенітного класу типу 110Г13Л посідає особливе місце за експлуатаційними властивостями [1]. Співвідношення ударної в'язкості та здатності до наклепу з високою зносостійкістю забезпечили широке застосування виливків із цієї сталі в машинобудуванні, металургійній, будівельній галузях промисловості, для деталей гірничозбагачувального обладнання [2], сільськогосподарської техніки, залізничного транспорту [3] тощо. Із сталі виготовляють конуси і щоки дробарок, футеровки кульових млинів, зуб'я ковшів екскаваторів, гусеничні траки, залізничні стрілки та багато інших виробів. Виливки зі сталі 110Г13Л піддають гартуванню для збільшення механічних властивостей та зносостійкості деталей [4]. Гартування сталі 110Г13Л повинно відбуватися рівномірно. Чим більше вуглецю і легуючих елементів містить сталь, чим масивніша виливка і складніша її форма, тим повільнішою має бути швидкість нагрівання під гартування. Охолодження є важливою операцією гартування сталі, оскільки від нього залежить отримання необхідної структури металу [5]. Для цього має бути достатня кількість охолоджувальної води (в 10 разів більше, ніж об'єм виливків), щоб температура під час перебування в ній виливків підвищувалася незначною мірою.

Якість високомарганцевої сталі визначається її зносостійкістю в умовах стирання та ударних навантажень, тому необхідний альтернативний підхід з урахуванням умов експлуатації кожного типу виливків [6]. При цьому треба враховувати, що значна частина деталей зі сталі 110Г13Л передчасно виходить із ладу через поломки [7], тому експлуатаційна довговічність виливків частіше визначається їх фізико-механічних властивостями, а не зносостійкістю [8]. Незважаючи на багатолітній досвід виробництва високомарганцевої сталі, численні дослідження впливу різних факторів на комплекс її властивостей [9, 10], питання підвищення якості сталевих виливків зберігають свою актуальність [11]. Навіть однотипні виливки з цієї сталі [12] в практично однакових умовах експлуатації відрізняються між собою за стійкістю [13, 14] (терміном експлуатації) в 2–5 разів [15]. Цей факт свідчить про те, що резерви покращення якості високомарганцевої сталі залишаються ще далеко не вичерпаними. Одним із головних напрямків підвищення якості виливків із високомарганцевої сталі є застосування раціонального легування і модифікування [16] та оптимальної термічної обробки [17]. Саме цим питанням присвячена дана робота, у якій досліджено вплив ванадію на структуру та механічні властивості виливків зі сталі 110Г13Л.

Матеріали та методи

У даній роботі вивчали вплив легування ванадієм на структуру та властивості виливків із високомарганцевої сталі 110Г13Л, а також вдосконалювали режим термічної обробки. Сталь виплавляли на ливарному підприємстві в електродуговій печі ДСП-1,5. Після розплавлення шихти, рідкий метал нагрівали до 1600 °С, при цьому температуру контролювали вольфрам-молібденовою термopарою. Для легування сталі використовували ферованадій марки FeV80. Перед випуском рідкого металу

при температурі $1580 \pm 1067^\circ\text{C}$ в піч присаджували ферованадій у різній кількості та витримували 10–15 хв у печі. При температурі 1550°C метал дослідних плавок фракційно розливали в спеціально розроблені форми із отриманням зразків для механічних випробувань та дослідження мікроструктури (рис. 1). Базовий хімічний склад сталі 110Г13Л, згідно з ДСТУ 8781:2018 [18], становив: 0,9–1,5 % С; 11,5–15,0 % Мп; 0,3–1,0 % Si; $\leq 0,05$ % S; $\leq 0,12$ % P. Вміст ванадію у виливках варіювався в межах від 0,05 % до 0,8 %. Індекс забрудненості сталі неметалевими включеннями, їх розміри та морфологію визначали за ДСТУ 8966:2019, використовуючи лінійний метод [19].

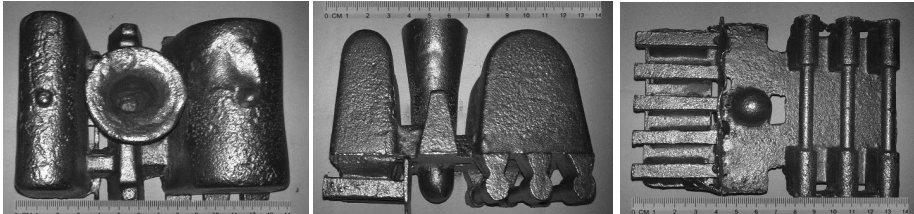


Рис. 1. Виливки високомарганцевої сталі 110Г13Л для визначення фізико-механічних властивостей та дослідження мікроструктури

Термічну обробку зразків проводили в електричній лабораторній печі за режимом: нагрів до 1050°C , витримка до 240 хв та охолодження у воді (20°C). Нагріті зразки швидко занурювали у воду та охолоджували до досягнення ними середньомасової температури $300\text{--}350^\circ\text{C}$, після чого продовжували охолодження на спокійному повітрі. З одержаних виливків виготовляли зразки для визначення фізико-механічних властивостей та дослідження мікроструктури сталі. Випробування на механічні властивості проводили за вимогами DIN EN ISO 6892-1 при температурі 20°C на розривній машині WDW-600E з електронним силовимірювачем [20, 21].

Мікроструктуру сталі досліджували на оптичному мікроскопі NEOPHOT 32 та електронного мікроскопу JEOL JSM-IT810. Фазовий хімічний склад визначали електронно-зондовим мікроаналізатором JEOL JXA-8230 [22]. Дослідження структури виливків проводили на литих і термічно оброблених зразках після травлення в розчині азотної кислоти [23].

Результати дослідження

У сталі, легованої ванадієм, крім основної карбідної та фосфідної фаз, відбувалося утворення додаткової фази, збагаченої ванадієм. Ця фаза була присутня у вигляді округлих або кутастих часток розміром від 0,05 мкм до 10 мкм, розташованих як усередині зерен, так і по границях зерен. Кількісний аналіз карбідного осаду загартованих зразків показав, що 70–80 % ванадію містився в твердому розчині і 7–8 % в карбідах. Такий міжфазний розподіл ванадію в сталі зумовлює твердорозчинне зміцнення аустеніту.

Ванадій має високу хімічну спорідненість до азоту. Металографічні дослідження показали наявність на шліфах блідо-рожеві кристалів нітриду ванадію та золотисто-рожевих із червонуватим відтінком карбонітрідів ванадію. Ці включення зазвичай розташовувалися ізольовано або групами всередині зерен аустеніту. Карбонітриди ванадію, маючи високу температуру дисоціації, при кристалізації першими виділяються із рідини, слугуючи зародками дендритів аустеніту (рис. 2, а).

Це дозволяє вважати, що ванадій регулює процеси кристалізації сталі та ефективно подрібнює аустенітне зерно. Завдяки цьому зростала протяжність границь зерен аустеніту і включення фосфідної евтектики розподілялися на більшій довжині (рис. 2, б). Встановлено, що ванадій, сприяючи формуванню рівновісної дрібнозернистої будови аустеніту, підвищує щільність сталі за рахунок зменшення міжкристалітної пористості (рис. 2, в). При підвищенні концентрації ванадію до 0,24 % щільність сталі збільшувалась з 7783 кг/м^3 до 7807 кг/м^3 ; при подальшому підвищенні

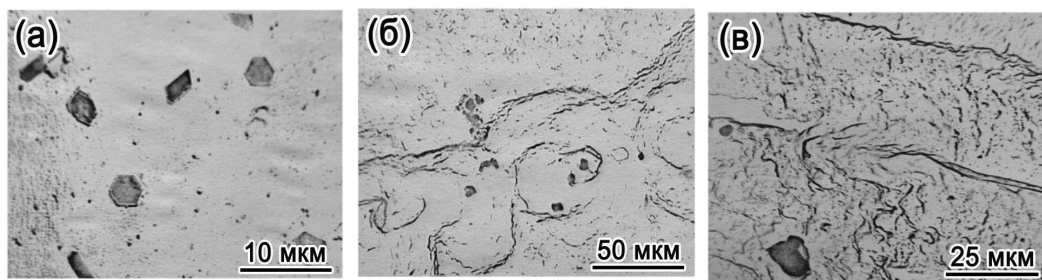


Рис. 2. Мікроструктура сталі 110Г13Л легованої ванадієм: а — включення оксидів, нітридів, карбонітридів; б — протяжність границь зерен; в — структура аустеніту

вмісту ванадію щільність сталі ставала нижчою за щільність серійної сталі. Можна припустити, що причиною цього є поява неметалевих включень евтектичного типу, які були виявлені на шліфах при металографічних дослідженнях. Результати дослідження мікроструктури та фізичних властивостей наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вплив ванадію на зеренну структуру та щільність сталі 110Г13Л

Вміст ванадію, %	0	0,18	0,24	0,34	0,44	0,80
Довжина границь зерен, мм/мм ²	20,0	25,7	28,24	33,2	35,0	36,4
Щільність, кг/м ³	7783	7803	7807	7800	7778	7730

Індекс забрудненості сталі [19] залежить від кількості присадок ванадію. При вмісті ванадію до 0,24 % індекс забрудненості сталі збільшувався за рахунок нітридів і карбонітридів ванадію. При більш високих концентраціях ванадію збільшення індексу забрудненості відбувалось в основному за рахунок утворення в сталі оксидів та шпінелі ванадію (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив ванадію на індекс забрудненості сталі 110Г13Л неметалевими включеннями

Вміст ванадію, %	Індекс забрудненості, $I 2 \times 10^3$			
	Загальний	Оксисульфіді і силкати	Нітриди і карбонітриди	Оксиди і шпінель
0	0,420	0,420	—	—
0,18	0,620	0,186	0,483	0,021
0,24	0,996	0,179	0,787	0,030
0,44	3,874	0,170	1,292	2,412
0,71	17,740	0,172	3,548	14,020
0,80	25,000	0,169	5,000	19,831

Встановлено, що ванадій, як сильний карбідоутворюючий елемент, присутній в загартованій високомарганцевій сталі у вигляді карбідів типу VC і V₂C (7–8 %), в у нітридах і карбонітридах типу VN, V₂N і V(CN) (до 7 %), а також у різного роду оксидах і шпінелі типу V₂O₃, V₂O₅, FeO·V₂O₃ (рис. 3); при цьому більша частина ванадію (70–80 %) знаходиться міститься в аустеніті у розчиненому стані [24, 25]. Вплив ванадію на подрібнення структури пов'язаний із зародковою дією карбідних, нітридних і оксидних включень.

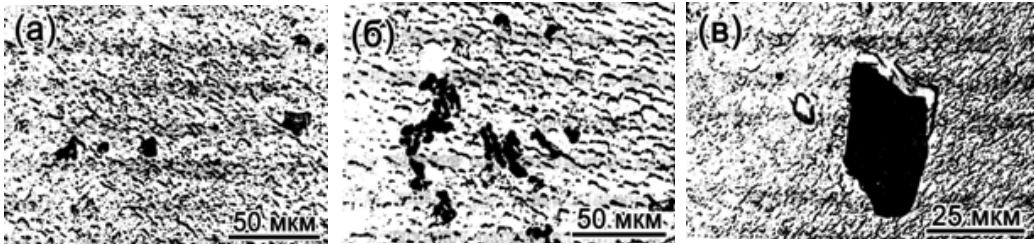


Рис. 3. Неметалеві включення оксидів, нітридів, карбонітридів та шпінелі у високомарганцевій сталі 110Г13Л при різному вмісті ванадію: а — 0,24 %; б — 0,44 %; в — 0,80 %

У роботі досліджено вплив термічної обробки на структуру та властивості сокомарганцевої сталі легованої ванадієм. Для кожної партії зразків з різним вмістом ванадію підбирали оптимальний режим термічної обробки. Зразки для механічних випробувань завантажували в піч, нагрівали до 1050 °С, витримували від 15 до 240 хв і гартували у холодній воді. Експерименти показали, що для поліпшення механічних властивостей орієнтовно прийнятий час витримки (90 хв) при температурі гартування 1050 °С необхідно збільшити на 25–30 %, тобто приблизно до 120 хв. Установлено, що збільшення часу витримки сприяло подрібненню карбідів ванадію, які при оптимальній витримці не виявлялись в структурі під оптичним мікроскопом завдяки їх малому розміру. Виливки із високомарганцевої сталі, що вміщували більше 0,6 % ванадію, при витримці впродовж 240 хв містили велику кількість карбідів та мали знижені механічні властивості та ударну в'язкість сталі (рис. 4).

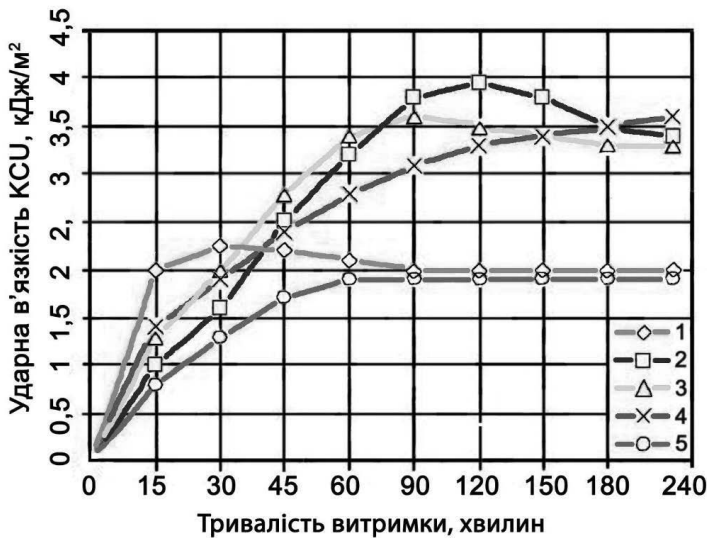


Рис. 4. Вплив тривалості витримки при 1050 °С на ударну в'язкість гартованої сталі 110Г13Л при різному вмісті ванадію: 1 — 0 %; 2 — 0,18 %; 3 — 0,24–0,34 %; 4 — 0,44 %; 5 — 0,7–0,8 %

Введення ванадію разом із застосуванням оптимального режиму термічної обробки виливків дозволило суттєво підвищити показники міцності, пластичності та ударної в'язкості сталі 110Г13Л. Найкращі механічні характеристики відповідали вмісту ванадію в кількості 0,15–0,30 %, що забезпечувало зростання межі міцності на 5 %, ударної в'язкості — на 70 %, відносного подовження та звуження — на 45–50%. При подальшому підвищенні вмісту ванадію механічні властивості сталі поступово погіршувались (рис. 5).

Причиною зниження механічних властивостей сталі були неметалеві включення оксидів та шпінелі, кількість яких зростав у міру підвищення вмісту ванадію. При

збільшенні концентрації ванадію з 0,24 % до 0,80 % індекс забрудненості неметалевими включеннями зріс у 5 разів, відповідно, знизилась механічні властивості сталі: межа міцності — з 850 МПа до 800 МПа; ударна в'язкість — з 3,4 кДж/м² до 2,5 кДж/м²; відносне подовження — з 45 % до 30 %; відносне звуження — з 38 % до 20 % (рис. 5).

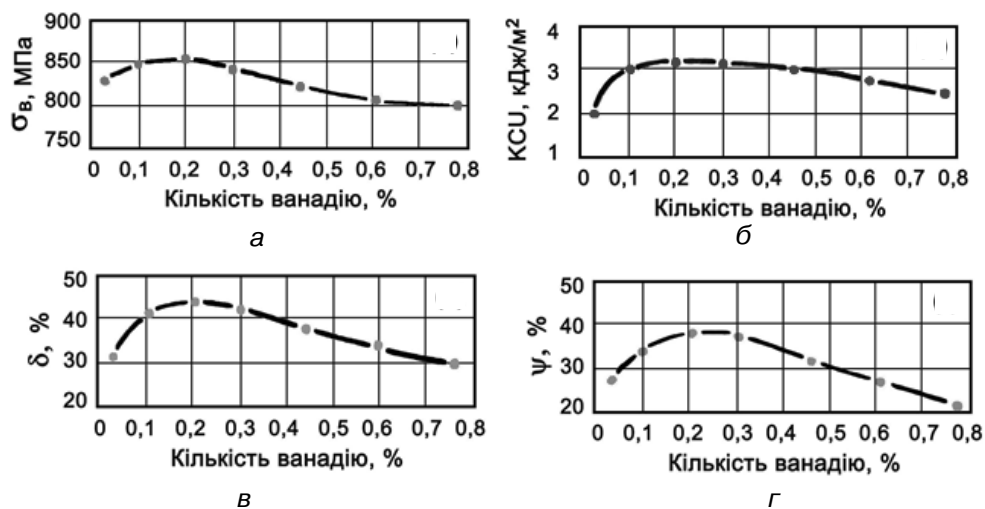


Рис. 5. Вплив кількості ванадію на механічні властивості сталі 110Г13Л: а — межа міцності; б — ударна в'язкість; в — відносне подовження; г — відносне звуження

Окрім отриманих результатів, вдалося встановити, що легування ванадієм сприяло значному підвищенню механічних характеристик високомарганцевої сталі із підвищеним вмістом фосфору (до 0,12 %) [26]. Пояснюється це утворенням великої кількості дрібнодисперсних включень карбонітридів ванадію, які виступали додатковими центрами кристалізації, що подрібнювали аустенітне зерно. Протяжність границь зерен при цьому різко зростала і включення фосфідної евтектики розподілялися на більшій довжині. Таким чином, відбувалося очищення границь зерен, що сприяло підвищенню міцності та енергоємності руйнування сталі.

Висновки

Введення ванадію в кількості 0,15–0,3 % забезпечує покращення мікроструктури високомарганцевої сталі 110Г13Л за рахунок подрібнення аустенітного зерна, підвищення щільності сталі, зниження концентрації включень фосфідної евтектики по границях зерен. Поєднання легування ванадієм із оптимальним режимом термічної обробки (нагрів до 1050 °С, витримка до 120 хв, гартування у воді) забезпечило підвищення механічних властивостей виливків, особливо ударної в'язкості (на 70 %) та показників пластичності (на 45–50 %). Підвищення вмісту ванадію вище вказаного інтервалу викликає зниження механічних властивостей внаслідок різкого зростання забруднення сталі неметалевими включеннями.

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 Snizhnoi, H., Sazhnev, V., Snizhnoi, V., Mukhachev, A. (2024). Details of mining beneficiation equipment made of medium manganese wear-resistant steel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012027>.
- 3 Сажнів, В.М., Сніжною, Г.В. (2023). Вплив технологічних параметрів на фізико-механічні і експлуатаційні властивості зносостійкої аустенітної високомарганцевої криці. *Металофізика та новітні технології*, 45 (4), 503–522. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.04.0503>.

- 4 Бестужев, А.М., Ліберг, І.Г., Розум, В.А., Чернявський, М.В. (2019). Шляхи підвищення механічних властивостей високомарганцевої сталі 110Г13Л. ІТБ «Лиття України», 4 (224), 17–23. <https://lityo.com.ua>.
- 5 Narivskiy, A., Shinsky, O., Shalevska, I., Kvasnitska, Y., Kaliuzhnyi, P., Polyvoda, S. (2023). 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>.
- 6 Zurnadzhly, V., Efremenko, V., Petryshynets, I., Dabalà, M., Franceschi, M., Wu, K., Kováč, F., Chabak, Y., Puchy, V., Brykov, M. (2022). Alternative Approach for the Intercritical Annealing of (Cr, Mo, V)-Alloyed TRIP-Assisted Steel before Austempering. *Metals*, 12 (11) 1814. <https://doi.org/10.3390/met12111814>.
- 7 Федоров, Г.Є., Ямшинський, М.М., Платонов, Е.А., Лютий, Р.В. (2013). Стальне лиття: Монографія. Київ: НТУУ «КПІ», ПАТ «Віпол», 896 с. ISBN 978-966-646-130-1.
- 8 Kondratyuk, S.Ye., Veis, V.I., Parkhomchuk, Z.V., Kvasnytska, Y.H., Kvasnytska, K.H. (2023). Thermokinetic parameters of solidification and gradient structure of steel castings. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 45 (7), 865–872 <https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0865>.
- 9 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>.
- 10 Steel castings — General technical delivery requirements. ISO 4990:2023 <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/84185/33d9639ba3db417ab01fe2a41751f295/ISO-4990-2023.pdf>.
- 11 Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Berlizeva, T., Grimzin, I., Lysenko, T. (2022). A Method for Calculating the Strength Performance of Cast Parts. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes IV. Inter Partner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. September 6–9, Odessa, Ukraine, 473–481. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_45.
- 12 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>.
- 13 Шалевська, І.А., Дорошенко, В.С., Калюжний, П.Б., Квасницька, Ю.Г. (2022). Огляд застосування металевих литих матеріалів у будівництві підземних та захисних споруд. *Метал і лиття України*, 30 (4) (331), 54–61. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.04.054>.
- 14 Лисенко, Т.В., Пономаренко, О.І., Доценко, В.П. та ін. (2014). Теоретичні основи формування виливків: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 191 с. ISBN 978-617-05-0118-9.
- 15 Zurnadzhly, V., Stavrovskaya, V., Chabak, Y., Petryshynets, I., Efremenko, B., Wu, K., Efremenko, V., Brykov, M. (2024). Enhancing the tensile properties and ductile-brittle transition behavior of the EN S355 grade rolled steel via cost-saving processing routes. *Materials*, 2024, 17 (9) 1958. <https://doi.org/10.3390/ma17091958>.
- 16 Шипицин, С.Я., Федоров, Г.Є., Кірчу, І.Ф., Лиховой, Д.І., Степанова, Т.В. (2024). Підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей високомарганцевих сталей удосконаленням технологічних процесів їх плавлення, мікролегування та модифікування. *Процеси лиття*, 1 (155), 14–28. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.014>.
- 17 Сажнев, В.М., Сніжної, Г.В. (2024). Поліпшення властивостей високоманганових криць методами термічного оброблення. *Металофізика та новітні технології*, 46 (11), 1111–1124. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.11.1111>.
- 18 ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови.
- 19 ДСТУ 8966:2019. Сталь. Металографічні методи визначення неметалевих включень.

- 20 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).
- 21 ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Ч. 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).
- 22 Satoshi Notoya. (2017). Development of a New Field Emission Electron Probe Microanalyzer JXA-8530 Plus. Jeol News, 52 (1), 58–60. ISSN 1349-6832.
- 23 ДСТУ 9074:2021. Сталь. Еталони мікроструктури.
- 24 ДСТУ 9055:2020. Сталь та чавун. Методи визначення марганцю.
- 25 ДСТУ ГОСТ 12345:2004 (ISO 671:1982, ISO 4935:1989). Сталі леговані та високолеговані. Методи визначення сірки.
- 26 ДСТУ 8901:2019. Сталь та чавун. Методи визначення фосфору.

Налійшла 30.06.2025

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> [in English].
- 2 Snizhnoi, H., Sazhnev, V., Snizhnoi, V., Mukhachev, A. (2024). Details of mining beneficiation equipment made of medium manganese wear-resistant steel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348, 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012027> [in English].
- 3 Sazhnev, V.M., Snizhnoy, H.V. (2023). Influence of Technological Parameters on the Physical, Mechanical and Operational Properties of Wear-Resistant Austenitic High-Manganese Steel. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*, 45 (4), 503–522. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.04.0503> [in Ukrainian].
- 4 Bestuzhev, A.M., Liberg, I.G., Rozum, V.A., Chernyavsky, M.V. (2019). Ways to improve the mechanical properties of high-manganese steel 110G13L. ITB «Casting of Ukraine», 4 (224), 17–23. <https://lityo.com.ua> [in Ukrainian].
- 5 Narivskiy, A., Shinsky, O., Shalevska, I., Kvasnitska, Y., Kaliuzhnyi, P., Polyvoda, S. (2023). 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). [in English].
- 6 Zurnadzhly, V., Efremenko, V., Petryshynets, I., Dabalà, M., Franceschi, M., Wu, K., Kováč, F., Chabak, Y., Puchy, V., Brykov, M. (2022). Alternative Approach for the Intercritical Annealing of (Cr, Mo, V)-Alloyed TRIP-Assisted Steel before Austempering. *Metals*, 12 (11) 1814. <https://doi.org/10.3390/met12111814> [in English].
- 7 Fedorov, G.Ye., Yamshinsky, M.M., Platonov, E.A., Lyuty, R.V. (2013). Steel casting: Monograph. Kyiv: NTUU «KPI», PJSC «Vipol», 896 p. ISBN 978-966-646-130-1. [in Ukrainian].
- 8 Kondratyuk, S.Ye., 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 <https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0865> [in English].
- 9 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].
- 10 ISO 4990:2023. Steel castings – General technical delivery requirements. Retrieved from

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/84185/33d9639ba3db417ab01fe2a41751f295/ISO-4990-2023.pdf> [in English].

- 11 Ponomarenko, O., Yevtushenko, N., Berlizieva, T., Grimzin, I., Lysenko, T. (2022). A Method for Calculating the Strength Performance of Cast Parts. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes IV. Inter Partner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. September 6–9, Odessa, Ukraine, 473–481. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_45 [in English].
- 12 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].
- 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 Lysenko, T.V., Ponomarenko, O.I., Dotsenko, V.P., and others (2014). *Theoretical foundations of casting formation: a textbook*. Kharkiv: NTU «KhPI», 191 p. ISBN 978-617-05-0118-9. [in Ukrainian].
- 15 Zurnadzy, V., Stavrovskaya, V., Chabak, Y., Petryshynets, I., Efremenko, B., Wu, K., Efremenko, V., Brykov, M. (2024). Enhancing the tensile properties and ductile-brittle transition behavior of the EN S355 grade rolled steel via cost-saving processing routes. *Materials*, 17 (9) 1958. <https://doi.org/10.3390/ma17091958> [in English].
- 16 Shypytsyn, S.Y., Fedorov, G.Ye., Kirchu, I.F., Likhovey, D.I., Stepanova, T.V. (2024). Increasing the physical-mechanical and operational properties of high manganese steels by improving the technological processes of their melting, micro-alloying and modification. *Casting processes*, 1 (155), 14–28. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.014> [in Ukrainian].
- 17 Sazhnev, V.M., Snizhnoy, H.V. (2024). Improving the properties of high-manganese alloys by heat treatment methods. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 46 (11), 1111–1124. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.11.1111> [in Ukrainian].
- 18 DSTU 8781:2018. Steel castings. General technical specifications [in Ukrainian].
- 19 DSTU 8966:2019. Steel. Metallographic methods for determining non-metallic inclusions [in Ukrainian].
- 20 DSTU ISO 148-1:2022. Metallic materials. Charpy impact bending test on a pendulum impactor. Part 1: Test method (ISO 148-1:2016, IDT) [in Ukrainian].
- 21 DSTU ISO 6892-1:2019 Metallic materials. Tensile testing. Part 1. Test method at room temperature (ISO 6892-1:2016, IDT) [in Ukrainian].
- 22 Satoshi Notoya. (2017). Development of a New Field Emission Electron Probe Microanalyzer JXA-8530 Plus. *Jeol News*, 52 (1), 58-60. ISSN 1349-6832 [in English].
- 23 DSTU 9074:2021. Steel. Reference microstructures [in Ukrainian].
- 24 DSTU 8966:2019. Steel. Metallographic methods for determining non-metallic inclusions [in Ukrainian]. DSTU 9055:2020. Steel and cast iron. Methods for determining manganese [in Ukrainian].
- 25 DSTU GOST 12345:2004. (ISO 671:1982, ISO 4935:1989). Alloyed and high-alloy steels. Methods for determining sulfur [in Ukrainian].
- 26 DSTU 8901:2019. Steel and cast iron. Methods for determining phosphorus [in Ukrainian].

Received 30.06.2025

V.V. Kudin*, PhD (Engin); e-mail: kudin@zp.edu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-8553-6685>

V.N. Sazhnev*, PhD (Engin); e-mail: sazhnev@zp.edu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-2095-4958>

Ye.M. Parahnevich*, PhD (Engin); e-mail: g1028913@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-6674-5609>

V.G. Efremenko,****, Dr. Sci. (Engin) Professor; e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu;

<https://orcid.org/0000-0002-0657-4510>

M.O. Karmazin*, PhD student; e-mail: maksimkarmazin604@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0003-6018-9108>

O.M. Shaldin*, PhD student; e-mail: o.shaldin@gmail.com;

<https://orcid.org/0009-0009-3895-0769>

* National University Zaporizhzhia Polytechnic (Zaporizhzhia, Ukraine)

**Pryazovskyi State Technical University (Dnipro, Ukraine)

***Institute of Materials Research, Slovak Academy of Science (Košice, Slovakia)

IMPROVEMENT OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-MANGANESE STEEL BY ALLOYING WITH VANADIUM

The effect of vanadium alloying of austenitic high-manganese steel 110G13L on the formation of the structure and quality of castings, metal density, state of non-metallic inclusions and mechanical properties was investigated. The effect of heat treatment of castings on the mechanical properties of high-manganese steel with vanadium is described, taking into account the features and duration of the quenching treatment. It was established that in the steel, in addition to the main carbide and phosphide phases, additional phases enriched with vanadium are formed. The analysis showed that 70-80% of vanadium is in solid solution and only 7-8% in carbides, which causes the strengthening of austenite. Vanadium alloying contributed to grain refinement due to the formation of nitrides and carbonitrides, which served as grain nuclei and formed a fine-grained structure of austenite. Due to this, the intercrystalline voids decreased and the density of the steel increased. The effect of vanadium alloying on the index of contamination of high-manganese steel with non-metallic inclusions (oxysulfides, silicates, nitrides, carbonitrides, oxides, spinel) was studied. It was established that to improve the mechanical properties, the holding time at a temperature of 1050 C should be increased by 25-30%, which contributes to the grinding of vanadium carbides. Vanadium alloying and the optimal heat treatment regime of castings allowed to significantly increase the strength, ductility and impact toughness of steel. At a vanadium content of 0.15-0.30%, the highest mechanical characteristics of castings were obtained, while the increase in the tensile strength, impact toughness, relative elongation and narrowing was 5%, 70%, and 45-50%, respectively. Further increase in the amount of vanadium led to a deterioration in mechanical properties. Vanadium alloying also increased the mechanical characteristics of high-manganese steel with a high phosphorus content (up to 0.12%) due to the formation of finely dispersed inclusions of vanadium carbonitrides, which were additional crystallization centers and crushed the austenite grain. The length of the grain boundaries increased and the inclusions of the phosphide eutectic were distributed over a longer length, due to which the grain boundaries were cleaned, which contributed to an increase in the strength and energy intensity of the fracture of the castings.

Keywords: high-manganese steel, vanadium, heat treatment, microstructure, non-metallic inclusions, mechanical properties.