
ОДЕРЖАННЯ ТА ОБРОБКА РОЗПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2024.03.003>

УДК 669.14.018.298:621.789

А.Ю. Семенко, канд. техн. наук, старш. досл., старш. наук. співроб.;
e-mail: semenko.au@gmail.com; ORCID 0000-0002-0448-1636

Ж.В. Пархомчук, канд. техн. наук, старш. досл., старш. наук. співроб.;
e-mail: zhanna_parkhomchuk@ukr.net; ORCID 0000-0002-3026-8951

В.І. Вейс, д-р філос., наук. співроб.; e-mail: valentyneis@gmail.com;
ORCID 0000-0001-8889-2303

Р.Ф. Ліхацький, д-р філос., мол. наук. співроб.;
e-mail: richard.kpi@outlook.com; ORCID 0000-0001-8277-5122

І.Ф. Ліхацький, аспірант; e-mail: LikhatskiyIF@nas.gov.ua;
ORCID 0000-0002-2069-5255

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІНДУКЦІЙНОЇ ВИПЛАВКИ АНSS TWIP-СТАЛІ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ МАРГАНЦЮ ТА АЛЮМІНІЮ

АНSS-сталі є новим класом матеріалів, які застосовуються в найбільш високотехнологічних та відповідальних сферах промисловості. До них належать декілька підкласів сталей, серед яких найскладнішими в одержанні є TWIP-сталі з високим вмістом марганцю та алюмінію. Це пов'язано головним чином із ліквідаційними явищами та помітним шлакоутворенням, яке сприяє непропорційним змінам хімічного складу розплаву. У роботі здійснено аналіз серії дослідних плавок сталей із вмістом марганцю 28–38 % мас. та алюмінію — 10–20 % мас. та вивчено вплив хімічного складу шихти й часу виплавки сплавів на втрати маси розплаву через утворення шлаку та гомогенність хімічного складу одержаних виливків. Метал переплавляли в індукційній печі, а одержаний розплав заливали в піщано-глинисту форму. Показано, що збільшення вмісту марганцю та феромарганцю в складі шихти не є основною причиною збільшення кількості шлаку в розплаві, що, ймовірно, залежить від чистоти та дисперсності шихтових матеріалів. Зменшення кількості алюмінію в розплаві дещо збільшує кількість одержаного при плавці шлаку. Разом із тим чим менший вміст алюмінію — тим одноріднішим є хімічний склад. Тривалість виплавки розплавів експериментальних сплавів грає малопомітну роль у шлакоутворенні, проте явно позитивно впливає на гомогенізацію хімічного складу розплаву. Для всіх плавок кількість утвореного шлаку складала 14–18 % від початкової маси шихти. При цьому середній вміст марганцю в сплавах знижувався на 5–10 %, за рахунок чого залишався незмінним або збільшувався на ~5–10 % від початкового вмісту алюмінію.

Ключові слова: TWIP-сталі, високомарганцеві сталі, індукційна виплавка, шлакоутворення, угар.

Останнім часом увага дослідників сконцентрована на AHSS-сталях системи Fe–Mn–Al–C, що обґрунтовано їх низькою густиною та підвищеними міцністю й пластичністю. Особливої уваги заслуговує їх вид — TWIP-сталі системи Fe–Mn–Al–C, які належать до перспективних конструкційних матеріалів завдяки високій технологічності та комплексу механічних властивостей [1, 2]. Однією з основних переваг вказаного типу сплавів є його висока питома міцність, безпосередньо зумовлена не лише показниками міцності, але й суттєво нижчою, порівняно зі звичайними сталями, густиною, яка може перебувати на рівні 6–7,2 г/см³, тобто нижче густини більшості сталей на значення до 23 %. Така особливість пов'язана з високим вмістом у складі сталей алюмінію, на рівні до 12–15 % мас. [2, 3]. До інших елементів із низькою густиною, які можуть входити до складу TWIP-сталей, належать кремній і титан, але їх сумарний вміст зазвичай не перевищує 1,5 % мас. [4, 5].

Одержання TWIP-сталей із високим вмістом алюмінію залишається складним завданням через схильність до утворення в злитках і виливках ліквацій за густиною. Як під час приготування розплаву, так і під час його заливання у форму та подальшого в ній розподілення алюмінію в більшості випадків не засвоюється. Одним із дієвих технологічних прийомів для нівелювання цього явища може бути перегрів розплаву, але це одночасно призводить до збільшення кількості шлаку та зміни хімічного складу сплаву. Іншим ефективним технологічним прийомом для збільшення рівномірності розподілу алюмінію в розплаві всередині ливарної форми може стати примусове перемішування завдяки конфігурації ливникової системи.

У тиглі або розливному ковші алюміній буде перебувати у верхніх шарах розплаву і навіть після механічного перемішування рідкого металу він частково спливатиме протягом короткого часу. Таким чином, після перемішування й заливання розплаву з достатньою інтенсивністю перша порція, яка потрапляє у форму, зазвичай має вищу концентрацію алюмінію.

Іншою важливою проблемою для одержання з TWIP-сталей якісних злитків і виливків є високий вміст марганцю. Цей елемент виконує розкислюючу дію та зв'язує сірку, але також сприяє утворенню великої кількості шлаку, що негативно впливає на відповідність хімічного складу одержуваних сплавів.

Метою роботи було визначення впливу складу шихти й технологічних особливостей виплавки сталей із високим вмістом марганцю та алюмінію на їх кінцевий хімічний склад та розподіл легуючих елементів. Під час проведення дослідних плавок орієнтувались на сталі складу Fe–(28–38)Mn–(10–20)Al–(0,8–1,4) C. Як шихту використовували ділові відходи й заготовки сталі 45, відходи сталі Ст3, марганець марки Mn98, феромарганець ФМн78 та алюміній А95.

Дослідні злитки одержували в лабораторній індукційній печі з робочим простором у вигляді алундового тигля, у якому готувалось до 2,5 кг розплаву. Плавки починали з розплавлення сталевий частини шихти. Далі поступово невеликими порціями додавали марганець і феромарганець у 3–4 етапи. Обов'язковою умовою їх уведення було знаходження рідкого, не підмороженого металу в тиглі. Алюміній вводили після першого та перед останнім етапом введення марганець-вмісної шихти. Розплав перемішували кварцевою трубкою. При досягненні температури заливання розплаву 1550 °С з поверхні рідкометалевої ванни знімали шлак, повторно вимірювали температуру та заливали метал у піщано-глинисту форму. Зовнішній вигляд технологічного обладнання та експериментальних виливків показано на рис. 1.

Під час проведення експериментів було одержано шість виливків різного хімічного складу. Вони також відрізнялися за масою, до 25 %, та часом виплавки. У процесі приготування розплаву використовували різне співвідношення шихтових матеріалів, зокрема феромарганцю, після введення якого збільшувалась кількість шлаку на поверхні розплаву. Передбачалось, що чисті марганець та алюміній також впливали на шлакоутворення, від чого, врешті-решт, змінювалось і кінцеве співвідношення



Рис. 1. Індукційна лабораторна піч, ливарні форми та одержаний виливок (зліва направо). На виливку колами позначено місця, у яких аналізували хімічний склад

компонентів розплаву та хімічний склад виливків. Останній визначали методом рентгено-флуоресцентного аналізу із семи різних ділянок кожного злитка.

Для аналізу особливостей приготування розплавів описаних вище сталей було обрано чотири основні фактори: загальний вміст марганцю у шихті, відсоток феро-марганцю відносно загальної маси шихти, вміст алюмінію та час виплавки. Значення останнього фактора відповідало періоду часу від моменту розплавлення залізної шихти до заливання рідкого металу у форму. За відгук було обрано втрату маси розплаву (через шлакоутворення) відносно початкової маси шихти. Другим відгуком був умовний ступінь рівномірності хімічного складу за десятибальною шкалою, де 0 — різко нерівномірний, а 10 — однорідний із розбіжністю вмісту елементів у різних точках до 5 %. Відповідні дані наведено в табл. 1.

Проведення кореляційного аналізу між обраними факторами та відгуками показало однозначний зв'язок між вмістом марганцю та алюмінію і рівномірністю хімічного складу. Коефіцієнти кореляції становили, відповідно, $R=0,78$ та $R=0,83$, і це означало, що чим менший вміст марганцю, а тим паче алюмінію, тим одноріднішим буде хімічний склад виливка. Додатковий аналіз проводили за допомогою оцінки комплексного графіка відображення експериментальних даних, що представлений на рис. 2.

Підвищення вмісту марганцю та феро-марганцю в складі шихти не є основною причиною збільшення кількості шлаку в розплаві та, імовірно, залежить від їх

Таблиця 1

Значення факторів та відгуків, за даними експериментальних плавов Fe–(28–38)Mn–(10–20)Al–(0,8–1,4)C сталей

Дослід	Фактори				Відгуки	
	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2
	% Mn	% Al	% феро-марганцю	тривалість виплавки	втрата маси, % від початкової маси шихти	Рівномірність хімічного складу (0–10)
1	30	15	16,1	25	14	8
2	30,5	12	16,44	21	16	10
3	32	11	12,9	15	18	8
4	34,1	15	14	16	15	6
5	35,3	10,4	13,8	18	14	8
6	37	21	25,2	24	15	4

чистоти, дисперсності, а також від забрудненості розплаву на основі заліза, до якого додаються інші компоненти (рис. 2). Зменшення кількості алюмінію в розплаві дещо збільшує масу одержаного при плавці шлаку. Разом із тим чим меншим вміст алюмінію, тим одноріднішим є хімічний склад.

Тривалість виплавки розплавів експериментальних сплавів грає малопомітну роль у шлакоутворенні, проте явно позитивно впливає на гомогенізацію хімічного складу розплаву, що логічно. Залежність не є повною через вплив інших факторів, а особливо вмісту алюмінію.

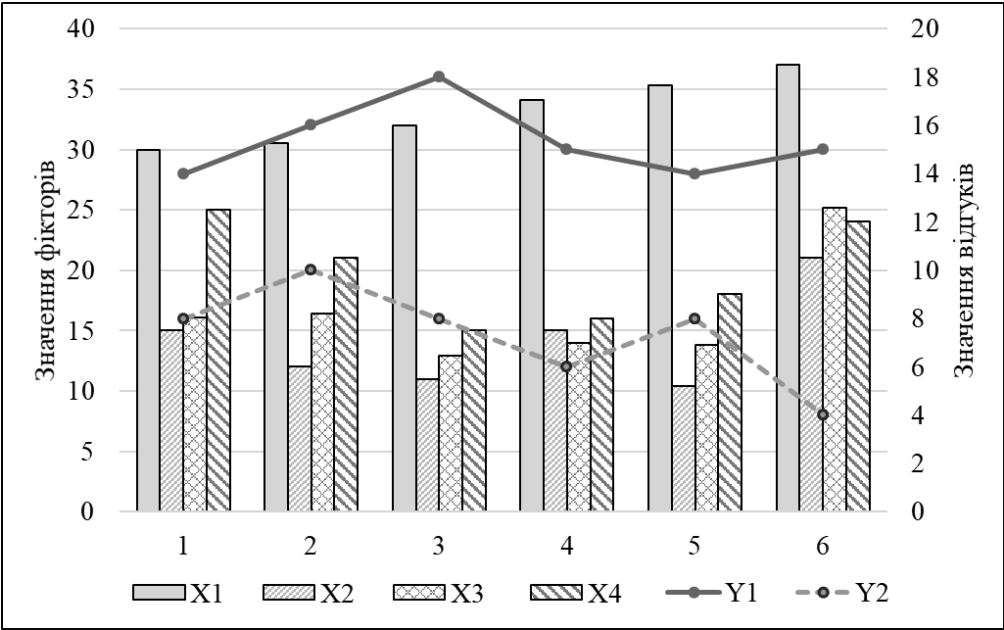


Рис. 2. Фактори та відгуки, які оцінювались при виплавці сталей Fe–(28–38)Mn–(10–20)Al–(0,8–1,4)C: X1 — вміст марганцю в шихті, X2 — вміст алюмінію в шихті, X3 — відсоток феромарганцю в складі шихти, X4 — тривалість виплавки, Y1 — відсоток втрата маси відносно маси шихти, Y2 — рівномірність хімічного складу (0–10)

При проведенні досліджень також було встановлено, що вміст вуглецю в одержаних сплавах майже не змінювався. Середній вміст марганцю в сплавах знижувався на величину ~5–10 %, за рахунок чого середній вміст алюмінію зазвичай залишався майже незмінним або збільшувався на ~5–10 % від початкового. При дуже високому вмісті алюмінію, як у випадку сплаву №6, імовірно, відбувається угар елементу через його знаходження на поверхні рідкометалевої ванни, тому щодо цього сплаву дані відчутно відрізняються (табл. 2).

Таблиця 2
Угар основних легуючих елементів експериментальних
Fe–(28–38)Mn–(10–20)Al–(0,8–1,4)C сплавів

Зміна складу, %мас	Сплав					
	1	2	3	4	5	6
Mn (ш)	30	30,5	32	34,1	35,3	37
Mn (в)	28,5	28,45	32	31,5	32,5	33,6
Δ,%	–5	–6,8	0	–7,7	–8	–9,2
Al (ш)	15	12	11	15	10,4	21
Al (в)	14,7	13	10,5	15,8	11,5	16,1
Δ,%	–2	+8,4	–4,5	+5,2	+10,1	–23

* вміст: (ш) — у шихті, (л) — у виливку

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що одержання високомарганцевих сталей із підвищеним вмістом алюмінію є складним завданням, яке вимагає постійного аналізу великих об’ємів даних щодо їх виплавки. Універсальний, доступний та зручний метод індукційної виплавки таких сталей цілком може бути використаний для таких цілей, що було показано під час виконання серії експериментальних плавів. Аналіз експериментальних даних із виплавки сплавів із різним вмістом основних легуючих елементів та різним складом шихти показав, що угар марганцю зазвичай складає 5–10 % від початкового вмісту, але через те, що його вміст дуже великий, це може суттєво змінювати пропорцію інших компонентів сплаву, який планується одержати. Зокрема, вміст алюмінію в готовому сплаві може підвищитись на 5–10 %. Втрати металу через шлакоутворення пов’язані більшою мірою не із вмістом марганцю, а із забрудненістю шихтових матеріалів. Також показано, що зменшення вмісту алюмінію позитивно впливає на рівномірність його розподілу у виливку і, відповідно, однорідність його загального хімічного складу.

Список літератури

1 Ding, H., Liu, D., Cai, M., Zhang, Y. (2022). Austenite-based Fe–Mn–Al–C lightweight steels: Research and prospective. *Metals* , 12, 1572. doi:10.3390/met12101572.

2 Kim, Ch., Hong, H., Moon, J., Lee, B. H., Park, S., Lee, Ch. (2023). A new strengthening mechanism driven by disruptive shear and solute segregation during warm rolling in 1.4 GPa class 12.5 wt. % Al added-FeMnC ultra-lightweight steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 157, 174–188. doi: 10.1016/j.jmst.2023.01.047.

3 Wu, Q., Ding, H., An, X. H., Han, D., Liao, X. Z. (2015). Influence of Al content on the strain-hardening behavior of aged low-density Fe–Mn–Al–C steels with high Al content. *Materials Science and Engineering: A*, 639, 187–191. doi: 10.1016/j.msea.2015.05.002.

4 Wegener, T., Haase, C., Liehr, A., Niendorf, T. (2021). On the influence of k-carbides on the low-cycle fatigue behavior of high-Mn light-weight steels. *International Journal of Fatigue*, 150, 106327. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106327.

- 5 Ren, X., Li, Y., Qi, Y., Wang, C. (2022). Effect of micro-alloyed/alloyed elements on microstructure and properties of Fe–Mn–Al–C lightweight steel. *Metals*, 12(4):695. doi: 10.3390/met12040695.

Надійшла 05.08.2024

A.Yu. Semenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientists, Senior Researcher
e-mail: semenko.au@gmail.com; ORCID 0000-0002-0448-1636

Zh.V. Parkhomchuk, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher;
e-mail: zhanna_parkhomchuk@ukr.net; ORCID 0000-0002-3026-8951

V.I. Veis, PhD (Engin.), Researcher; e-mail: valentyneis@gmail.com;
ORCID 0000-0001-8889-2303

R.F. Likhatskyi, PhD (Engin.), Junior Researcher;
e-mail: richard.kpi@outlook.com; ORCID 0000-0001-8277-5122

I.F. Likhatskyi, PhD Student; e-mail: LikhatskyiIF@nas.gov.ua;
ORCID 0000-0002-2069-5255

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

TECHNOLOGICAL FEATURES OF HIGH MANGANESE AND ALUMINUM AHSS TWIP-STEEL INDUCTION SMELTING

AHSS-steels are a new class of materials that are rapidly finding application in the most high-tech and responsible areas of industry. These include several types of steels, among which TWIP steels with a high content of manganese and aluminum can be called the most difficult to obtain. It is affected by liquation phenomena and noticeable slag formation, which contributes to disproportionate changes in the chemical composition of the melt. Presented work analyzed a series of steel melts with a manganese content of 28–38 wt. % and aluminum 10–20 wt. %. The influence of the charge chemical composition and the alloys melting time on the loss of melt mass due to the slag formation was also analyzed, as well as the chemical composition homogeneity. The metal was remelted using an induction furnace, and the resulting melt was poured into a sand mold. It is shown that the increase in manganese and ferromanganese content in a charge composition is not the main reason for the increasing of slag amount in the melt, which presumably depends on the purity and dispersion of the charge materials. Reducing the amount of aluminum in the melt slightly increases the amount of slag obtained during melting. At the same time, the lower then aluminum content, then more homogeneous the chemical composition. Melting duration of the experimental alloys plays an inconspicuous role in slag formation, but it clearly has a positive effect on the homogenization of the melts chemical composition. For all melts, the amount of slag formed was 14–18 % of the initial charge weight. At the same time, the average manganese content in alloys decreased by 5–10 %, due to which aluminium content remained unchanged, or increased by ~5–10% from the initial content.

Keywords: TWIP steels, high-manganese steels, induction smelting, slag formation, burn-off.