

<https://doi.org/10.15407/plit2025.03.012>

УДК 669.18:669.018.255

Ю.В. Костецкий, докт. техн. наук, доцент, завідувач відділу, e-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua, <http://orcid.org/0000-0003-0742-0684>

В.А. Зайцев, канд. техн. наук, стар. досл., заст. зав. відділу, e-mail: vlza@i.ua, <http://orcid.org/0000-0003-2498-8191>

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (Київ, Україна)

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИПЛАВКИ ТА РОЗЛИВАННЯ НАДМІЦНИХ ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

У статті проаналізовано комплекс технологічних проблем, пов'язаних із виробництвом надміцних високомарганцевих сталей нового покоління типу TWIP/TRIP, які характеризуються високим вмістом марганцю (до 35 %). Зазначено, що висока вартість легування, певні технологічні складнощі та недостатнє наскрізне засвоєння марганцю під час виплавки є серйозними викликами в процесі комерційного виробництва високого марганцевих сталей нового покоління. Розглянуто основні проблеми легування таких сталей, зокрема пов'язані із втратами марганцю, необхідністю корекції вмісту кремнію, складністю забезпечення необхідної концентрації вуглецю та підтримання оптимального складу шлаку в процесі плавки. Особливу увагу приділено проблемі вибору та ефективності різних легувальних матеріалів залежно від їх хімічного складу та впливу на технологічний процес. Обґрунтовано доцільність застосування спеціалізованих феросплавів зі скоригованим співвідношенням $Mn/Si \geq 8$ та зниженим вмістом фосфору ($\leq 0,05$ %). Розглянуто альтернативні технологічні підходи до організації легування: проплавлення феросплавів безпосередньо у плавильному агрегаті, введення в ківш, зокрема на агрегатах типу ківш-піч, застосування продуктів прямого відновлення та методів із попереднім розплавленням легувальних матеріалів. Проаналізовано досвід світових виробників у розробленні технологій розливання високомарганцевих сталей нового покоління — від класичних схем із розливанням у зливки та їх електрошлаковим переплавом до сучасних процесів безперервного лиття (Twin-Roll Casting, Belt Casting Technology). Розглянуто фізико-хімічні особливості кристалізації сталей даного типу і проблеми під час їх розливання. Зроблено висновок, що подальше вдосконалення технологій виплавки високомарганцевих сталей повинно базуватися на оптимізації вибору сировини, ефективному шлакоутворенні та адаптації схем розливання до складного хімічного складу сталі.

Ключові слова: виплавка високомарганцевих сталей, легування марганцем, легувальні матеріали, технологія розливання сталі, розливальні флюси

Високоміцні високомарганцеві сталі нового покоління, що належать до групи AHSS-сталей (Advanced High Strength Steels), так звані TWIP/TRIP сталі, вирізняються унікальним комплексом механічних властивостей, що поєднує високу міцність

та гарну пластичність [1–3]. Така комбінація властивостей зумовила підвищений інтерес до цих сталей і стимулювала пошук раціональних шляхів їх виробництва.

Як показує практика, основні проблеми, що виникають під час виплавки сталей даного типу, зумовлені їх хімічним складом [4]. Для цих сталей характерний надзвичайно високий вміст марганцю (до 35 %), підвищений вміст кремнію (до 3 %) у поєднанні з відносно невеликим вмістом вуглецю для більшості марок. Також у хімічному складі, як правило, присутній алюміній в значній кількості (до 11 %). Зазначені елементи мають високу спорідненість із киснем та активно взаємодіють із атмосферою, шлаком та футерівкою під час плавки. Окрім того, марганець та його оксиди при високих температурах є летючими, що спричинює додаткові втрати з їх випаровуванням [5]. Також через значну витрату марганцевмісних матеріалів для легування непростим завданням є забезпечення визначеного вмісту вуглецю в готовому металі, що, відповідно, зумовлює особливі вимоги до використовуваних шихтових матеріалів і техніки їх введення [4].

Висока вартість легування під час виплавки високомарганцевого сплаву в поєднанні з неповним засвоєнням сталлю марганцю шихти (іноді менше ніж 50 %) дуже здорожує виробництво. При цьому однією з основних проблем є вибір марганцевмісних феросплавів, необхідних для виплавки сталі. Легування низьковуглецевим феромарганцем і силікомарганцем є нераціональним через обмежену доступність цих феросплавів та їх високу вартість, яка іноді перевищує ціну електролітичного металевого марганцю [6]. При цьому стандартні марганцевмісні феросплави, окрім надлишкового вуглецю, часто містять до 0,7 % фосфору, що обмежує їх використання. Фосфор із феросплаву повністю переходить в метал і погіршує зварюваність та механічні властивості отриманої високомарганцевої сталі [6]. Згідно з даними дослідження [1], перевищення вмісту фосфору в готовому металі понад 0,06 % призводить до різкого зниження високотемпературної пластичності сталі та підвищення її схильності до гарячого розтріскування під час розливання. Однак видалити фосфор із розплаву в процесі плавки та подальшого позапічного рафінування вкрай складно через високий вміст марганцю й кремнію в металі. Тож потрібно обмежувати його вміст у шихтових матеріалах.

Одним із варіантів розв'язання цієї проблеми може бути використання спеціально виробленого феромарганцю з ультранизким вмістом фосфору (до 0,05 %) [7]. Наприклад, у компанії POSCO під час налагодження виробництва TWIP-сталі проблему надмірного вмісту фосфору у феромарганці розв'язали саме завдяки застосуванню спеціального феромарганцю [6]. Проте очевидно, що таке рішення не є універсальним. Варто зазначити, що використання економічно вигідного джерела марганцю з прийнятним рівнем домішок має важливе значення для комерційно успішного виробництва високомарганцевих сталей.

У сталеплавильному виробництві накопичено значний досвід виплавки традиційних марок сталі з високим вмістом марганцю [8, 9]. При цьому джерелом марганцю зазвичай є феромарганець та силікомарганець. У деяких випадках, коли економіка дозволяє, використовують електролітичний металевий марганець [6, 10]. Однак надто висока вартість легування металевим марганцем є неприйнятною для його широкого застосування.

Необхідність використання значної кількості феросплавів під час виробництва високомарганцевих сталей вимагає залучення раціональної технології легування. Зазвичай феросплави для легування додають або безпосередньо в плавильний агрегат, або в ківш, зокрема під час позапічної обробки сталі [10, 11].

Технологічні можливості агрегату ківш-піч, з урахуванням охолодження металу через введення легувальних матеріалів, дозволяють корегувати вміст марганцю в металі в межах 1–2 % без надмірного затягування обробки. Тож вочевидь під час виробництва високомарганцевих сталей основну частину феросплавів необхідно вводити в плавильний агрегат. Альтернативою може стати використання легувального матеріалу, попередньо розплавленого у в іншому агрегаті перед

додаванням у розплав [11]. Наприклад, технологія з використанням спеціально виготовленого рафінованого феромарганцю, розроблена компанією POSCO, передбачає накопичення феросплаву в рідкому стані в міксері з індукційним підігрівом та його порційне додавання до металу конвертерної виплавки для легування. Цей процес має назву PosLM (POSCO Liquid Manganese). Він дозволяє отримувати високомарганцеві сталі заданого складу з високим рівнем засвоєння марганцю під час легування та забезпечує точний контроль температури готового металу.

Технологічні рішення для легування безпосередньо в дуговій сталеплавильній печі (ДСП) передбачають завантаження феромарганцю, феросиліцію та марганцевої руди разом із металобрухтом у ДСП, їх плавлення, а також подальше зневуглюцювання високомарганцевого розплаву на агрегатах аргон-кисневого зневуглюцювання (AOD — Argon Oxygen Decarburization) або вакуум-кисневого зневуглюцювання (VOD — Vacuum Oxygen Decarburization) із додаванням силікомарганцю для відновлення окисненого марганцю [10,11]. Основними проблемами такої технології є підвищений знос футерівки ДСП, необхідність ретельного контролю складу шлаку та втрати марганцю через випаровування [5,10]. Під час плавки необхідно формувати рідкоплинні шлаки та обмежувати їх видалення, щоб мінімізувати втрати легувальних елементів зі шлаком. Перевагою такої технології є можливість застосовувати більш дешеві високо- та середньовуглецеві феромарганець і силікомарганець шляхом залучення до технологічного процесу агрегатів позапічного зневуглюцювання.

У процесах на основі кисневого конвертера нагрівання та плавлення феросплавів і шлакоутворювальних матеріалів теоретично може забезпечуватися теплом, що виділяється під час екзотермічної реакції окиснення кремнію. Спеціальні дослідження показали, що це можливо, однак значним недоліком такого процесу є надмірна кількість шлаку [12], що є небажаним для конверторного процесу. У процесі на базі ДСП із плавленням феросплавів безпосередньо в печі силікотермічна реакція не є необхідною умовою, а виступає лише додатковим джерелом енергії, що забезпечує більшу гнучкість у виборі шихтових матеріалів і дозволяє оптимізувати процес шлакоутворення.

Аналіз технологічних варіантів виплавки на базі ДСП показує, що технології з позапічним зневуглюцюванням металу не мають принципових обмежень щодо кінцевого вмісту кремнію та вуглецю. Водночас видалення значної кількості вуглецю під час позапічної обробки на вакууматорі або в конверторі AOD може бути економічно не вигідним. Отже, все одно необхідно застосовувати силікомарганець із меншим вмістом вуглецю.

Однак проблема хімічного складу силікомарганцю, який використовується для легування високомарганцевих сталей, не обмежується лише вмістом вуглецю [6,11]. Типовий феросиліцій містить 60–68 % Mn і 14–20 % Si [13]. Тобто співвідношення Mn/Si орієнтовно дорівнює 3–5, що зумовлює необхідність проводити рафінування металу від надлишкового кремнію після легування. Ця операція супроводжується утворенням значної кількості шлаку, сприяє прискореному зносу вогнетривкої футерівки та вимагає залучення додаткових ківшів. Наприклад, при видаленні 1 % кремнію з 1 т рідкої сталі утворюється 21,4 кг SiO₂. Приблизно стільки ж вапна необхідно додати, щоб забезпечити потрібну основність і зменшити втрати марганцю зі шлаком. Крім того, до шлаку необхідно додати розріджувачі. Таким чином, унаслідок проведення десилікації металу утворюється щонайменше 60 кг шлаку на 1 т сталі.

У такій ситуації доцільно застосовувати феросплав із підвищеним співвідношенням Mn/Si. Аналіз показує, що найефективнішим є використання силікомарганцю із вмістом марганцю не менше ніж 75 % та кремнію не більше 1–2 %. Крім того, як і у випадку феромарганцю, важливо мінімізувати вміст фосфору у феросплаві, оскільки при високих концентраціях марганцю й кремнію у сталі коригувати його вміст практично неможливо. Такий сплав доцільно виготовляти на феросплавному заводі з урахуванням цільового хімічного складу сталі [6,11,14]. Використання спеціалізованого феросплаву суттєво спрощує та здешевлює виплавку сталі на

сталеплавильному підприємстві й забезпечує ефективне легування марганцем без надмірного внесення кремнію, що відповідає технічним та економічним вимогам сучасного виробництва сталі. Прикладом реалізації цієї концепції є технологія, розроблена компанією Salzgitter Flachstahl GmbH [6]. Вона передбачає виробництво за індивідуальною специфікацією низьковуглецевого та середньовуглецевого силікомарганцю з низьким вмістом фосфору, призначеного для легування під час виплавки сталей із підвищеним умістом марганцю. Процес включає формування шлаку системи MnO-SiO_2 із руд, подальше отримання силікомарганцю, його десилікацію та можливість коригувати співвідношення Mn/Si у кінцевому продукті відповідно до цільового хімічного складу сталі.

Бажання зменшити витрати на легування стимулює пошук нових підходів до його організації. Зокрема, шляхом використання попередньо відновлених окатишів або брикетів, виготовлених із суміші марганцевої руди (із вмістом марганцю не менше 50 %), залізної руди чи інших матерів, що містять оксиди заліза, із додаванням вуглецевмісного та флюсуючих матеріалів для часткової заміни силікомарганцю під час виплавки сталі з високим вмістом марганцю [15]. Ці матеріали можна присаджувати як безпосередньо в ДСП, так і під час обробки сталі на установці ківш-піч (УКП). В останньому випадку, враховуючи технічні можливості УКП та раціональну тривалість обробки, максимальний вміст марганцю в металі, який можна досягти, не перевищує 7 %. Для виплавки сталей із більшим вмістом марганцю продукти прямого відновлення слід проплавляти в ДСП. При цьому під час плавки необхідно ретельно контролювати хімічний склад шлаку, щоб забезпечити дефосфорацію та ефективне вилучення марганцю в метал без надмірного науглецювання розплаву. Для підвищення вилучення марганцю в метал на шлак можна присаджувати алюміній або невелику кількість силікомарганцю. У даному варіанті технології зниження виробничих витрат забезпечується за рахунок використання марганцевих руд із нижчою вартістю, порівняно з силікомарганцем або феромарганцем. Незважаючи на потребу у додатковому обладнанні для компактування сировини та проведення процесів попереднього відновлення, запропонована схема виробництва, за відповідних технологічних і економічних умов, може демонструвати конкурентоспроможність щодо традиційної технології легування марганцевмісними феросплавами.

Підсумовуючи, зауважимо, що організація конкурентоспроможного виробництва надмічних високомарганцевих сталей нового покоління вимагає високого рівня організації виробничих процесів, готовності до впровадження інноваційних технологічних рішень, а також ефективної взаємодії з виробниками марганцевмісних матеріалів для легування. Зокрема, найбільш ефективною серед розглянутих, на нашу думку, є схема виробництва із використанням силікомарганцю із співвідношенням $[\text{Mn}]/[\text{Si}] \geq 8$, спеціально виготовленого на феросплавному заводі з урахуванням цільового хімічного складу сталі (рис. 1). Враховуючи наявність власного виробництва марганцевих феросплавів, дана схема наскрізного технологічного процесу має значний потенціал для реалізації в Україні.

Підкреслимо, що технологічні труднощі, які перешкоджають масовому виробництву середньо- та високомарганцевих надмічних сталей нового покоління, спостерігаються не лише на стадії виплавки, а й у процесі розливання металу [1, 4, 16].

Виробничий досвід свідчить, що високолеговані марганцеві сталі є складними для розливання [4, 16]. Вони схильні до утворення гарячих тріщин, формування грубозернистої структури та розвитку макро- й мікросегрегацій [17]. Вільна лінійна усадка марганцевої сталі складає 2,4–3,0 %, що суттєво перевищує аналогічний показник для вуглецевих сталей. При цьому її теплопровідність дорівнює лише 1/4–1/6 теплопровідності традиційних вуглецевих сталей [18]. Унаслідок цього під час охолодження при розливанні у затверділому металі виникають значні температурні градієнти і термічні напруження, що провокують утворення гарячих тріщин. Через знижену теплопровідність високомарганцеві сталі твердіють повільніше, що сприяє формуванню грубозернистої структури, великих стовпчастих кристалів і розвитку

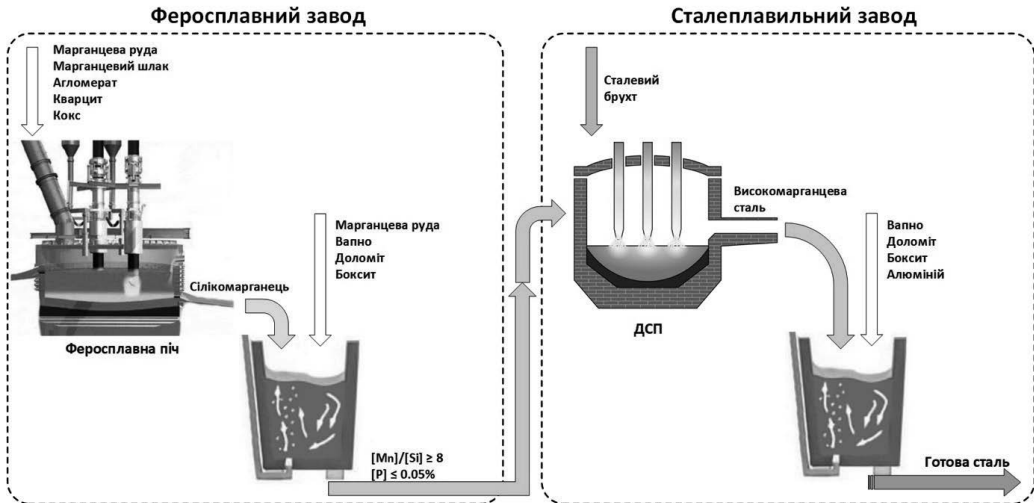


Рис. 1. Схема виробництва високомарганцевих сталей із застосуванням сілікомарганцю, спеціально виготовленого на феросплавному заводі з урахуванням цільового складу сталі

мікро- та макросегрегації під час затвердіння розплаву, що, у свою чергу, зумовлює структурну неоднорідність і ускладнює подальшу обробку [4, 16]. З цієї причини сталь типу Mn13 зазвичай розливають у зливки та виливки відносно невеликої маси [9].

Високомарганцеві сталі класу AHSS характеризуються не лише значно вищим вмістом марганцю, порівняно зі сталлю Гадфільда, але й підвищеною концентрацією алюмінію та кремнію, що суттєво ускладнює процес їх розливання. Проте, незважаючи на технологічні виклики, протягом останнього десятиріччя в промисловості було досягнуто відчутного прогресу в цьому напрямі. Завдяки розробленню та впровадженню спеціалізованих технологій лиття було успішно реалізовано розливання сталей AHSS другого і третього покоління як на пілотному рівні, так і в умовах промислового виробництва. Показовим прикладом є досвід китайської металургійної компанії Zhongyuan Special Steel Co, яка у співпраці з Університетом науки і технології Пекіна розробила та впровадила технологію виробництва плит із низьковуглецевих ($<0,05\%$ C) високомарганцевих TWIP-сталей із вмістом марганцю 25–26 %. Процес передбачає зневуглецювання розплаву методом аргон-кисневого рафінування (AOD) із подальшим розливанням металу у злитки масою 13 т і проведенням електрошлакового переплавлення для поліпшення якості металу [4]. Для подолання характерних для високомарганцевих сталей проблем ливарного виробництва відливання злитків здійснювали за умов значного перегріву розплаву. Унаслідок цього формувалася грубозерниста і неоднорідна лита структура, представлена переважно довгими розвиненими стовпчастими й неорієнтованими дендритами. Підвищений вміст алюмінію у сталі сприяв інтенсивному утворенню оксидних неметалевих включень типу Al_2O_3 . Для зменшення окиснення алюмінію під час розливання застосовували захист розплаву аргонном. Подальше проведення електрошлакового переплаву сприяло покращенню кристалічної структури та підвищенню однорідності металу. Крім того, електрошлаковий переплав забезпечував ефективне зменшення кількості й розмірів грубих неметалевих включень у готовому металі.

Особливості та характер кристалізації високомарганцевих AHSS-сталей були предметом дослідження з метою визначення умов формування якіснішої литої структури в процесі розливання [17–22]. Зокрема, встановлено, що вміст вуглецю й марганцю у металі суттєво впливає на механізм кристалізації. При цьому швидкість охолодження відіграє ключову роль у макро- та мікророзподілі марганцю, а також у параметрах дендритної структури сплаву [23]. Зростання швидкості затвердіння

сприяє формуванню більш однорідної структури [20, 23], однак забезпечити необхідну швидкість охолодження по всьому перерізу зливка на практиці є вкрай складним завданням.

Для покращення литої структури сталей системи Fe–C–Mn–Al було запропоновано впливати на процес кристалізації під час затвердіння шляхом формування в об'ємі рідкого металу додаткових центрів кристалізації [24–26]. Такі центри можуть утворюватися безпосередньо в рідкому сплаві внаслідок реакцій між перехідними металами (Ti, Zr, Nb, Hf) та металоїдними елементами (C, S, O, N), розчиненими в розплаві. Проведені дослідження засвідчили ефективність зазначеного підходу. Водночас у публікаціях відсутні відомості про його впровадження в промислових умовах.

Таким чином, забезпечення належної якості заготовки для подальшої обробки тиском у разі використання традиційного розливання в злитки потребує застосування додаткових технологічних заходів. Насамперед ідеться про використання переплавних процесів, які сприяють удосконаленню кристалічної структури та підвищенню хімічної однорідності литого металу. Водночас слід зазначити, що така технологічна схема у більшості випадків поступається за економічною та виробничою ефективністю процесам, заснованим на технології безперервного розливання.

Спроби впровадження технології безперервного розливання високомарганцевих AHSS-сталей, крім добре відомих проблем, пов'язаних із гарячим розтріскуванням та високотемпературною крихкістю, виявили низку додаткових технологічних викликів, які необхідно вирішувати для забезпечення стабільності та якості процесу. Зокрема, традиційні розливальні флюси виявились непридатними для застосування, оскільки активно взаємодіють із рідким металом у кристалізаторі, що призводить до швидкого збагачення шлаку оксидом алюмінію та погіршення фізико-хімічних властивостей флюсу і, відповідно, зниження якості поверхні й утворення тріщин у заготівці [1, 16, 27–28]. Результати промислових експериментів також засвідчили значні труднощі при реалізації операцій випрямлення, м'якого обтискання та коригування геометричних параметрів заготовки на виході із зони вторинного охолодження. Це пов'язано з високою високотемпературною міцністю та інтенсивним деформаційним зміцненням високомарганцевих AHSS-сталей [17–20]. Крім того, підвищена схильність до окислення поверхні призводить до надмірного утворення окалини, що спричиняє появу поверхневих дефектів та зменшення виходу придатної продукції як під час розливання, так і в процесі подальшого прокатування [19, 29]. Особливу увагу слід приділяти забезпеченню високого рівня чистоти рідкої сталі перед її розливанням, а також захисту розплаву від окиснення в процесі розливання, оскільки високий вміст алюмінію в складі сплаву сприяє утворенню значної кількості неметалевих включень. Це, у свою чергу, негативно позначається як на експлуатаційних характеристиках металу, так і на стабільності процесу розливання через інтенсивне заростання сталерозливних стаканів [1, 19, 30].

Компанія POSCO стала першою у світі, кому вдалося реалізувати процес безперервного розливання високомарганцевої сталі типу TWIP [16]. Для досягнення цього були впроваджені численні технологічні удосконалення, зокрема замість традиційних порошкових флюсів у кристалізаторі почали використовувати рідкі флюси, що забезпечують кращу взаємодію з поверхнею розплаву. Крім того, був налагоджений високоточний контроль параметрів процесу розливання для мінімізації утворення оксидної плівки на поверхні металу. Згодом про успішне впровадження безперервного розливання слябів із високомарганцевої сталі також повідомили китайські компанії Ansteel та Baosteel [31, 32].

Практичний досвід засвідчив, що процес безперервного розливання високомарганцевих сталей із підвищеним вмістом алюмінію є надзвичайно чутливим до параметрів лиття [16, 32]. У цьому контексті властивості покривного флюсу в кристалізаторі відіграють ключову роль, визначаючи стабільність процесу. Відсутність належного контролю за станом флюсу під час розливання суттєво підвищує ризик порушення процесу та спричиняє часті спрацювання систем попередження проривів.

У процесі безперервного розливання сталі з високим вмістом алюмінію спостерігається інтенсивна взаємодія алюмінію з діоксидом кремнію (SiO_2), що входить до складу покривного флюсу. Унаслідок цього концентрація SiO_2 у флюсі поступово знижується, тоді як вміст оксиду алюмінію (Al_2O_3) зростає до досягнення динамічної рівноваги [33]. У результаті традиційні флюси на основі системи CaO-SiO_2 швидко трансформуються за складом у флюси типу $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ із незначним вмістом SiO_2 . Зміна хімічного складу флюсу призводить до зміни його фізико-хімічних властивостей, зокрема температури плавлення, в'язкості, особливостей кристалізації тощо. Це, у свою чергу, впливає на ефективність змащування, витрату флюсу, а також на теплопередачу від металу до мідної стінки кристалізатора. У підсумку спостерігається погіршення стабільності процесу лиття та зниження якості поверхні отриманих слябів [16, 33].

З метою забезпечення ефективного безперервного розливання високоміцних марганцевих сталей нового покоління було проведено низку досліджень, спрямованих на розробку нових складів покривних флюсів. У публікаціях [16, 32–36] проаналізовано останні досягнення у цій галузі. Особлива увага приділялася вивченню реологічних властивостей і структури рідких флюсів зі зміною співвідношення $(\% \text{Al}_2\text{O}_3)/(\% \text{SiO}_2)$ [37, 38], а також особливостей їх кристалізації, що є критично важливим через вплив на теплопередачу та умови початку застигання сталі в кристалізаторі [16, 34, 39]. Розглядалося декілька підходів до модифікації хімічного складу флюсів для сталей із високим вмістом марганцю та алюмінію. Зокрема, для зниження температури початку кристалізації, зменшення в'язкості й оптимізації кінетики кристалізації до складу флюсу пропонували додавати оксиди бору (B_2O_3) [40] та оксид літію (Li_2O) [39]. Ці дослідження спрямовані на встановлення закономірностей впливу хімічного складу на технологічні властивості флюсів, що дозволить обґрунтовано вибирати їх оптимальні композиції залежно від умов конкретного виробництва. Водночас такі пошуки залишаються актуальними і ще не завершені.

Певні дослідження та випробування було здійснено з метою створення альтернативних підходів до безперервного розливання високомарганцевих сталей. Компанії POSCO, ThyssenKrupp і Baosteel з певним успіхом працюють над комерціалізацією технології розливання таких сталей із використанням процесу двовалкового лиття (twin-roll casting, TRC) [41–43]. TRC є комбінованим процесом лиття та прокатування, у межах якого з розплавленого металу відразу формуються тонкі смуги. Суть цього методу полягає в подачі рідкого металу в зазор між двома обертовими валками з інтенсивним водяним охолодженням, де він одночасно кристалізується та деформується у вигляді смуги. Такий підхід забезпечує сприятливі умови для кристалізації металу з точки зору запобігання формуванню грубої литої структури й вираженої ліквізації, а також дозволяє суттєво знизити енерговитрати, порівняно з традиційними процесами безперервного розливання, за рахунок скорочення обсягів операцій із повторного нагрівання та прокатування [42].

У результаті тривалих досліджень та випробувань компанії SMS Siemag і Salzgitter Flachstahl впровадили процес BCT® (Belt Casting Technology) — різновид технології горизонтального однострічкового лиття Direct Strip Casting — для виробництва високомарганцевої сталі [44, 45]. Цей процес характеризується значно меншими капітальними та експлуатаційними витратами, порівняно з традиційним безперервним розливанням, і, крім того, технічно придатний для лиття високомарганцевих сталей [23]. Його реалізація передбачає використання машини горизонтального лиття, у якій рідка сталь подається на охолоджуваний металевий ремінь, що рухається. На його поверхні розплав швидко кристалізується у захисній атмосфері аргону, утворюючи стрічку товщиною близько 10 мм, яка надалі безпосередньо подається на прокатку. Завдяки мінімізації операцій гарячого деформування та повторного нагрівання процес забезпечує суттєву економію енергії, порівняно з традиційною технологією розливання плит.

Таким чином, проблему розливання надміцних високомарганцевих сталей нового

покоління можна вважати принципово вирішеною. Починаючи з моменту освоєння процесів їх виробництва, було розроблено та впроваджено як технології лиття у злитки, так і різні модифікації технологій безперервного розливання. Водночас, незважаючи на досягнутий прогрес, залишаються окремі технологічні виклики, пов'язані з комерціалізацією розроблених рішень, їх подальшим удосконаленням, а також розширенням сортаменту вироблюваних марок сталі. При цьому висока вартість легування, низка технологічних складнощів і недостатнє наскрізне засвоєння марганцю під час виплавки залишаються серйозними викликами в процесі комерційного виробництва високомарганцевих сталей нового покоління.

References

- 1 Cooman, B. C., De Kwon, O., Chin, K.-G., (2012) State-of-the-knowledge on TWIP steel. *Materials Science and Technology*, 28(5), 513–527.
- 2 Jacob, R., Raman Sankaranarayanan, S., Kumaresh Babu, S.P. (2020) Recent advancements in manganese steels – A review. *Materials Today: Proceedings*, 27(3), 2853–2858. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.296>
- 3 Khaple, S., Raju Golla, B., Satya Prasad, V.V. (2023) Review on the current status of Fe–Al based ferritic lightweight steel. *Defence Technology*, 26, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.11.019>
- 4 Li, K. Zhuang, C. Liu, J. et al. (2015) Smelting and casting technologies of Fe-25Mn-3Al-3Si twinning induced plasticity steel for automobiles. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22(S1), 75–79.
- 5 Lan, F., Zhuang, C., Li, C. et al. (2021) Study on manganese volatilization behavior of Fe–Mn–C–Al twinning-induced plasticity steel. *High Temperature Materials and Processes*, 40(1), 461–470. <https://doi.org/10.1515/htmp-2021-0049>
- 6 Hils, G., Newirkowez, A., Kroker, M. et al. (2015) Conventional and tailored Mn-bearing alloying agents for the production of high manganese steels. *Steel research international*, 86(4), 411–421.
- 7 Vdovin, K.N., Feoktistov, N.A., Sinitskii, E.V. et al. (2015) Production of high-manganese steel in arc furnaces. Part 1. *Steel in Translation*, 45(10), 729–732.
- 8 Vdovin, K. N., Vdovin, N. A., Feoktistov, E.V. et al. (2016) Production of high-manganese steel in arc furnaces. Part 2. *Steel in Translation*, 46(1), 16–20.
- 9 Georgeou, Z. Redeker, C. F., Schoettler, J. et al. (2010) Cost-efficient metallurgy for the production of novel ultra high-strength deep-drawable steel grades with high Mn contents from 10 to 25 wt. % by using the EAF steelmaking route. *European Commission – Research Fund for Coal and Steel*, Luxembourg, 121.
- 10 Redeker, C. F., Schoettler, J., Spitzer, D. et al. (2008) Cost-efficient metallurgy for the production of novel ultra-high strength deep drawable steel grades with high Mn contents from 10 to 25 wt.-%, *European Commission – Research Fund for Coal and Steel*, Luxembourg, 125.
- 11 Georgeou, Z., Schoettler, J., Rohrberg, D. et al. (2012) Metallurgical methods for the production of steels with high manganese contents. *Stahl und Eisen*, 132(8), 29–36.
- 12 Gasik, M. (2013) Manganese Ferroalloys Technology. *Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology*, Elsevier, 221–266.
- 13 Voron, M., Kostetsky, Y., Fon Pruss, M. (2020) Getting a complex master alloy for alloying high-manganese steels and cast aluminum alloys. *Conference Proceedings 29th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, EU, 20–24.
- 14 Ge, S., Hernandez, V., Mostaghel, S. et. al. (2016) Innovative and economical approach for the production of mid- and high-manganese steel. *2016 AISTech Conference Proceedings*, Pittsburg, PA, USA
- 15 Ge, S., Hernandez, V., Mostaghel, S. et. al. (2016) Innovative and economical approach for the production of mid- and high-manganese steel. *2016 AISTech Conference Proceedings*, Pittsburg, PA, USA

- 16 Qiu, G.X., Li, J.N., Chen, K. et al. (2024) Research status of high-manganese high-Aluminum steel and key points of continuous casting. *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 76, 7011–7022. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-05444-4>.
- 17 Zhuang, C., Liu, J., Li, C., Tang, D. (2019) Study on high temperature solidification behavior and crack sensitivity of Fe–Mn–Al–C TWIP-steel. *Scientific Reports*, 9(1), 15962–15977.
- 18 Lan, P., Zhang, J. (2016) Thermophysical properties and solidification defects of Fe-22Mn-0.7C TWIP-steel. *Steel Research International*, 87(2), 250–261.
- 19 Gigacher, G., Pierer, R., Wiener, J., Bernhard, C. (2006) Metallurgical Aspects of Casting High-Manganese Steel Grades. *Advanced Engineering Materials*, 8(11), 1120–1124.
- 20 Lee, C.-Y., Lee, Y.-K. (2014) The solidification mode of Fe-Mn-Al-C lightweight steel. *JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 66(9), 1794–1799.
- 21 Lan, P., Tang, H., Zhang, J. (2016) Solidification microstructure, segregation, and shrinkage of Fe–Mn–C twinning-induced plasticity steel by simulation and experiment. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(6), 2964–2984.
- 22 Shen, Y., Liu, J., Yang, S. et al. (2019) Dendrite growth behavior in directionally solidified Fe–C–Mn–Al alloys. *Journal of Crystal Growth*, 511, 118–126.
- 23 Shen, Y., Yang, S., Liu, J. et al. (2019) Study on micro segregation of high alloy Fe–Mn–C–Al steel. *Steel Research International*, 90(5), 1800546. <https://doi.org/10.1002/srin.201800546>
- 24 Lekakh, S. N., Ge, J., Richards, V. et al. (2017) Optimization of melt treatment for austenitic steel grain refinement. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48(1), 406–419.
- 25 Penna, V. R., Bartlett, L. N., O'Malley, R. (2020) Influence of TiN additions on the microstructure of a lightweight Fe–Mn–Al steel. *International Journal of Metalcasting*, 14(2), 342–355.
- 26 Lekakh, S.N., Richards, V.L., Schulte, A.M., Van Aken, D.C. (2010) Fe–Mn–Al–C austenitic steels treated by Ca and Ce. EPD Congress 2010: *Proceedings of Sessions and Symposia Sponsored by the Extraction and Processing Division (EPD) of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, 489–496.
- 27 Kim, M.S., Lee, S.W., Cho, J.W., et al. (2013) A reaction between high Mn – high Al steel and CaO–SiO₂-type molten mold flux: Part I. Composition evolution in molten mold flux. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 44(2), 299–308.
- 28 Kang, Y.B., Kim, M.S., Lee, S.W., et al. (2013) A reaction between high Mn – high Al steel and CaO–SiO₂-type molten mold flux: Part II. Reaction mechanism, interface morphology, and Al₂O₃ accumulation in molten mold flux. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 44(2), 309–316.
- 29 Chen, L., Zhao, Y., Qin, X., et al. (2013) Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity (TWIP) steel, a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26(1), 1–15.
- 30 Gigacher, G., Krieger, W., Scheller, P.R., Thomser, C. (2005) Non-metallic inclusions in high-manganese-alloy steels. *Steel Research International*, 76(9), 644–649.
- 31 Wang, Y. (2019) Solidification structure, non-metallic inclusions and hot ductility of continuously cast high manganese TWIP steel slab. *ISIJ International*, 59(5), 872–879.
- 32 Ji, C., Cui, Y., Zeng, Z., et al. (2015) Continuous casting of high-Al steel in shougang jingtang steel works. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22(S1), 53–56.
- 33 Yang, J., Wang, L., Wang, Q., et al. (2022) Challenges in the mold flux design: development of F-free fluxes and fluxes for casting of high-Al steel. *Steel research international*, 93(3), 2100123.
- 34 Wang, W., Lu, B., Xiao, D., Xiao, D. (2016) A review of mold flux development for the casting of high-Al steels. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 47, 384–389. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0474-z>
- 35 He, S., Li, Z., Chen, Z., et al. (2019) Review of mold fluxes for continuous casting of high-alloy (Al, Mn, Ti) Steels. *Steel Research International*, 90(1), 1800424.

- 36 Nigam, A., Biswas, K., Sarkar, R. (2025) Effect of $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ratio on crystallization kinetics of non-reactive CaO–Al₂O₃ based mold fluxes for continuous casting of 3rd generation AHSS. *Ceramics International*, 51(12), 15497–15511.
 - 37 Mo, R., Zhang, C., Ren, Y., Zhang, L. (2025) Kinetic model for the generation and accumulation of Al₂O₃ in mold flux during the continuous casting of a Fe–Al–Mn–C steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 5137–5146.
 - 38 Liao, J., Zhang, Y., Sridhar, S., et al (2012) Effect of Al₂O₃/SiO₂ ratio on the viscosity and structure of slags. *ISIJ International*, 52, 753–758.
 - 39 Long, X., Long, S., Luo, W., et al. (2023) Crystallization of Slag Films of CaO–Al₂O₃–BaO–CaF₂–Li₂O–Based Mold Fluxes for High-Aluminum Steels' Continuous Casting. *Materials*, 16(5), 1903.
 - 40 Mo, R., Zhang, X., Ren, Y., et al. (2023) Influence of substituting B₂O₃ with Li₂O on the viscosity, structure and crystalline phase of low-reactivity mold flux, *International Journal of Minerals. Metallurgy and Materials*, 30(7), 1320–1328.
 - 41 Zhu, C., Zeng, J., Wang, W. (2022) Twin-roll strip casting of advanced metallic materials. *Science China Technological Sciences*, 65, 493–518. <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1800-8>
 - 42 Maleki, A., Taherizadeh, A., Hosseini, N. (2017) Twin roll casting of steels: an overview. *ISIJ International*, 57(1), 1–14.
 - 43 Liu, L. Li, C., Yang, Y. et al. (2017) A simple method to produce austenite-based low-density Fe–20Mn–9Al–0.75C steel by a near-rapid solidification process. *Materials Science and Engineering A*, 679, 282–291.
 - 44 Guthrie, R. I. L., Isac, M. M. (2022). Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future. *Metals*, 12(5), 862. <https://doi.org/10.3390/met12050862>
 - 45 Grethe, U., Juchmann, P., Wans, J., et al. (2015) Belt casting technology — experiences based on the worldwide first BCT caster. *46th Steelmaking Seminar — International*, Rio de Janeiro, 111–117. <https://doi.org/10.5151/1982-9345-26265>
- 15.05.2025

Yurii Kostetskyi, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor, Head of the Department, e-mail: y.kostetsky@paton.kiev.ua, <http://orcid.org/0000-0003-0742-0684>

Volodymyr Zaitsev, PhD (Engin.), Senior Research Scientists, Deputy Head of the Department, e-mail: vlza@i.ua, <http://orcid.org/0000-0003-2498-8191>

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

TECHNOLOGICAL FEATURES OF SMELTING AND CASTING OF NEW-GENERATION HIGH-MANGANESE STEELS

The article analyzes technological problems related to producing new-generation TWIP/TRIP high-strength, high-manganese steels with a manganese content of up to 35 %. The article notes that the high cost of alloying, certain technological difficulties, and insufficient manganese absorption during smelting pose serious challenges to the commercial production of these steels. The main alloying problems are discussed, particularly those related to manganese losses, correcting the silicon content, ensuring the required carbon concentration, and maintaining the optimal slag composition during smelting. Particular attention is paid to the selection and efficiency of various alloying materials, depending on their chemical composition, as well as the influence of the technological process. The use of specialized ferroalloys with an adjusted Mn/Si ratio of at least 8 and reduced phosphorus content of no more than 0.05 % is substantiated. Alternative technological approaches to alloying are considered, such as melting ferroalloys directly in the melting unit or introducing them into the ladle (particularly in ladle-furnace units), using direct reduction products, and methods involving the preliminary melting of alloying materials. We analyzed the experience of global manufacturers in developing technologies for casting new-generation, high-manganese

steels, from classic schemes involving casting into ingots and electroslag remelting, to modern continuous casting processes, such as Twin-Roll Casting and Belt Casting Technology. The analysis considers the physical and chemical characteristics of the crystallization of this type of steel and the problems encountered during casting. It is concluded that improving high-manganese steel smelting technologies should focus on optimizing the selection of raw materials, forming effective slag, and adapting casting schemes to the steel's complex chemical composition.

Keywords: smelting of high-manganese steels, manganese alloying, alloying materials, steel casting technology, casting fluxes

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу подача статей можлива через сайт <https://plit-periodical.org.ua/>

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

Спілкування з редакцією та подання статей здійснюється через пошту **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»