

ЗАСТОСУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКІВ. ОГЛЯД

В.В. Барабаш, Ф.К. Біктагіров

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: barabash.vv@ukr.net

Проведено аналіз застосування зовнішнього впливу, такого як модифікування металу, накладання вібрації, перемішування металевої ванни і підігрів металу в надливі при отриманні сталевих зливків. Показано позитивний ефект зовнішнього впливу на умови кристалізації та твердіння різних зливків. Зроблено висновок, що дієвим способом впливу на умови формування сталевих зливків може бути поєднання обігріву надлива і перемішування шляхом введення в рідку серцевину зливка пристрою, що приводить в рух рідкий метал. Бібліогр. 40, рис. 6.

Ключові слова: сталевий зливко, якість, зовнішній вплив, модифікація, вібрація, перемішування, підведення тепла, метал, надлив

Вступ. Однією з основних цілей у металургійному виробництві є підвищення якості металопродукції. Повною мірою це стосується і отримання сталевих зливків, з яких виготовляють великогабаритні відповідальні, інколи унікальні, вироби для багатьох провідних галузей промисловості. Численні дослідження процесу переходу металу різного складу з рідкого стану в твердий та особливостей формування сталевих зливків дозволили розробити технологічні прийоми, спрямовані на запобігання утворенню при їх отриманні грубих поверхневих і внутрішніх дефектів. Насамперед це видалення з рідкого металу небажаних шкідливих домішок, оптимізація технології розливання й геометричних параметрів виливниці залежно від маси і призначення зливків, покращення роботи надливкової надставки.

Однак ці заходи та низка інших, які зараз застосовуються в сталеплавильних цехах, не дозволяють кардинально втрутитися в умови кристалізації рідкої серцевини зливка. Це особливо важливо під час виробництва великих зливків, оскільки зі збільшенням маси рідкого металу погіршуються умови його твердіння, що призводить до посилення розвитку дефектів структурного, усадкового та ліквацийного походження. Тому для подальшого підвищення якості сталевих зливків виникає необхідність використання методів, які дозволяють впливати на умови кристалізації металу та формування їх будови.

Аналіз методів зовнішнього впливу. Добре відомо, що переplавні процеси, у тому числі спосіб електрошлакового переplаву, що набув широкого розповсюдження в промисловості, дозволяють отримувати литі заготовки з однорідною щільною структурою. Це досягається за рахунок специфічних умов плавки, рафінування та затвердіння металу у водоохолоджуваних кристалізаторах. В цьому огляді

ми не торкаємося цих переplавних процесів, а розглядаємо можливості впливу на затвердіння металу при основному методі одержання сталевих зливків розливу рідкого металу у виливниці.

Роботи щодо поліпшення умов затвердіння металу у виливницях проводилися раніше та продовжуються і сьогодні. Чималий внесок у вивчення різних прийомів впливу на структуроутворення сталевих зливків, які найчастіше поєднують під терміном зовнішній вплив, зробили українські вчені і фахівці, дослідження яких розкривають багато аспектів теорії та практики розглянутої проблеми.

До методів зовнішнього впливу можна віднести: додавання модифікаторів; вібраційну обробку; перемішування металу; підведення тепла і металу в надлив.

Додавання модифікаторів. Модифікатори — це речовини, що додаються в метал з метою зміни структури і властивостей металу. Вплив модифікаторів на структуроутворення має складний характер, пов'язаний з фізико-хімічними процесами, що відбуваються при зародженні та зростанні нової фази з утворенням поверхні поділу рідке–тверде. Найчастіше за механізмом дії виділяють два основні типи модифікаторів: інокулятори — речовини, що самі або через утворення нерозчинних частинок виступають новими центрами кристалізації та сприяють гетерогенному зародкоутворенню; інгібітори — речовини, що тонким шаром осаджуються на поверхні зародків, уповільнюючи їх лінійну швидкість росту і даючи можливість утворитися більшій кількості зародків.

Найчастіше в якості інокуляторів використовують титан, ванадій, ніобій, які можуть утворювати тугоплавкі карбіди TiC, VC, NbC, а в якості інгібіторів використовують бор [1, 2]. Інокуляторами можуть бути не тільки дрібнодисперсні ре-

В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>

човини, наприклад нітриди і карбіди тугоплавких металів, а й порошки чи дріб з металу того ж чи близького по хімічному складу, що й одержувана лита заготовка, які змінюють литу структуру за рахунок зменшення перегріву металевого розплаву, що кристалізується. Їх зазвичай виділяють як інокулятори-холодильники. Також застосовуються комплексні модифікатори, що поєднують рафінувально-зміцнювальну дію на метал, наприклад Ti–B–Ca, Mg–Zr–Ce, Ti–V–Ca.

При отриманні сталевих зливків модифікатори зазвичай подають у вигляді брикетів або насипом з бункера в процесі розливання або одразу після наповнення форми рідким металом. Надалі введення модифікаторів ускладнюється і необхідне застосування спеціальних пристроїв, що забезпечують їхнє потрапляння в рідку серцевину зливка.

Одним з таких пристроїв для введення реагентів може бути імпульсно-динамічний пристрій (ІДП), випробуваний для рафінування та модифікування металу в ковші (рис. 1).

Конструкція пристрою представляє собою закріплений на металевій трубі контейнер-катридж, заповнений матеріалами, необхідними для обробки сталі. При контакті з рідким металом відбувається імпульсне порційне виштовхування модифікувальних присадок, при якому контейнер-катридж обертається та розчиняється [3].

Виконані дослідження показують, що модифікування є ефективним способом впливу на процес кристалізації, що дозволяє збільшити швидкість затвердіння зливків, покращити їх якість, зменшивши фізичну і хімічну неоднорідності [4–6]. Встановлено, що при модифікуванні сталі у виливниці майже не відбувається виведення шкідливих домішок, але їх розташування стає більш рівномірним і це позитивно впливає на технологічну пластичність та механічні властивості. Так, автори робіт [7, 8] відзначають, що модифікування сталі призводить до глобуляризації неметалевих включень, а це сприяє зниженню крихкості і збільшенню холодостійкості металу. Причому найбільше подрібнення та однорідний розподіл включень було досягнуто у випадку застосування модифікаторів з найбільш дисперсною фракцією.

Вплив на подрібнення структури залежить не тільки від складу і фракції модифікаторів, а й від того, у якій кількості їх вводять у метал. При застосуванні нерозчинних інокуляторів найчастіше відбувається поступове зменшення розміру зерна зі збільшенням кількості модифікаторів (рис. 2) [6]. Але при порівняно великому вмісті їхня дія слабшає і найбільш раціонально вводити такі мо-

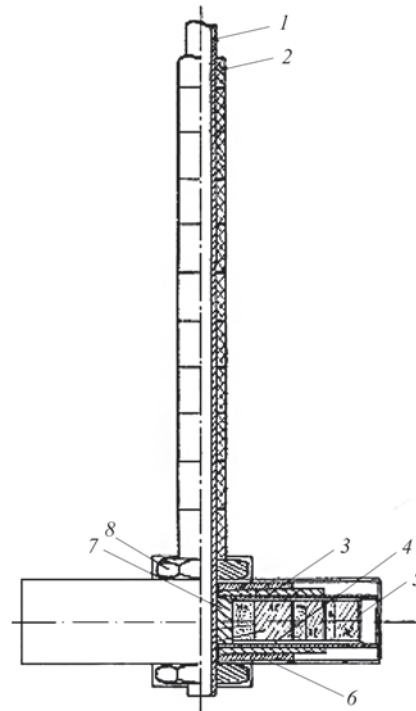


Рис. 1. Схема імпульсно-динамічного пристрою: 1 — стальний стрижень; 2 — футеровочні термостійкі втулки; 3 — спрямовуючі елементи; 4 — горизонтальні стінки; 5 — обичайка; 6 — тепловий екран; 7 — кільцеві елементи з реагентів; 8 — захисний кожух

дифікатори в кількості 0,1...0,5 % від маси металу, що обробляється.

Дія поверхнево-активних модифікаторів має інший характер. До певного їх вмісту спостерігається зменшення розміру зерна, а потім навпаки — збільшення (рис. 2). Тому їх застосовують зазвичай у кількості 0,01...0,1 %.

Технології модифікування досить широко застосовуються у сталеплавильному виробництві головним чином шляхом введення відповідних інгредієнтів у сталерозливний або проміжний ківш при безперервному розливанні. Щодо модифікування безпосередньо при отриманні сталевих зливків, то окрім складності введення добавок після заповнення виливниці, неможливо забезпечити рівномірне розповсюдження модифікаторів в об'ємі металевий ванни. Крім того, додавання таких широко розповсюджених модифікаторів як титан, ніобій, цирко-

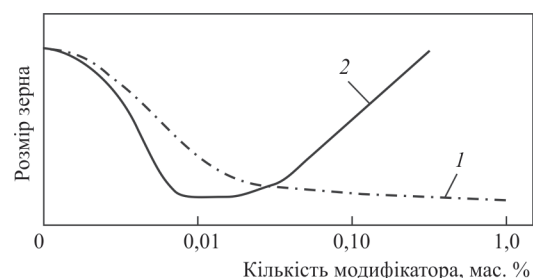


Рис. 2. Вплив вмісту модифікаторів на дисперсність структури: 1 — нерозчинні; 2 — поверхнево-активні

ній може негативно впливати на хімічний склад і властивості складнолегованих сталей та сплавів. Застосування інокуляторів-холодильників вимагає захисту поверхні дробу або порошків від окиснення в процесі зберігання та транспортування. В іншому випадку неминуче забруднення металу оксидними неметалевими включеннями [9]. А дія розчинених в рідкому металі інгібіторів може, у міру формування особливо великого зливка, звестися нанівець внаслідок їх ліквідації. Тому традиційне модифікування як вплив на структуроутворення сталевих зливоків безпосередньо при їх розливці не набуло широкого застосування.

До специфічних методів модифікування можна віднести введення в рідку серцевину зливка стрижнів зі спресованих неорганічних матеріалів, зокрема суміші CaO і CaF_2 , які розплавляються в рідкій сталі (метод ІНАМ-inorganic heat absorption material) [10, 11]. Відповідно до виконаних досліджень у разі застосування даного методу при отриманні порівняно невеликих зливоків масою від 200 кг до 6,0 т знижується ступінь макросегрегації та вміст неметалевих включень, а також зменшується розвиток усадкової пористості. Це пов'язано з тим, що розплавлення стрижнів знижує температуру рідкої серцевини зливоків і підвищує швидкість затвердіння. А рідкі неорганічні речовини, що утворюються, асимілюють неметалеві включення і виносять їх на поверхню розплавленої сталі. Однак зі збільшенням маси зливоків для скільки-небудь істотного зниження температури рідкого металу знадобиться велика кількість подібних стрижнів. Крім того, існує небезпека забруднення металу твердими або рідкими частинками неорганічного матеріалу при попаданні в розгалужену область рідко-твердого стану. Тому поки важко судити про перспективність застосування такого модифікування під час виробництва великих сталевих зливоків.

Вібраційна обробка. Вплив на рідкий метал вібрацією — це спосіб, який передбачає накладання на розплав вимушених коливань із частотою від 1,5 до 10000 Гц та амплітудою від 0,01 до 5 мм [12].

Основний вплив вібрації на умови кристалізації та подрібнення структури литого металу можна пояснити наступним [13]: механічним руйнуванням фронту кристалізації під впливом коливань і створенням додаткових центрів кристалізації; виникненням підвищеного переохолодження в області впливу та підвищення в ній активності домішок, при цьому створюються умови для збільшення швидкості утворення нових центрів кристалізації; зменшенням міжфазового поверхневого натягу та в'язкості розплаву, що спрощує

процес переміщення атомів з рідкої в тверду фазу при формуванні центрів кристалізації; пришвидщенням термокапілярного масопереносу ліквідаційних виділень з простору поміж гілок дендритів.

Вважається, що основним механізмом подрібнення зерен є руйнування кристалів, що ростуть, під дією згинальних напруг, які виникають при коливанні рідкого металу навколо дендритів [14, 15]. Сили, що діють на дендрити, залежать від частоти і амплітуди коливань, фізичних властивостей металу та розмірів дендритів. Наголошується значний вплив на подрібнення первинного зерна процесів кавітації — утворення газових бульбашок у потоці рідини. Виконані розрахунки показують, що для сталі при швидкості потоку 50 см/с тиск, діючий на дендрит діаметром 1 мм і довжиною 10 мм, може бути недостатнім для його поломки. Але у разі руйнування кавітаційних бульбашок виникає тиск на кілька порядків вище порівняно з тиском рідини, що рухається [15].

За даними роботи [16], де автори порівняли зливки зі сталі 35, отримані з вібрацією та без неї, розмір дендритів зливка з дією вібрації зменшився в 5...8 разів у порівнянні зі звичайним зливком. При цьому в першому випадку структура виявилася більш щільною, а усадкова раковина мала в 1,5...2,0 рази меншу глибину. У роботі також представлені результати дослідження двох зливоків сталі 55Л, які мали масу 1 і 2 т та були оброблені за допомогою вібрації. Встановлено збільшення ударної в'язкості металу на 20,2 %, межі текучості — на 12,4 %, твердості — на 10 %. Також за експериментальними даними загальна тривалість затвердіння зливоків при накладанні вібрації скорочується на 20...25 % [12].

Загалом існує декілька способів накладання коливань, наприклад, через піддон, бокову стінку та вільну поверхню металевої ванни. Найбільш розповсюджений з них, це вібрація піддона. Цей спосіб особливий тим, що він безпосередньо впливає на фронт кристалізації, але він обмежується розмірами зливка, зі збільшенням висоти (відстані від джерела вібрації) його ефективність падає. Враховуючи, що коливання металу істотно слабшає при віддаленні від місця накладання, вібраційний вплив на структуру при кристалізації ефективний при виробництві зливоків порівняно невеликого розміру. Тому при отриманні сталевих зливоків великого тоннажу цей метод не знайшов застосування.

Перемішування металу. В металургії перемішування рідкого металу є важливою технологічною операцією, яка виконується з метою збільшення швидкості протікання технологічних

процесів, підвищення їх ефективності та поліпшення якості отриманої металопродукції. Метою перемішування при відливанні сталевих зливків є інтенсифікація теплообміну, вирівнювання температури і хімічного складу в об'ємі металу, що твердіє, а також вплив на фронт кристалізації.

Створення інтенсивного турбулентного руху розплаву веде до змішування більш гарячого металу в центрі зливка з більш холодним біля фронту кристалізації [15]. В результаті відбувається усереднення температури, хімічного складу металу та зменшення двофазної зони. Крім того, за рахунок руху металу відбувається винесення включень з дна металеві ванни до меніска. Також метал, що рухається вздовж фронту кристалізації, обламає гілки дендритів, які потім стають новими центрами кристалізації, і це сприяє зменшенню розміру зерна та збільшенню зони рівноосних кристалів.

Перемішування рідкої серцевини зливка широко застосовується при безперервному розливанні, де рух металу відбувається під дією електромагнітних сил шляхом встановлення зовнішніх джерел магнітного поля [17–20].

Накладання магнітного поля може відрізнятися напрямком (повздовжній, поперечний, радіальний), типом (біжуче, пульсуюче) і конкретними технічними параметрами (потужність, частота). Часто використовують багатозональні електромагнітні перемішувачі, які створюють біжуче або обертове магнітне поле.

Завдяки електромагнітному перемішуванню було усунуто такі дефекти безперервнолитих зливків, як: підкіркові бульбашки, хімічна неоднорідність по перерізу зливка, зменшена осьова пухкість та ширина зони стовпчастих дендритів [21–23].

Електромагнітне перемішування, напевно, є найчистішим методом впливу на рідкий метал. Та все ж цей спосіб обмежений глибиною проникнення магнітного поля, що не дає змогу впливати на метал у центральних областях зливків великого діаметра. Крім того, зі збільшенням перерізу зливка значно зростають габарити та вартість обладнання для електромагнітного перемішування. Тому при виробництві зливків, які відливають у виливниці, цей спосіб не знайшов застосування.

У літературі є відомості про використання іншого способу перемішування рідкої серцевини сталевих зливків, а саме — механічне перемішування за допомогою мішалки. Наприклад, такий спосіб підвищення якості великих зливків запропонований в патенті, згідно з яким в середину зливка вводиться пристрій у вигляді валу, що обертається [24]. До нижньої частини валу кріпляться лопатки, які призводять до руху рідкого

металу (рис. 3). Лопатки виготовляють з тієї ж марки сталі, що і зливков, що відливається. У міру затвердіння металу вал підіймається вгору, а лопатки поступово розчиняються у металевій ванні.

Описаний прийом перемішування серцевини сталевих зливків, що твердіє, вимагає створення спеціального, досить громіздкого обладнання для кріплення, переміщення та обертання валу, реалізувати його на практиці досить складно, у тому числі через необхідність використання матеріалів, які могли б тривалий час витримувати високу температуру. Тому механічне перемішування якщо і застосовується, то переважно при отриманні металів і сплавів з низькою температурою плавлення. Однак при застосуванні нових ефективних теплоізолюючих матеріалів не можна повністю виключити можливість використання такого виду перемішування при отриманні сталевих зливків.

Ефективним способом примусового перемішування рідкого металу, що набув широкого поширення в металургії, є продування металеві ванни інертним газом. При цьому, крім раніше згаданих позитивних ефектів, які відбуваються при активному перемішуванні металевих розплавів, газові бульбашки, що спливають, сприяють дегазації металу та видаленню з нього неметалевих включень.

Наприклад, у роботі [25] було експериментально перевірено вплив продувки рідкої фази в кристалізаторі при отриманні безперервного зливка. Для продування використали вогнестійкий пристрій типу багатосоплової фурми. За даними дослідження макроструктури і сірчистих відбитків поперечних і повздовжніх темплетів заготовок з 20 дослідних плавок було встановлено, що продування металу ар-

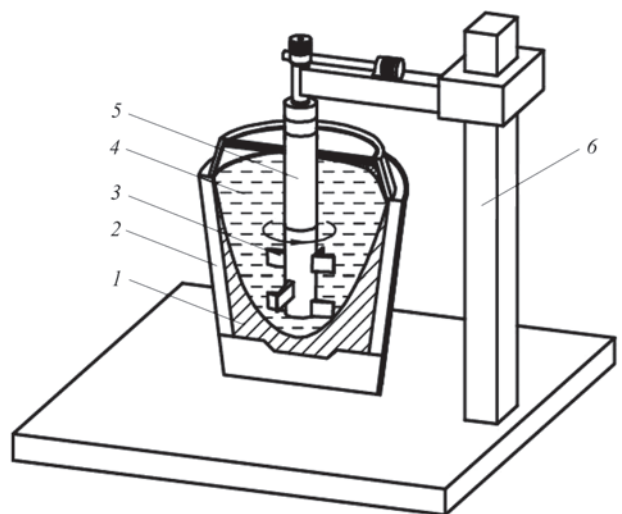


Рис. 3. Вид пристрою для механічного перемішування рідкої серцевини зливка: 1 — затверділий метал; 2 — виливниця; 3 — лопатки; 4 — рідкий метал; 5 — вал; 6 — стійка з механізмами кріплення та обертання валу

гоном в кристалізаторі сприяє розосередженню центральної пористості та осьової ліквідації.

Дослідження показують, що дисперсність дендритної структури збільшилася в 2...4 рази в порівнянні з контрольним зразком, виготовленим без продування. Причому ущільнення дендритів починається на відстані 18 мм від бічної поверхні та зберігається до осьової зони. Крім того, автори прийшли до висновку, що введений аргон відбирає незначну частину тепла розплаву і зменшує температуру в зоні барботажу.

Підведення тепла і металу в надлив. Вище розглянуті методи зовнішнього впливу на формування сталевих зливок передбачають той чи інший безпосередній, можна сказати прямий, вплив на зародження і зростання кристалів у рідкому металі. Підігрів металу в надлив, зокрема з підживленням, тобто з додатковою подачею металу в надлив для компенсації усадки, впливає на умови затвердіння за рахунок зміни теплового стану металевої ванни.

Відомі різні способи підведення додаткового тепла в надлив, які були випробувані для підвищення якості сталевих зливок, що отримуються традиційним розливом металу у виливницю. Всі вони передбачають використання зовнішнього джерела тепла, наприклад, індукційного або електродугового, який нагріває метал у верхній частині зливка. З них на практиці знайшли застосування лише технології, що ґрунтуються на електрошлаковому підігріві, які почали розвиватися в ІЄЗ ім. Є.О. Патона ще у середині минулого століття [26, 27]. Були розроблені і реалізовані в промисловості різні технології електрошлакового обігріву (ЕШО), електрошлакової розливки (ЕШР), електрошлакового обігріву та підживлення (ЕШО(п)).

Численні дослідження зливок масою від 2,5 до 75 т з конструкційних, підшипникових, штампових, валкових, нержавіючих і жароміцних сталей показали, що при способі зовнішнього впливу, що розглядається [28–30], практично повністю виключаються в піднадливковій частині зливка дефекти усадкового походження, особливо у варіанті з підживленням; метал рафінується шлаком від сірки та неметалевих включень, що проявляється у зниженні їх вмісту у верхній частині зливка, у той час, як при традиційному розливанні саме тут вони накопичуються у найбільшій кількості; у великих зливках ЕШО не виділяється характерна для звичайних зливок зона зворотної ліквідації в донній частині. Пояснюється це відсутністю при електрошлаковому обігріві дзеркала металу, так званого дощу падаючих кристалів; за рахунок виключення донного обрізу і зменшення головного

обрізу вихід придатного становить 90...95 % від загальної маси зливка.

Ці фактори, а також стримуючий вплив підведення тепла в надлив на зростання двофазної зони забезпечують вищу якість литого металу зливок ЕШО, ЕШР та ЕШО(п) порівняно з одержуваними традиційним способом.

Позитивна дія електрошлакового обігріву і підживлення була підтверджена на підприємствах «Gebr. Bohler & Co. AG» (Австрія) та «Terni» (Італія), де спосіб, що аналізується, отримав найменування BEST-процес (Bohler electroslag topping) та TREST-процес (Terni refractory electroslag topping), застосовувався для виробництва ковальських та листових зливок масою до 60 т [31–34]. Між собою вони відрізняються тим, що в першому використовують водоохолоджувану надливкову надставку, а в другому — футеровану. Внаслідок цього у розробленої в Австрії технології є можливість у більш широких межах варіювати температурою і складом шлаку і тим активніше впливати на умови кристалізації та рафінування металу.

Згідно з проведеними дослідженнями в зливках, отриманих BEST-процесом із середньовуглецевої Cr–Ni–Mo сталі, спостерігається суттєве зменшення зони зворотної ліквідації в донній частині при зниженні вмісту вуглецю всього на 0,02 % порівняно з ковшовою пробою. Також у донній частині відсутні характерні для звичайних зливок скупчення великих неметалевих включень. Вміст сірки в осьовій зоні до 2/3 висоти зливок зберігається на рівні вихідного в металі, що розливається, близько 0,01 %, а потім знижується до 0,003 %, що є результатом рафінування металу шлаком. Також у верхній частині зливок відзначається зниження вмісту неметалевих включень. Порівняно з аналогічними зливками звичайного виробництва відзначається зменшення осьової пористості і пухкості. У сукупності ці та інші фактори забезпечують кращі показники механічних властивостей металу, що отримується BEST-процесом.

Відповідно до роботи [35] густина металу зливок BEST у верхній їх половині істотно вище, ніж у зливок звичайного виробництва. Також відсутнє різке зниження густини в остовій зоні (рис. 4). Отримані з електрошлаковим підігрівом і підживленням зливки чистіші за вмістом не лише сульфідних неметалевих включень, що пов'язано з рафінуванням металу від сірки, а й оксидних включень (рис. 5).

Різновидом електрошлакового обігріву є розроблений в Японії спосіб ESHT (electroslag hot topping) згідно з яким шлакова ванна у футерованій вогнетривкими матеріалами надливковій

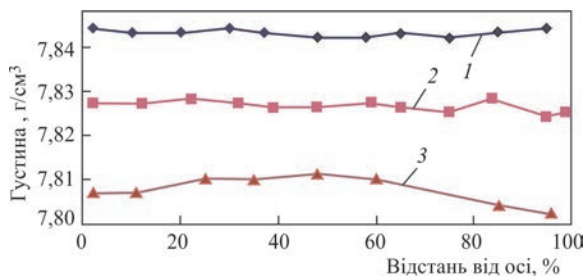


Рис. 4. Зміна густини сталі в ковальському зливку від бокової поверхні до осьової зони: 1 — зливок ЕШП; 2 — зливок BEST; 3 — зливок звичайної виплавки

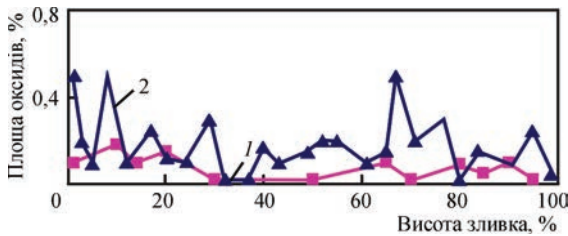


Рис. 5. Ступінь чистоти по оксидним включенням вздовж осі зливка: 1 — зливок ESHT-J; 2 — зливок звичайної виплавки

надставці нагрівається за допомогою трьох графітових електродів, підключених до трифазного джерела струму [36]. З відомостей, що є в літературі, незрозуміло, чи використовується при цьому процесі підживлення шляхом подачі в надлив металу тим чи іншим способом, як це передбачено у розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона сучасній установці для виробництва зливику масою до 200 т, де підживлення здійснюється за допомогою безструмового металевого електрода, який вводиться в шлакову ванну між трьома графітовими електродами (рис. 6) [37, 38].

Дані дослідження зливику масою 65...66 т із високохромистої легованої молібденом, кобальтом, ванадієм, азотом і бором роторної сталі, отриманих способом ESHT, показують, що мікроструктура та механічні властивості металу з їх центральних областей перебувають на рівні показників для близького за масою і складом зливка ЕШП [39].

Незважаючи на зазначений позитивний вплив розглянутого способу зовнішнього впливу на якість сталевих зливику, з розвитком за останні 15–20 рр. нових технологій утеплення металу в надлив з використанням екзотермічних сумішей та теплоізолюючих вкладишів, технології електрошлакового обігріву, головним чином через значні витрати на їх реалізацію, якщо й застосовуються, то в обмежених масштабах для вирішення конкретних завдань. Наприклад, при виробництві литих чавунних валків масою близько 50 т або при отриманні поковок роторів для виготовлення суперкритичних парових турбін.

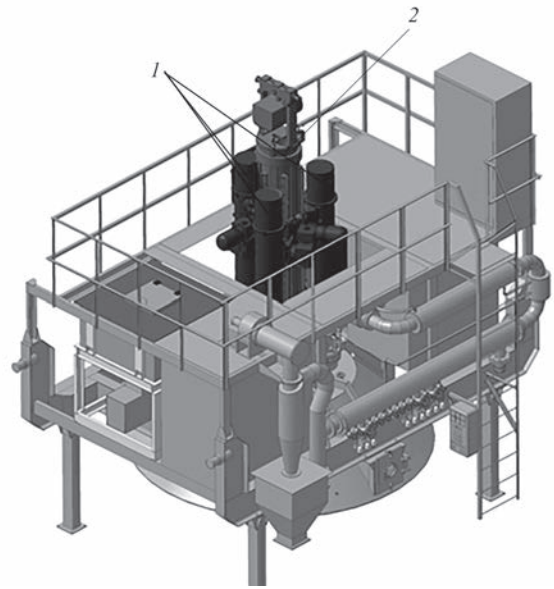


Рис. 6. Електрошлаковий нагрівач установки для виробництва зливику масою до 200 т: 1 — графітові електроди; 2 — механізм подачі безструмового електрода

Крім економічних причин широкому застосуванню електрошлакового обігріву і підживлення для отримання великих зливику масою 100 т і більше перешкоджає те, що дія додатково підведеного тепла слабшає в міру віддалення від поверхні металу, що обігрівається. Тому в зливках з великими геометричними розмірами стримуючого впливу підігріву може бути недостатньо для придушення утворення дефектів у найбільш проблемній зоні на відстані 2/3...3/4 їхньої висоти.

Висновки

1. Аналіз використання розглянутих способів зовнішнього впливу при отриманні сталевих зливику показує, що всі вони тією чи іншою мірою надають позитивний вплив на умови переходу металу з рідкого стану в твердий. Але найбільш дієвими з них, що знайшли застосування на практиці, є перемішування рідкої серцевини зливка, що кристалізується, та підведення додаткового тепла і металу в надлив. Однак для великих зливику застосування перемішування стикається з проблемою утворення на дзеркалі металу затверділої кірки і наявності в надлив шару теплоізолюючої суміші в напівтвердому стані. Це ускладнює, у тому числі через можливе забруднення металу, введення всередину зливка пристрою для перемішування. Що стосується додаткового підведення тепла, то через незначну природну конвекцію в металевій ванні, особливо в надлив, ускладнюється надходження більш гарячого металу з головної частини всередину зливка. Тому позитивна дія цього способу втрачає свою ефективність зі збільшенням геометричних параметрів зливка.

2. В той самий час поєднання цих двох способів зовнішнього впливу доповнюють один одного. При електрошлаковому обігріві дзеркало металу у надливці протягом тривалого часу зберігається в рідкому стані, а шар рідкої шлакової ванни не є перешкодою для подачі через неї пристрою для організації примусового руху металевих розплавів. У цьому випадку перемішування призводить до інтенсифікації масообмінних процесів у металевій ванні та сприяє переміщенню більш гарячого металу з надливу у внутрішні шари зливка.

3. Про необхідність вирішення проблеми теплопереносу для успішного застосування при виробництві великих зливок процесу електрошлакового підживлення зазначає у своїй аналітичній статті відомий фахівець у галузі спецелектрометалургії А. Mitchel [40]. У зв'язку з цим, зроблений висновок про поєднання перемішування рідкої серцевини зливка з додатковим підведенням тепла в надлив якраз і спрямований на вирішення цієї проблеми і такий прийом може бути перспективним для застосування з метою підвищення якості сталевих зливок.

Список літератури

1. Попович В., Кондир А., Плешаков А. та ін. (2009) *Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум*. Львів, Світ.
2. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. (1986) *Модифицирование и микролегирование чугуна и стали*. Т. 272. Москва, Металлургия.
3. Шаповалов В.О., Біктагіров Ф.К., Могилаченко В.Г. (2023) *Позапічне оброблення сталі: способи, процеси, технології*. Підручник. Київ, Хімджест.
4. Турбар В.П., Гаркаленко Д.М., Таболаєва Л.В. и др. (2009) Влияние модифицирования кальцием на качество колесной стали. *Металл и литье Украины*, 4–5, 55–58.
5. Кондратюк С.Є., Стоянова О.М., Щеглов В.М. та ін. (2015) Модифікування сталі нанорозмірними порошковими інокуляторами. *Металознавство та обробка металів*, 3, 3–7.
6. Щеглов В.М., Кондратюк С.Є., Примах І.Н. (2010) Підвищення ефективності модифікування сталі. *Металознавство та обробка металів*, 2, 51–57.
7. Соколов Н.А., Тузов Г.А., Ковалев Н.И. (1971) Влияние модифицирующих добавок на качество стали для отливки тонкостенных изложниц. *Теория и практика микролегирования и модифицирования сталей: Материалы респ. науч.-техн. конф., Донецк, 7–9 декабря 1971 г.*, с. 57.
8. Титаренко В.А., Шульте Ю.А. (1971) Влияние модифицирования на природу неметаллических включений и свойства стали. *Теория и практика микролегирования и модифицирования сталей: Материалы респ. науч.-техн. конф., Донецк, 7–9 декабря 1971 г.*, с. 72.
9. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Сасенко В.Я., Емельяненко Ю.Г. (1981) Управление кристаллизацией слитка путем ввода макрохолодильников при электрошлаковом переплаве. *Литье с применением инокуляторов*. Киев, ИПЛ АН УССР, 13–19.
10. Li C., Zhang Q., Zhu L. et al. (2021) Application of heat absorption method to improve quality of large steel ingot. *ISIJ Inter.*, 61(3), 865–870.
11. Xu Y., Wang J., Shuai S. et al. (2023) Improving microstructure and segregation of steel ingot by inorganic heat absorption method. *Materials Sci. and Technology*, 39(16), 1–12.
12. Могилаченко В.Г. (2019) Візуалізація твердіння виливка під впливом вібрації. *Теорія і практика металургії*, 4, 31–37.
13. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. (1998) *Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов*. Москва, Машиностроение.
14. Эльдарханов А.С. (1996) *Процессы кристаллизации в поле упругих волн*. Москва, Металлургия.
15. Ефимов В.А. (1998) Перспективы развития работ по применению внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся расплав. *Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл*: Сб. науч. тр. Киев, ИПЛ АН УССР, 3–21.
16. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. (1995) *Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов*. Москва, Металлургия.
17. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А. и др. (2002) *Процессы непрерывной разливки*. Донецк, ДонНТУ.
18. Wei C., Hezhou S., Taixu J. et al. (2009) Effect of mold electromagnetic stirring on quality of 0.60 °C steel casting billets. *Special Steel*, 30(5), 34.
19. Zeng J., Chen W., Zhang S. et al. (2015) Development and application of final permanent magnet stirring during continuous casting of high carbon rectangular billet. *ISIJ Inter.*, 55(10), 2142–2149.
20. Zeng J., Chen W., Zhang S. (2016) Experimental study of molten metal flow and numerical simulation of magnetic field during permanent magnet stirring and its application in continuous casting. *Metallurgical Research & Technology*, 113(6), 609–620.
21. Zeng J., Chen W.Q., Yang Y.D. et al. (2018) Effect of permanent magnet stirring on internal quality of steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(6), 576–583.
22. Xu Y., Wang E., Li Z. et al. (2017) Effects of vertical electromagnetic stirring on grain refinement and macrosegregation control of bearing steel billet in continuous casting. *J. of Iron and Steel Research Inter.*, 24(5), 483–489.
23. Yu H.Q., Zhu M.Y. (2012) Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking & Steelmaking*, 39(8), 574–584.
24. (2012) *Пристрій та спосіб виготовлення великогабаритних однорідних сталевих зливок з використанням самовитратної мішалки*. Китай, Пат. CN 102806322A: B22D 7/12 (2006.01). № 201210295047.6; заявл. 20.08.2012; опубл. 05.12.2012.
25. Хрыкин И.Н., Кан Ю.Е., Шумилин Б.Н. и др. (1980) Продувка металла в кристаллизаторе инертным газом. *Прогрессивные способы получения стальных слитков*. Сб. науч. тр. Киев, ИПЛ АН УССР, 37–43.
26. Тягун-Белоус Г.С., Дудко Д.А. (1958) Электрошлаковый обогрев неплавящимися электродами головной части слитков и фасонных отливок. *Автоматическая сварка*, 10, 36–43.
27. Тягун-Белоус Г.С. (1959) Уменьшение химической неоднородности фасонных отливок при электрошлаковой подпитке. *Автоматическая сварка*, 3, 51–57.
28. Бахрахов Н.Ф., Тулин Н.А., Немченко В.П. и др. (1978) *Электрошлаковая разливка стали*. Москва, Металлургия.
29. Биктагіров Ф.К., Воронин А.Е., Крутиков Р.Г. и др. (1984) Исследование электрошлаковой отливки крупных слитков. *Специальная электрометаллургия*, 56, 11–14.

30. Пшеничный Б.А., Воронин А.Е., Крутиков Р.Г. и др. (1985) Качество слитков электрошлаковой отливки. *Сб. Совершенствование процессов непрерывной разливки стали*, Киев, 133–137.
31. König H., Mayer K.-H., Keienburg K.-H. et al. (1990) Influence of Modern Melting Techniques on the Creep Behaviour of Heavy-Section Components of 1% CrMoV Steels. *Steel Res.*, 61(6), 274–278.
32. Tarmann R., Machner P., Kuhnelt G. (1979) Production of B.E.S.T. Ingots Weighing up to 55 Tons and Quality of the Forgings. *Berg-und Huttenmannische Monatshefte*, 124(5), 212–221.
33. Tochowicz S., Klisiewicz Z. (1979) Metallurgical Methods of Improving Steel Quality of Ingots for Large Forgings. *Hutnik (Katowice)*, 46(3), 106–111.
34. Basevi S., Repetto E., Scepi M. (1979) The TREST Process for Manufacturing a Cr–Mo–V HP Rotor Shaft. *Vacuum Metallurgy Conference on Special Melting*, 6 th., 773–784.
35. Kuhnelt G., Machner P. (1976) Das B.E.S.T. – Verfahren, ein neuer Weg zur Herstellung hochwertiger Schmiedeböcke. *BHM*, 121(5), 179–186.
36. Morinaka K., Futamura Y., Kitagawa V. et al. (1988) The manufacture of the large ESHT-J ingot. *Iron Steelmaker*, 15(4), 9–15.
37. (2014) *Установка для электрошлакового нагріву металів*. Україна, Пат. 106537 C22B 9/187. № a201214723; заявл. 21.12.2012; опубл. 10.09.2014.
38. Biktagirov F.K., Shapovalov V.A., Efimov M.V. et al. (2016) Installation for electroslag heating of a crop of large ingots of up to 200 ton mass. *Proc. of Medovar Memorial Sym.*, Kyiv, 7–10 June 2016, 207–210.
39. Nakano M., Kawano K., Mikami M. (2014) Manufactory of trial rotor forging of 9 % Cr steel containing Co and B (X13CrMoCoVNbNB9-2-1) for ultrasupercritical steam turbines. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants: Proc. of Seventh Inter. Conf., October 22–25, 2013 Waikoloa, Hawaii, USA*. ASM International, 321–332.
40. Mitchel A. (2005) The prospects for large forgings of segregation-sensitive alloys. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 2–6.
41. Popovych, V., Kondyr, A., Pleshakov, A. et al. (2009) *Technology of structural materials and materials science. Practical Work*. Lviv, Svit [in Ukrainian].
42. Goldshteyn, Ya.E., Mizin, V.G. (1986) *Modification and microalloying of cast iron and steel*. Vol. 272. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
43. Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Mogylenko, V.G. (2023) *Out-of-furnace processing of steel: Methods, processes, technologies: Manual*. Kyiv, Khimdist [in Ukrainian].
44. Turbar, V.P., Garkalenko, D.M., Tabolaeva, L.V. et al. (2009) Influence of modification by calcium on quality of wheel steel. *Metall i Litiyo Ukrainy*, 4–5, 55–58 [in Russian].
45. Kondratyuk, S.E., Stoyanova, O.M., Shcheglov, V.M. et al. (2015) Modification of steel by nanosized powder inoculators. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 3, 3–7 [in Ukrainian].
46. Shcheglov, V.M., Kondratyuk, S.E., Prymak, I.N. (2010) Improvement of efficiency of steel modification. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 2, 51–57 [in Ukrainian].
47. Sokolov, N.A., Tuzov, G.A., Kovalev, N.I. (1971) Influence of modifying additives on quality of steel for casting of thin-walled moulds. In: *Proc. of Rep. Sci.-Techn. Conf. on Theory and Practice of Microalloying and Modification of Steels (Donetsk, 7–9 December 1971)*, 57 [in Russian].
48. Titarenko, V.A., Shulte, Yu.A. (1971) Influence of modification on nature of nonmetallic inclusions and properties of steel. In: *Proc. of Rep. Sci.-Techn. Conf. on Theory and Practice of Microalloying and Modification of Steels (Donetsk, 7–9 December 1971)*, 72 [in Russian].
49. Paton, B.E., Medovar, B.I., Saenko, V.Ya., Emelyanenko, Yu.G. (1981) Control of ingot crystallization by introduction of macrocoolers in electroslag remelting. *Litiyo s Primeneniem Inoculatorov*, Kyiv, PTI MA NASU, 13–19 [in Russian].
50. Li, C., Zhang, Q., Zhu, L. et al. (2021) Application of heat absorption method to improve quality of large steel ingot. *ISIJ Inter.*, 61(3), 865–870.
51. Xu, Y., Wang, J., Shuai, S. et al. (2023) Improving microstructure and segregation of steel ingot by inorganic heat absorption method. *Materials Sci. and Technology*, 39(16), 1–12.
52. Mogylenko, V.G. (2019) Visualization of ingot solidification under vibration impact. *Teoriya i Praktyka Metalurgii*, 4, 31–37 [in Ukrainian].
53. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (1998) *Modern technologies of casting and crystallization of alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
54. Eldarkhanov, A.S. (1996) *Crystallization processes in the field of elastic waves*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
55. Efimov, V.A. (1998) *Prospects of development of works on application of external impacts on liquid and crystallizing melt*. Kyiv, Collect. of PTI MA NASU, 3–21 [in Russian].
56. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (1995) *Physical methods of impact on solidification processes of alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
57. Smirnov, A.N., Pilyushenko, V.L., Minaev, A.A. et al. (2002) *Processes of continuous casting*. Donetsk, DonNTU [in Russian].
58. Wei, C., Hezhou, S., Taixu, J. et al. (2009) Effect of mold electromagnetic stirring on quality of 0.60 °C steel casting billets. *Special Steel*, 30(5), 34.
59. Zeng, J., Chen, W., Zhang, S. et al. (2015) Development and application of final permanent magnet stirring during continuous casting of high carbon rectangular billet. *ISIJ Inter.*, 55(10), 2142–2149.
60. Zeng, J., Chen, W., Zhang, S. (2016) Experimental study of molten metal flow and numerical simulation of magnetic field during permanent magnet stirring and its application in continuous casting. *Metallurgical Research & Technology*, 113(6), 609–620.
61. Zeng, J., Chen, W.Q., Yang, Y.D. et al. (2018) Effect of permanent magnet stirring on internal quality of steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(6), 576–583.
62. Xu, Y., Wang, E., Li, Z. et al. (2017) Effects of vertical electromagnetic stirring on grain refinement and macrosegregation control of bearing steel billet in continuous casting. *J. of Iron and Steel Research Inter.*, 24(5), 483–489.
63. Yu, H.Q., Zhu, M.Y. (2012) Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking & Steelmaking*, 39(8), 574–584.
64. (2012) *Device and method of production of large-sized homogeneous steel ingots using self-consumable mixer*. China, Pat. 102806322A: B22D 7/12 (2006.01), No. 201210295047.6; Fill. 20.08.2012; Publ. 05.12.2012.
65. Khrykin, I.N., Kan, Yu.E., Shumilin, B.N. et al. (1980) Inert gas blowing of metal in mould. *Advanced methods of production of steel ingots*. Kyiv, Collect. of PTI MA NASU, 37–43 [in Russian].
66. Tyagun-Belous, G.S., Dudko, D.A. (1958) Nonconsumable electrode electroslag heating of ingot head and shaped castings. *Avtomatich. Svarka*, 10, 36–43 [in Russian].
67. Tyagun-Belous, G.S. (1959) Increase in chemical heterogeneity of shaped castings during electroslag hot topping. *Avtomatich. Svarka*, 3, 51–57 [in Russian].
68. Bastrakov, N.F., Tulin, N.A., Nemchenko, V.P. et al. (1978) *Electroslag casting of steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

29. Biktagirov, F.K., Voronin, A.E., Krutikov, R.G. et al. (1984) Investigation of electrosag casting of large ingots. *Spets. Elektrometallurgiya*, **56**, 11–14 [in Russian].
30. Pshenichny, B.A., Voronin, A.E., Krutikov, R.G. et al. (1985) Quality of ingots of electrosag casting: *Collect. on Improvement of continuous casting of ingots*. Kyiv, 133–137 [in Russian].
31. König, H., Mayer, K.-H., Keienburg, K.-H. et al. (1990) Influence of modern melting techniques on the creep behaviour of heavy-section components of 1 % CrMoV steels. *Steel Res.*, **61**(6), 274–278.
32. Tarmann, R., Machner, P., Kuhnelt, G. (1979) Production of B.E.S.T. ingots weighing up to 55 tons and quality of the forgings. *Berg- und Huttenmannische Monatshefte*, **124**(5), 212–221.
33. Tochowicz, S., Klisiewicz, Z. (1979) Metallurgical methods of improving steel quality of ingots for large forgings. *Hutnik (Katowice)*, **46**(3), 106–111.
34. Basevi, S., Repetto, E., Scepi, M. (1979) The TREST process for manufacturing a Cr–Mo–V HP rotor shaft. In: *Vacuum Metallurgy Conf. on Special Melting*, 6th, 773–784.
35. Kuhnelt, G., Machner, P. (1976) Das B.E.S.T. – Verfahren, ein neuer Weg zur Herstellung hochwertiger Schmiedeblocke. *BHM*, **121**(5), 179–186.
36. Morinaka, K., Futamura, Y., Kitagawa, V. et al. (1988) The manufacture of the large ESHT-J ingot. *Iron Steelmaker*, **15**(4), 9–15.
37. (2014) *Installation for electrosag heating of metals*. Ukraine, Pat. 106537, Int. Cl. C22B 9/187, No. a201214723; Fill. 21.12.2012; Publ. 10.09.2014.
38. Biktagirov, F.K., Shapovalov, V.A., Efimov, M.V. et al. (2016) Installation for electrosag heating of a crop of large ingots of up to 200 ton mass. In: *Proc. of Medovar Memorial Symp.* (Kyiv, 7–10 June 2016), 207–210.
39. Nakano, M., Kawano, K., Mikami, M. (2014) Manufactory of trial rotor forging of 9 % Cr steel containing Co and B (X13CrMoCoVNbNB9-2-1) for ultrasupercritical stream turbines. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*. In: *Proc. of Seventh Inter. Conf. (October 22–25, 2013 Waikoloa, Hawaii, USA)*. ASM Intern., 321–332.
40. Mitchel, A. (2005) The prospects for large forgings of segregation-sensitive alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 2–7.

APPLICATION OF EXTERNAL INFLUENCE IN THE PRODUCTION OF STEEL INGOTS. OVERVIEW

V.V. Barabash, F.K. Biktagirov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: barabash.vv@ukr.net

The article focuses on analyzing the utilization of external influences, such as metal modification, vibration, stirring the metal pool, and hot topping of steel ingots. It demonstrates the positive impact of external influences on the conditions of crystallization and solidification in various ingots. A conclusion was made that an effective approach to influencing the molding of a steel ingot can involve a combination of heating and stirring in the hot top by introducing a device into the core of the ingot, setting the liquid metal in motion. 40 Ref., 6 Fig.

Keywords: steel ingot, quality, external influences, modification, vibration, stirring, heat removal, metal, hot topping

Отримано 27.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 08.01.2024

Прийнято 13.02.2024

Велику Британію та Данію сполучив найдовший у світі електричний кабель

До енергетичних систем Великої Британії та Данії 29 грудня 2023 р. під'єднали 764-кілометровий підводний електричний кабель Viking Link, який вважається найдовшим у світі. Кабель Viking Link — перший, що сполучає Британію з Данією. Його використовуватимуть для постачання дешевшої електроенергії, якої вистачить на 2,5 млн домогосподарств і яку виробляють данські вітрові електростанції.

Кабель прокладений від данської комуни Ваєн у Південній Ютландії, а в Британії виходитиме на берег приблизно за 170 км на північ від Лондона. Переважна частина його розташована на дні Північного моря. Звичайна пропускна спроможність кабелю становить 800 МВт, але за потреби може збільшуватись до 1400 МВт. При цьому кабель може передавати електроенергію між двома країнами залежно від того, в який бік дме вітер. Наприклад, коли вітер дме із заходу, він спочатку потрапить до Великої Британії й тоді енергія може бути спрямована туди, де вітер дме слабше — тобто в Данію.

Роботи над Viking Link розпочалися у 2019 р. й тривали чотири роки, під час яких його прокладали на морському дні за допомогою спеціально побудованого корабля. Це вже шостий кабель, що з'єднує Британію з континентальною Європою.

Британський національний оператор електроенергії сподівається, що ці кабелі допоможуть Британії зменшити на близько 100 млн т викиди вуглецю, а до 2030 р. 90% енергії, імпортованої через її кабелі, буде надходити з джерел з нульовим рівнем викидів вуглекислого газу.

Північноатлантичний альянс у червні 2023 р. відкрив новий центр із захисту підводних трубопроводів і кабелів на тлі побоювань, що Росія може шпигувати за критичною підводною інфраструктурою західних країн.



Підстанція в Лінкольнширі, Велика Британія,
з якою сполучений Viking Link

<https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/01/3/7176642/>