

**Л.Б. Медовар¹, Г.П. Стівченко^{1,2}, Г.О. Полішко¹,
А.В. Сибір³, Д.В. Коломієць¹, Ю.В. Костецький¹**

¹ Інститут електроварювання ім. Є.О Патона НАН України,

вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна,

+38(044) 200-47-79, office@paton.kiev.ua

² Інжинірингова компанія «ЕЛМЕТ-РОЛ»,

а/с 259, Київ, 03150, Україна,

+38(044) 337-30-81, office@elmet-roll.com.ua

³ Національна металургійна академія України,

просп. Гагаріна, 4, Дніпро, 49600, Україна,

+38(056) 745-31-56, nmetau@nmetau.edu.ua

ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА РЕЙОК НАЙВИЩОГО ҐАТУНКУ В УКРАЇНІ



Вступ. Розвиток залізничного транспорту є необхідним чинником національного розвитку та європейської інтеграції України.

Проблематика. Станом на сьогодні понад 80 % рейок в коліях вітчизняної залізниці не відповідають вимогам швидкісного руху та пропуску великовагових поїздів і потребують заміни. Наразі ПАТ «Укрзалізниця» купує рейки за кордоном, що потребує суттєвих валютних затрат, а тому налагодження в країні виробництва високоякісних магістральних та вістрякових рейок стає нагальною необхідністю.

Мета. Розробка інноваційних варіантів організації виробництва рейок преміум класу в Україні.

Матеріали й методи. Рейкова сталь. Експериментальні плавки і металографічні дослідження (оптична та електронна мікроскопія).

Результати. Експериментально доведено високу однорідність (високу чистоту границь та дисперсність первинних зерен, малу міжламельну відстань перліту) та підвищений рівень властивостей рейкового металу, який виготовлено традиційним електрошлаковим переплавленням (ЕШП), та аналогічні показники металу зі зливків, вироблених ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі з вдвічі вищою швидкістю формування. Експериментами зі швидкісним ЕШП та випробуванням фторидного шлаку в кристалізаторі реальної машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) створено технологічне підґрунтя гібридного процесу безперервного литва з електрошлаковим підігрівом меніску струмопідвідним кристалізатором (БЛ+ЕШП).

Висновки. ЕШП дозволяє зменшити мінімальну порогову швидкість розливу на МБЛЗ, покращити щільність та однорідність металу осьової зони й зберегти високу якість поверхні заготовки. Розроблені й запропоновані перспективні варіанти технологічних схем електрошлакового переплавленням відпрацьованих рейок з одержанням заготовок з перетином, наближеним до профілю рейки, з використанням декількох сучасних печей ЕШП спеціальної конструкції забезпечать потребу ПАТ «Укрзалізниця» в магістральних та/або вістрякових рейках преміум якості.

Ключові слова: залізничні магістральні рейки, вістрякові рейки, рейкові сталі, МБЛЗ, ЕШП, гібридний процес, переробка відпрацьованих рейок.

Розвиток транспортної інфраструктури сьогодні в багатьох закордонних країнах є пріори-

тетним напрямком і рушійною силою економічного розвитку країни. Відповідно до амбітних цілей Національної транспортної стратегії «Drive Ukraine 2030» на період до 2030 року [1] розвиток транспорту також має стати одним з

ключових чинників національного розвитку та європейської інтеграції України. Стратегією передбачено створення умов для впровадження на залізничному транспорті високошвидкісного пасажирського руху (зі швидкістю руху до 400 км/год), експрес-доставки цінних вантажів (зі швидкістю руху до 350 км/год), прискореної доставки контейнерів (зі швидкістю руху не менш як 200 км/год), а також з'єднання обласних центрів мережею швидкісних (від 160 до 200 км/год – до 2025 року) та високошвидкісних (від 250 до 400 км/год – до 2030 року) залізниць, зокрема на основі державно-приватного партнерства.

Зрозуміло, що все це потребуватиме введення в дію нових ділянок залізничної колії з рейками високої якості для створення безпеки руху. Господарський підхід до реалізації запланованого має передбачати максимальне використання продукції вітчизняних виробників, яка, безумовно, має бути на рівні кращих світових зразків.

Виробництво рейок преміум якості потребуватиме оновлення наявних металургійних потужностей та, ймовірно, створення нових підприємств, технології і обладнання яких базуватимуться на інноваційних розробках Національної академії наук України та провідних установ із залученням приватних підприємств з метою максимально ефективного використання переваг державно-приватного партнерства.

Базові підходи до такого перспективного інноваційного проекту, який спрямовано на вирішення поставлених Стратегією завдань, розглянуто нижче.

ВИРОБНИЦТВО РЕЙОК В УКРАЇНІ НА СЬОГОДНІ

Загальновідомо, що в країнах з розвиненим швидкісним рухом пасажирських поїздів на швидкісних магістралях використовують рейки тільки вищої категорії якості, довжина яких сягає понад 100 м. Це зумовлено необхідністю забезпечення максимальної прямолінійності рейок, мінімальної кількості стиків для покра-

щення умов взаємодії рухомого складу із залізничною колією та забезпечення плавності руху поїздів [2, 3]. Наразі в нашій країні понад 80 % загальної кількості рейок, що укладено в залізничні колії ПАТ «Укрзалізниця», було виготовлено в різний час на ПАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь» (МК «Азовсталь») і належать вони до першої категорії якості [4]. Зважаючи на це, необхідність підвищення технічних характеристик рейок є актуальним завданням сьогодення, оскільки ПАТ «Укрзалізниця» змушено закуповувати рейки за кордоном, особливо для навантажених ділянок шляху. Організація ж швидкісного руху буде потребувати ще більшого обсягу імпорту рейок. Програмою «Метінвест Холдингу», частиною якого є ПАТ «МК «Азовсталь», передбачено перехід на виготовлення рейок вищої категорії якості довжиною 50–100 метрів, але це потребує і суттєвих капітальних витрат, і часу на реконструкцію або встановлення нового оснащення [5]. На сьогодні рейки не є пріоритетом виробника, але вони залишаються в портфелі продукції компанії. Це пов'язано як з кон'юктурою ринку, так, на наш погляд, і з тим, що невирішеними є деякі питання технології їх сталеплавильного виробництва, про які йшла мова в роботах [6, 7].

Окрім вирішення проблеми виготовлення якісних магістральних рейок в Україні, важливим є й пошук ефективних технологій виробництва вістрякових рейок, які використовують для виготовлення стрілочних переводів. Найчастіше вістрякові рейки виготовляють шляхом стругання рейкових деталей або фрезеруванням, що потребує суттєвих часових та матеріальних витрат [8, 9]. Тому необхідним є пошук нових підходів, серед яких, вважаємо, перспективним рішенням може стати застосування електрошлакових технологій для підвищення якості рейкової сталі. Застосування гібридної технології виплавки/розливки рейкового металу, що поєднує переваги безперервного литва та електрошлакового переплавлення, відкриває нові можливості для отримання

високоякісного рейкового металу, зокрема й сучасних заевтектоїдних марок [10–13]. Запропоновані нові технічні рішення [14] дають реальну можливість вітчизняним виробникам вже сьогодні організувати випуск рейок вищої категорії якості.

ГІБРИДНИЙ ПРОЦЕС БЕЗПЕРЕВНОГО ЛИТТЯ З ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ ПІДІГРІВОМ МЕНІСКУ (БЛ + ЕШП)

Однією з проблем якості рейок є поява дефектів в осьовій частині заготовки, спричинених ліквіацією та усадкою в металі, який твердне, та які суттєво зменшують термін служби рейок. Виникнення останніх пов'язано з відсутністю достатнього перемішування та підживлення останніх порцій рідкого металу в глибокій лунці заготовки. Висока швидкість розливу безперервнолитої заготовки (від 0,5 м до декількох метрів за хвилину, залежно від її перерізу) призводить до утворення дуже глибокої рідкої лунки: навіть для заготовки квадрату 200 × 200 мм, довжина рідкої лунки сягає до 7 м при різній швидкості витягування. Природно, що за таких умов підживлення усадки безперервнолитої заготовки в її осьовій частині є обмеженим і, як наслідок, з'являються дефекти ліквіації та пористість. Однак, значно зменшити глибину рідкої лунки неможливо, адже існує певна нижня межа швидкості розливання на машинах безперервного лиття заготовок, поза якою відбувається підморожування меніску й поверхня заготовки стає непридатною для подальшої прокатки [15, 16].

Тому, щоб знизити зазначений поріг мінімальної швидкості розливу й запобігти утворенню гофрів, запропоновано використати електрошлаковий обігрів меніску й зони контакту шлакової суміші з кристалізатором. Таке рішення дозволить зберегти якість поверхні безперервнолитої заготовки при одночасному покращенні щільності й однорідності осьової зони за рахунок зменшення швидкості розливу і, відповідно, призведе до зменшення глибини двофазної зони та глибини рідкометалевої ван-

ни (металургійної довжини безперервно литої заготовки).

Результати математичного моделювання формування круглої безперервнолитої заготовки діаметром 500 мм з вуглецевої сталі при різних швидкостях розливу (200–500 мм/хв з кроком 100 мм/хв) показали практично прямолінійну залежність глибини як рідкометалевої ванни, так і двофазної зони від швидкості розливу [17]. Важливим є й встановлений факт, що пряма залежність металургійної довжини глибини рідкометалевої ванни швидкості розливання збереглася навіть при врахуванні впливу чотирьох зон вторинного охолодження (довжини зон розпилення вторинного охолодження прийняті рівними: зона 1 – 5000 мм; зона 2 – 6000 мм; зона 3 – 11 000 мм; зона 4 – 11 000 мм (дві останні – це послідовно розташовані секції охолодження, що відрізняються інтенсивністю подачі води), що відповідає геометрії МБЛЗ ДМК, м. Кам'янське).

Одержана за розрахунками величина зменшення глибини двофазної зони з 29 м до 11 м (зменшення майже втричі) при зниженні швидкості розливу в кристалізатор діаметром 500 мм до 300 мм/хв, дозволяє припустити, що гібридний процес розливу з електрошлаковим обігрівом [17] може дати друге життя напівбезперервній розливці ковальських злиwkів великого перерізу на вертикальних машинах [18]. Істотне зменшення частки рідкого металу, що перебуває в двофазній зоні, свідчить про перспективність запропонованого способу зниження швидкості розливу для попередження утворення осьової неоднорідності та усадкових ефектів.

Результати порівняльного дослідження макроструктури й всебічної оцінки мікроструктури модельних злиwkів ЕШП, які також було отримано при різній швидкості витягування (20 і 40 мм/хв відповідно) дали підстави для аналогічних висновків.

В обох зливках спостерігається наявність пластинчастого перліту й ділянки глобулярного перліту, де зустрічаються фрагменти це-

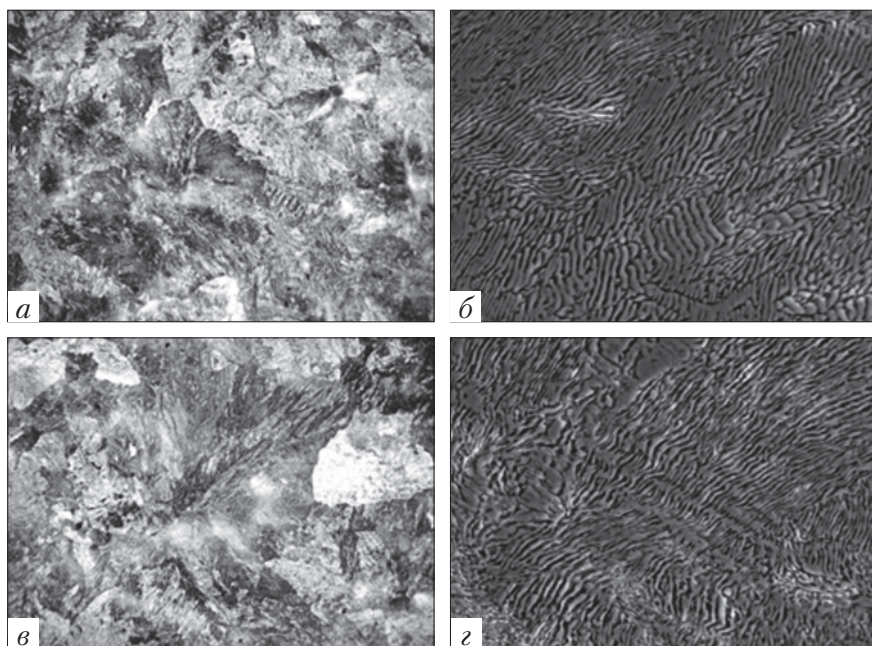


Рис. 1. Мікроструктура зразків металу модельних зливок ЕШП, сформованих з різною швидкістю витяжки: 1 – 20 мм/хв; 2 – 40 мм/хв; а, в – зображення під оптичним мікроскопом; б, г – СЕМ (збільшення $\times 100$)

ментитної фази, які зазнають перетворення в глобулярні форми цементиту (рис. 1). Це, ймовірно, пов'язано з нерівномірністю розподілу елементів і тривалістю перебування металу в температурному інтервалі перлітного перетворення (від 650 до 550 °С). Загалом мікроструктура обох зливок однорідна, щільна, без будь-яких виділень фаз по границях зерен. Відстань між первинними і вторинними осями дендритів в першому й другому зливках дещо відрізняється (табл. 1).

Відомо, що чим більш подрібнена структура металу, тим більш однорідним він є, кращими є його властивості в литому стані і, відповідно, в кінцевому продукті. Відстань між первинними і вторинними осями гілок дендритів є прямим показником дрібності первинної дендритної структури.

Виявлено типову перлітну мікроструктуру з тонкої ламеллю цементиту в обох зливках ЕШП. Кількісна оцінка міжпластинчастої відстані в перліті показала, що обидва зливки ЕШП рейкової сталі К76Ф практично ідентичні (відстань 0,54 і 0,76 мкм відповідно). Ці значення є вищими, порівняно з міжпластин-

частою відстанню в зразках рейкової сталі преміум класу після деформації та термічної обробки (відстань становить близько 0,2 мкм), оскільки дослідження було виконано на литому металі без будь-якої деформації та термічної обробки, які підвищують дисперсність перліту.

Розмір перлітних зерен в зливку ЕШП зі швидкістю витягування 20 мм/хв становить 100–120 мкм, субзерен – 20–30 мкм, тоді як розмір перлітних зерен в зливку, отриманому за швидкості витягування 40 мм/хв досягає 60–100 мкм, а субзерен – 10–15 мкм. Тобто, навіть незначне зниження швидкості подачі металу при поступовому формуванні зливка чинить позитивний вплив на його структуру. Також підвищується і щільність металу зливка

Таблиця 1

Розмір структурних складових в ЕШП зливках рейкової сталі діаметром 180 мм

Швидкість витяжки зливка, мм/хв	Відстань між первинними осями, мкм	Відстань між вторинними осями, мкм	Міжпластинчаста відстань в перліті, мкм
20	248	82	0,74
40	162	43	0,56

за рахунок покращення підживлення усадки, що сприяє усуненню центральної неоднорідності зливка. Висновки математичного моделювання підтверджуються й результатами дослідження металу зливоків ЕШП, які було одержано із застосуванням струмопідвідних кристалізаторів (Ø110–620 мм) в лабораторних умовах Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в різний час [19–21].

Зважаючи на вищевикладені результати, було розроблено декілька оригінальних технічних рішень процесу електрошлакового переплавлення, які є доцільними для впровадження у виробництво рейок і повністю відповідають концепції «кругової економіки» [22]. На сьогодні всі інновації проходять процедуру перевірки патентної чистоти для одержання національного пріоритету.

Запропоновану технологічну лінію гібридного процесу БЛ+ЕШП схематично наведено на рис. 2. Технічні рішення, покладені в основу цієї технології, було випробувано на промисловій МБЛЗ на етапі можливості використання шлаку ЕШП для розливання сталі, та в лабораторних умовах на етапі використання електрошлакового нагріву для попередження кристалізації меніску при електрошлаковому процесі з використанням рідкого металу.

Ключовим питанням реалізації комбінованого процесу БЛ+ЕШП може стати логістика процесу розливання «плавка на плавку» на машині безперервного лиття, які зазвичай мають дві-шість ліній витягування (струмки). Розрахунок для діючої МБЛЗ МК «Азов-сталь», де середня вага плавок становить 350 т, показує, що для гібридного процесу можна задіяти тільки один струмок, оскільки суттєве зниження продуктивності не дасть змогу повністю розлити плавку протягом визначеного часу. З огляду на те, що потреба в рейках найвищого ґатунку для України на рік сягає біля 10 % (10 000–15 000 т) від загальної потреби України в магістральних рейках, вищезазначеного процесу може бути достатньо для її задоволення. При переведенні всієї машини на

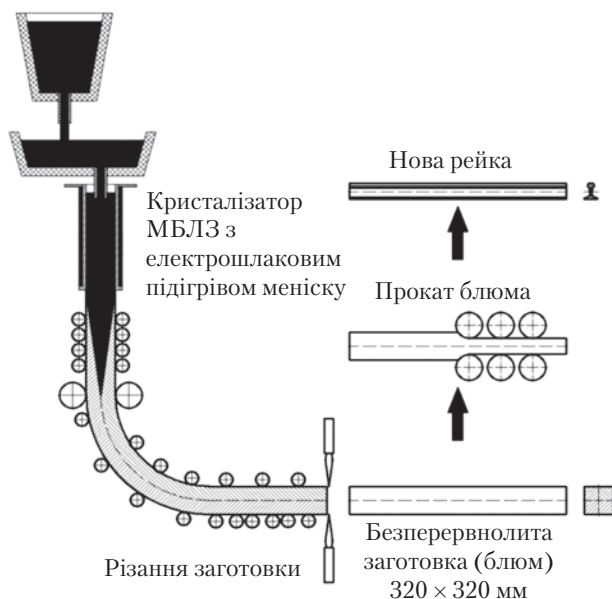


Рис. 2. Технологічна схема гібридного процесу розливання металу на агрегаті БЛ+ЕШП

зниження швидкості в 5 разів для забезпечення адекватного часу розливання потрібно або скоротити об'єм металу, що випускається з дугової сталеплавильної печі (ДСП) в ківш, або здійснювати ділення плавки на дві частини з їх послідовною подачею на установку ківш-піч (УКП) та вакуумування, або ж виконувати додатковий підігрів металу в ковші або промковші при одночасному збільшенні перерізу заготовки, що розливається. Логістика операцій при впровадженні нової технології розливання БЛ+ЕШП потребуватиме чіткого розрахунку та налагодження, але принципова сумісність поєднання різних швидкостей розливу на багатострумковій МБЛЗ або загальне зниження її продуктивності є очевидними.

Таким чином, гібридний процес БЛ+ЕШП може бути реалізовано як на одному струмці діючої МБЛЗ, так і на всій діючій МБЛЗ і, вочевидь, на новому агрегаті, конструкцію якого може бути виготовлено в декількох варіантах.

Процес підігріву меніску для попередження утворення поверхневих дефектів при зниженій швидкості розливу можна реалізувати у струмопідвідному кристалізаторі (СПК) з по-

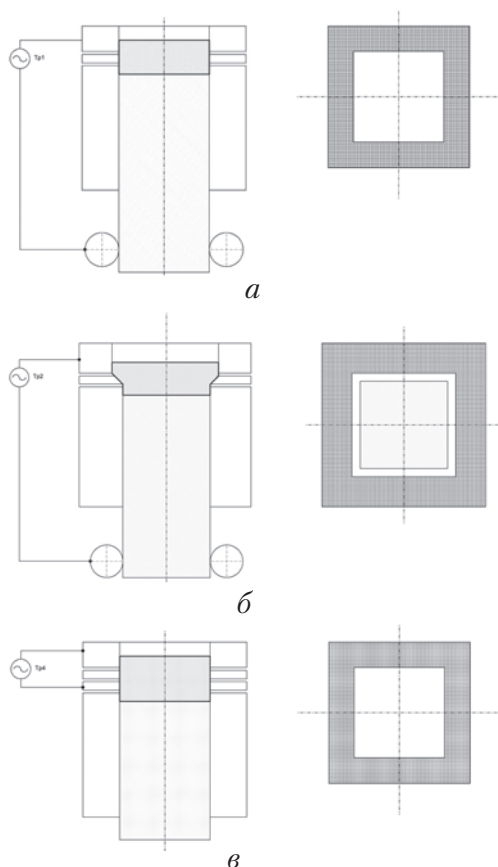


Рис. 3. Варіанти реалізації гібридного процесу БЛ + ЕШП з підключенням струму до тягнутих роликів машини з використанням струмопідвідного кристалізатора постійного перетину (*а*), з ширенням (*б*), а також зі замиканням струму між секціями струмопідвідного кристалізатора (*в*)

стійним перетином (рис. 3, *а*) або ширенням (рис. 3, *б*) при нижньому підводі струму через тягучий пристрій, або за схемою з замиканням струму між секціями струмопідвідного кристалізатора (рис. 3, *в*).

Останній варіант електричної схеми є найбільш перспективним як за простотою реалізації, так і за мінімальними витратами електроенергії, але може супроводжуватися підвищеною ерозією мідного кристалізатора, якої можна уникнути використанням інших матеріалів для виготовлення верхньої секції, оцінка ефективності використання яких, з точки зору терміну служби та мінімального забруд-

нення металу, що розливають, потребує проведення натурних випробувань на пілотному зразку новоствореного кристалізатора.

Безумовно, для впровадження в промисловість нового процесу БЛ+ЕШП необхідно буде здійснити всі необхідні кваліфікаційні випробування рейок: визначення в'язкості руйнування (статичної та циклічної тріщиностійкості), характеристик втоми, залишкової напружки в підшві рейок тощо, з метою гарантування їх високих експлуатаційних показників та економічної ефективності.

ЕФЕКТИВНА ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ПЕРЕРОБКА ВІДПРАЦЬОВАНИХ РЕЙОК

Пошуки можливостей виготовлення рейок найвищого гатунку в Україні призвели до формування ще кількох варіантів ефективної промислової реалізації електрошлакової технології, які ґрунтуються на сучасних тенденціях циркулярної економіки і ключових початкових положеннях:

- ✦ Україна має як нагальну необхідність створення, так і реальні можливості для організації власного виробництва сучасних рейок;
- ✦ ключовим чинником підвищення якості рейок в сучасному технологічному циклі є впровадження процесу безперервного розливу, а ЕШП є дієвим методом обігріву металу в кристалізаторі МБЛЗ, що дозволяє знизити швидкість розливання/витагування зливка й призводить до зниження центральної неоднорідності БЛЗ;
- ✦ існує технічна можливість переплавлення рейок, знятих з колій після закінчення терміну служби;
- ✦ для виробництва сучасних рейкових сталей електрошлаковим способом необхідно реалізувати переплавлення в захисній атмосфері електродів з низьким вмістом водню (1 ppm) й кисню (5–10 ppm) і, відповідно, зі збереженням цього рівня в зливках;
- ✦ незважаючи на те, що свого часу висока собівартість ЕШП призупинила його застосування при виробництві рейок (порівняльна

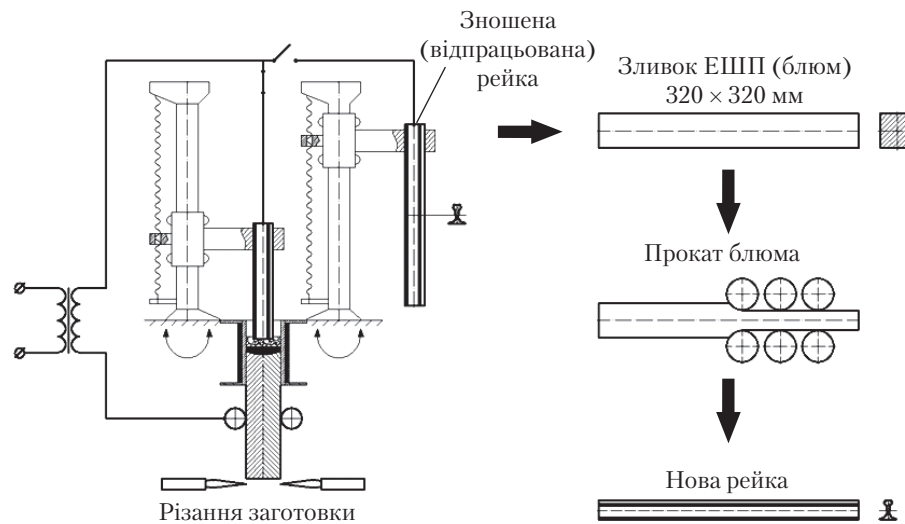


Рис. 4. Схема ЕШП на сучасній печі ЕШП із захисною атмосферою та зміною старих рейок, як витратних електродів

оцінка 1990-х років за результатами виготовлення дослідно-промислової партії рейок з металу ЕШП, показала, що собівартість виробництва рейок з металу ЕШП і аналогічних за традиційною технологією (у цінах 1990 р.) становила 332–339 руб/т та 160 руб/т відповідно). Сьогодні, за загальносвітовим досвідом, при застосуванні електрошлакових технологій можна очікувати збільшення собівартості рейок не більше, ніж на 0,2–0,3 дол. США на 1 кг рейок, що є найбільшим показником навіть при традиційних швидкостях формування зливка в електрошлаковому переплавленні витратних електродів), що робить виправданим та доцільним впровадження їх для виробництва рейок преміум-якості.

Зрозуміло, що використання струмопідвідних кристалізаторів в гібридному процесі і, тим більше, печей ЕШП для переробки відпрацьованих рейок, потребують певних енергозатрат. Попередні розрахунки необхідної потужності, яка визначає витрати енергоносіїв при реалізації рекомендованого в цьому дослідженні процесів ЕШП рейок (також і для комбінованого процесу розливання рейкових сталей БЛ+ЕШП) показали, що для кристалізатора квадратного

перерізу 320×320 мм вони становлять не більше $400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Таким чином, переплавлення відпрацьованих рейок на сучасному обладнанні ЕШП, навіть за песимістичним прогнозом, забезпечить зниження їх собівартості, порівняно зі стандартною технологією переплавлення ЕШП, щонайменше на третину. Однак, при використанні новітніх технологій і обладнання переплавлення та за умови вилучених із колії рейок як витратних електродів, ситуація буде на користь запропонованих технічних рішень, оскільки зазвичай вартість електроду складає біля половини собівартості рейки.

В ході роботи розроблено й запропоновано декілька варіантів технологічних схем виробництва рейок преміум якості, які дозволяють організувати процес переплавлення відпрацьованих рейок з одержанням заготовки, розміри яких або відповідають розмірам заготовки МБЛЗ, яку використовують для прокату рейок, або є максимально наближеними до профілю рейки для зменшення витрат на деформування.

Перший варіант організації процесу наведено на рисунку 4.

В Україні наразі відсутні печі ЕШП сучасної конструкції з захисною атмосферою й змі-

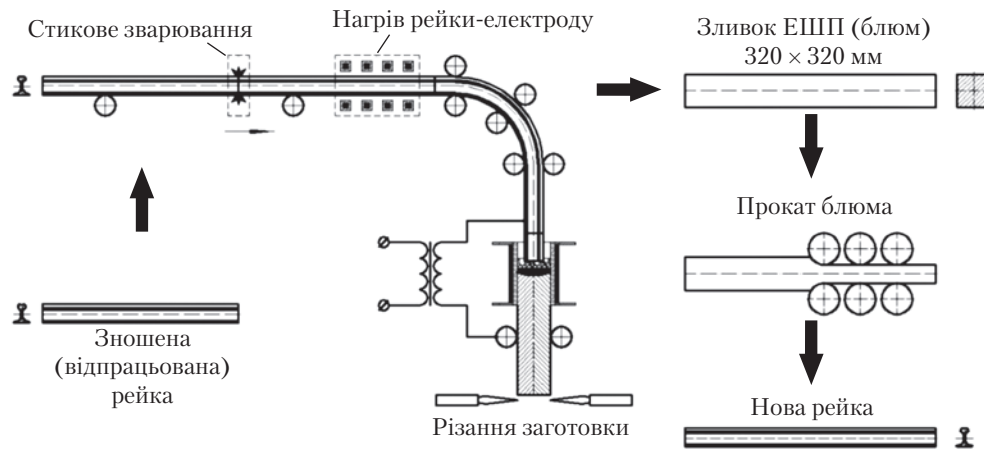


Рис. 5. Схема напівбезперервного ЕШП відпрацьованих рейок

ною електродів, що, з одного боку, ускладнює реалізацію запропонованого процесу переплавлення рейок, а з іншого — дозволяє запропонувати спеціалізовану конструкцію печі ЕШП з додатковими устаткуваннями, що дають змогу перетворити процес переплавлення на напівбезперервний. Концепція спеціалізованої печі ЕШП для переплавлення відпрацьованих рейок полягає в тому, що в кристалізатор, зокрема й струмопідвідний (рис. 5), безперервно подається відпрацьована рейка через горизонтальний пристрій індукційного нагріву з наступним загином її на 90° .

Переплавлення старих рейок у нові в захисній атмосфері не супроводжується суттєвими втратами легуючих елементів, заліза тощо, а шлакова обробка металу забезпечує чистоту сталі та сприятливу морфологію неметалевих включень.

Орієнтовні показники ваги, довжини й швидкості подачі рейок Р65 (100 м такої рейки має вагу 6,5 т), що будуть передані на переплавлення, а також швидкості витягування зливка ЕШП різного розміру наведено в табл. 2.

Зважаючи на численні обговорення з фахівцями «Укрзалізниця», як було вже зазначено, останніми роками потреба країни в рейках найвищого гатунку щороку складає біля 10 000–15 000 т, або ж приблизно 70–110 км колії з рейок Р65. Таку кількість металу ЕШП віль-

но може забезпечити 4–6 сучасних спеціалізованих установок електрошлакового переплавлення в захисній атмосфері, а використання щонайменше подвійної швидкості переплавлення без зниження якості металу сприятиме формуванню цінової конкурентоздатності зазначеної продукції. Такий мікрозавод доцільно б побудувати у складі ПАТ «Укрзалізниця», яке знімає відпрацьовані магістральні рейки із залізничного шляху, або ж на металургійному заводі, що має прокатний стан для виготовлення рейок. На жаль, на сьогодні обидва прокатні стани, які можуть в Україні виготовляти рейки, є застарілими й потребують суттєвої модернізації або заміни.

Таблиця 2

Орієнтовні розмірні й вагові показники відпрацьованих рейок для процесу ЕШП

Характеристики	Розмір зливка ЕШП, мм × мм		
	320 × 320	400 × 400	400 × 500
Вага одного метра зливка, т	0,8	1,25	1,57
Швидкість ЕШП, кг/год	600	1000	1500
Лінійна швидкість витягування ЕШП, м/год	0,6–0,85	0,75–0,90	0,90–1,05
Лінійна швидкість подачі рейок на переплавлення, м/год	8–10	13–15	20–25

Найефективнішим використанням запропонованого методу може стати виробництво вістрякових рейок із заготовок з максимально наближеним до необхідного розміру перетином. При переробці старих рейок структура металу ЕШП має високу щільність і якість, що забезпечить виняткові властивості вістрякових рейок за невисокої собівартості останніх при переробці старих рейок. Використання електрошлакових технологій для виготовлення вістрякових рейок може суттєво знизити й витрати на їх механічну обробку та підвищити термін експлуатації відповідальних вузлів рейкового полотна за рахунок високої якості металу ЕШП.

Таким чином, для гібридного процесу БЛ + ЕШП, який дозволяє суттєво знизити швидкість витягування заготовки за рахунок підгріву меніску й покращити щільність та однорід-

ність металу заготовки за збереження якості її поверхні, розроблено схеми його практичної реалізації з використанням струмомідиного кристалізатора.

Металографічними дослідженнями металу ЕШП доведено, що завдяки вищій чистоті границь зерен відсутні зернограничі виділення домішок, що забезпечує підвищений рівень властивостей металу, зокрема пластичності.

Запропоновано нові перспективні схеми виробництва нових рейок методом електрошлакового переплавлення на спеціалізованому мікрозаводі (умовно — мікрозавод у складі «Укрзалізниці»), які, за використання декількох сучасних печей ЕШП спеціальної конструкції, дозволять забезпечити переплавлення старих рейок з мінімальними затратами легуючих та одержанням заготовок для магістральних та/або вістрякових рейок преміум якості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-nacionalnoyi-transportnoyi-strategiyi-ukrayini-na-period-do-2030-roku> (дата звернення: 13.06.2018).
2. Sirong Yi. Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment: Theory and Practice. URL: <https://www.science-direct.com/science/book/9780128128879> (дата звернення: 15.06.2018).
3. Рынок рельсов: российская продукция вытесняет импорт. URL: <http://www.indexbox.ru/news/rossijskie-relysy-vytesnyayut-import/2016>: Index box (дата звернення: 15.06.2018).
4. «Укрзалізниця» переходить на рельсы высшей категории, которые изготовлены «Азовсталью». URL: <http://mrpl.city/news/view/ukrzaliznytsya-perehodit-na-relysy-vysshej-kategorii-kotorye-izgotovleny-azovstalju> (дата звернення: 31.07.2018).
5. АЗОВСТАЛЬ планирует освоить производство рельсов нового образца. URL: <http://https://azovstal.metinvestholding.com/ru/press/news/show/2589> (дата звернення: 31.07.2018).
6. Медовар Л.Б., Стовпченко Г.П., Полішко Г.О., Педченко Є.О., Зайцев В.А. Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 1. Сучасні умови експлуатації рейок і дефекти, що зменшують строк їх служби. *Современная электрометаллургия*. 2018. № 1. С. 3–7. <https://doi.org/10.15407/sem2018.01.01>
7. Медовар Л.Б., Стовпченко Г.П., Полішко Г.О., Коломієць Д.О., Педченко Є.О., Зайцев В.А. Сучасні рейкові сталі і можливості ЕШП (Огляд) Повідомлення 2. Вимоги стандартів до хімічного складу сталі для залізних. *Современная электрометаллургия*. 2018. № 2. С. 28–36. <https://doi.org/10.15407/sem2018.02.03>
8. ГОСТ Р 55820-2013 Рельсы железнодорожные остряковые. Технические условия.
9. Максимов А.Б., Гофман Л.Д., Кибалов А.А. Система управления качеством производства остряковых рельсов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2008. № 1. С. 125–128.
10. Ordóñez Olivares R., Garcia C.I., Robles Henr ndez F.C. Metallurgy of high-carbon steels for railroad applications. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, V. 113, no. 2. P. 155–162, Feb. 2013. Available at: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532013000200016&lng=en&nrm=iso Accessed on: 31 July 2018.
11. Girsch G., Jörg A., Schoech W. Managing rail life to match performance and cut costs. *Railway Gazette International*, 2010 (August), 45–48. URL: <https://www.speno.ch/images/speno-docs/english/RGIN-1008-rail%20steels%20article-hi%20res.pdf> Accessed on: 31 July 2018.
12. Ordóñez R., Garcia C.I., Deardo A., Kalay S. New rail steels for the 21st century. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2009, MS and T'09*. 3. 1614–1624.

13. Pointner P. High strength rail steels – The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear*, 2008. V. 265, no. 9–10. P. 1373–1379.
14. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И., Руденко П.М., Антипин Е.В. Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*. 2016. № 5–6. С. 7–16. <https://doi.org/10.15407/as2016.06.01>
15. Lee G.-G., Thomas B.G., Kim S.-H., Shin H.-J., Baek S.-K., Choi C.-H., Kim D.-S., Yu S.-J. Microstructure Near Corners of Continuous-Cast Steel Slabs Showing Three-Dimensional Frozen Meniscus at Hooks. *Acta Materialia*. 2007. V. 55, no. 20. P. 6705–6712.
16. Lee G.-G., Shin H.-J., Thomas B.G., Kim S.-H., Kim D.-S., Yu S.-J. *Three-dimensional Microstructure of Frozen Meniscus and Hook in Continuous-cast Ultra-low-carbon Steel Slabs*. AISTech 2007, Steelmaking Conference Proc., (May 7–10, 2007, Indianapolis, IN), AIST, Warrendale, PA. Vol. 1. P. 1–10.
17. Медовар Л.Б., Стопченко А.П., Сибір А.В., Волченков Е.А., Педченко Е.А., Полишко А.А., Лебедь В.А. Моделирование непрерывной разливки комбинированным процессом МНЛЗ + ЭШП. *Современная электрометаллургия*. 2017. № 4. С. 3–7. <https://doi.org/10.15407/sem2017.04.01>
18. JUMBO BLOOM VERTICAL CASTER. URL: <http://www.timkensteel.com/what-we-make/high-performance-steel/jumbo-bloom-vertical-caster> (дата звернення: 31.07.2018)
19. Медовар Л.Б., Цыкуленко А.К., Федоровский Б.Б., Шевченко В.Е., Лацман И.А., Грабовский Ц.Ф., Ус В.И., Петренко В.Л. О формировании поверхности слитков из никелевых суперсплавов при ЭШП в токопроводящем кристаллизаторе. *Проблемы СЭМ*. 2000. № 4. С. 7–14.
20. Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Стопченко А.П., Цыкуленко А.К., Шевченко Н.Т., Журавель В.М., Полишко А.А., ..., Лебедь В.А. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков. *Современная электрометаллургия*. 2010. № 3. С. 5–10.
21. Полишко А.А. Укрупнение слитков последовательным кольцевым электрошлаковым наплавлением. *Современная электрометаллургия*. 2012. Т. 2, № 107. С. 14–16.
22. Jouni Korhonen, Antero Honkasalo, Jyri Seppälä. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*. 2018. № 143. С. 37–46.

REFERENCES

1. About the praise of the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-nacionalnoyi-transportnoyi-strategiyi-ukrayini-na-period-do-2030-roku> (Last accessed: 13.06.2018).
2. Sirong Yi. Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment: Theory and Practice. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128128879> (Last accessed: 15.06.2018).
3. Rail market: Russian products crowd out imports. URL: <http://www.indexbox.ru/news/rossijskie-relyy-vytesnyayut-import/2016>: Index box (Last accessed: 15.06.2018).
4. “Ukrzaliznytsia” passes to the rails of the highest category, which are made by “Azovstal”. URL: <http://mrpl.city/news/view/ukrzhaliznytsya-perehodit-na-relyy-vysshej-kategorii-kotorye-izgotovleny-azovstalyu> (Last accessed: 31.07.2018).
5. AZOVSTAL plans to master the production of a new type of rail. URL: <https://azovstal.metinvestholding.com/ru/press/news/show/2589> (Last accessed: 31.07.2018).
6. Medovar, L. B., Stovpchenko, G. P., Polishko, G. O., Pedchenko, E. A., Zaitsev, V. A. (2018). Modern rail steels and solutions ESR (Review). Information 1. Operating conditions and defects observed. *Sovremennaya electrometallurgiya*, 1, 3–7. <https://doi.org/10.15407/sem2018.01.01> [in Ukrainian].
7. Medovar, L. B., Stovpchenko, A. P., Polishko, A. A., Kolomiets, D. A., Pedchenko, E. A., Zaitsev, V. A. (2018). Modern rail steels. application of ESR (Review). Information 2. Requirements of standards to chemical composition of steels for railway rails of main-line tracks. *Sovremennaya electrometallurgiya*, 2, 28–36. <https://doi.org/10.15407/sem2018.02.03> [in Ukrainian].
8. GOST R 55820-2013 Switch and crossing rails. Specifications.
9. Maksymov, A. B., Gofman, L., D., Kibalov, A. A. (2008). Quality management system for switch rails. *Innovative Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 1, 125–128 [in Russian].
10. Ordóñez Olivares, R., Garcia, C. I., Robles Henrández, F. C. (2013). Metallurgy of high-carbon steels for railroad applications. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 113(2), 155–162. URL: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532013000200016&lng=en&nrm=iso Accessed on: 31 July 2018.
11. Girsch, G., Jörg, A., Schoech, W. Managing rail life to match performance and cut costs. *Railway Gazette International*, 2010 (August), 45–48. URL: <https://www.speno.ch/images/speno-docs/english/RGIN-1008-rail%20steels%20article-hi%20res.pdf> Accessed on: 31 July 2018.

12. Ordonez, R., Garcia, C. I., Deardo, A., Kalay, S. (2009). New rail steels for the 21st century. *Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2009, MS and T'09*. V. 3. 1614–1624.
13. Pointner, P. (2008). High strength rail steels. The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear*, 265 (9–10), 1373–1379.
14. Kuchuk-Yatsenko, S. I., Didkovsky, A. V., Shvets, V. I., Rudenko, P. M., Antipin, E. V. (2016). Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *Avtomaticheskaya svarka*, 5–6, 7–16. <https://doi.org/10.15407/as2016.06.01> [in Russian].
15. Lee, G.-G., Thomas, B. G., Kim, S.-H., Shin, H.-J., Baek, S.-K., Choi, C.-H., Kim, D.-S., Yu, S.-J. (2007). Microstructure Near Corners of Continuous-Cast Steel Slabs Showing Three-Dimensional Frozen Meniscus at Hooks. *Acta Materialia*, 55 (20), 6705–6712.
16. Lee, G.-G., Shin, H.-J., Thomas, B. G., Kim, S.-H., Kim, D.-S., Yu, S.-J. (2007). Three-dimensional Microstructure of Frozen Meniscus and Hook in Continuous-cast Ultra-low-carbon Steel Slabs. *AISTech 2007, Steelmaking Conference Proc.*, (May 7–10, 2007, Indianapolis, IN), AIST, Warrendale, PA., v. 1, 1–10.
17. Medovar, L. B., Stovpchenko, A. P., Sibir, A. V., Volchenkov, Ye. A., Pedchenko, E. A., Polishko, A. A., Lebed, V. A. (2017). Modeling of continuous casting by combined process of MCCB + ESR. *Sovremennaya electrometallurgiya*, 4, 3–7. <https://doi.org/10.15407/sem2017.04.01> [in Russian].
18. JUMBO BLOOM VERTICAL CASTER. URL: <http://www.timkensteel.com/what-we-make/high-performance-steel/jumbo-bloom-vertical-caster> (Last accessed: 31.07.2018).
19. Medovar, L. B., Tsykulyenko, A. K., Fedorovskii, B. B., Shevchenko, N. T., Latsman, I. A., Grabovskiy, Ts. F., Petrenko, V. L. (2000). About formation of the surface of nickel superalloy ingots during ESR in a current conductive mold. *Problemy SEM*, 4, 7–14 [in Russian].
20. Medovar, L. B., Saenko, V. Ya., Stovpchenko, A. P., Tsykulyenko, A. K., Shevchenko, N. T., Zhuravel, V. M., Polishko, A. A., ..., Lebed, V. A. (2010). Electroslag technology of production of large forging ingots. *Sovremennaya electrometallurgiya*, 3, 5–10 [in Russian].
21. Polishko, A. A. (2012). Enlarging ingots by successive circumferential electroslag surfacing. *Sovremennaya electrometallurgiya*, 2 (107), 14–16 [in Russian].
22. Korhonen, Jouni, Honkasalo, Antero, Seppälä, Jyri. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46.

Стаття надійшла до редакції / Received 20.02.19

Статтю прорецензовано / Revised 21.04.19

Статтю підписано до друку / Accepted 24.06.19

Medovar, L.¹, Stovpchenko, G.^{1,2}, Polishko, G.¹, Sibir, A.³,
Kolomiets, D.¹, and Kostetsky, Yu.¹

¹ Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11, Kazymyra Malevycha St., Kyiv, 03150, Ukraine,
+38 044 200 47 79, office@paton.kiev.ua

² ELMET-ROLL Engineering Company,
P.O. Box 259, Kyiv, 03150, Ukraine,
+38 044 337 30 81, office@elmet-roll.com.ua

³ National Metallurgical Academy of Ukraine,
Gagarina Ave., 4, Dnipro, Ukraine,
+38 056 745 31 56, nmetau@nmetau.edu.ua

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR MANUFACTURING HIGH-QUALITY RAILS IN UKRAINE

Introduction. The development of railway transport is a necessary factor in the national development and European integration of Ukraine.

Problem Statement. Nowadays, over 80% of rail tracks in the national railway do not meet the requirements for bearing high-speed and heavy-load trains and require replacement. At present, *Ukrainian Railways* corporation buys rails in foreign countries, which requires significant foreign exchange costs, and therefore the manufacture of high-quality mainstream and switch point rails in our country becomes an urgent need.

Purpose. To develop innovative options for organizing the production of premium rails in Ukraine.

Materials and Methods. Rail steel. Experimental melting and metallographic studies (using the optical and electron microscopy methods).

Results. A high homogeneity (high purity of boundaries and dispersion of primary grains, small inter-lamellar distance of perlite), enhanced properties of the rail metal ensured by conventional electroslag remelting (ESR), and similar characteristic of ingot steel produced by ESR in the current-supplying mold with twice as fast speed of formation have been experimentally proved. Experiments with high-speed ESR and test of fluoride slag in the mold on real continuous casting machine has created the technological framework for a hybrid process of continuous casting with electroslag heating of the meniscus in current-supplying mold (CC + ESR).

Conclusions. ESR enables to reduce the minimum hump speed for casting, to improve the density and uniformity of the metal of the axial zone, and to maintain a high quality of the ingot surface. Promising options of technological schemes of waste rail ESR for obtaining the billets with cross-section close to the rail profile have been developed and proposed. Using several modern ESR furnaces with special design will enable to satisfy needs of *Ukrainian Railways* corporation in high-quality mainstream and switch point rails.

Keywords: railway, main rail, switch rail, rail steel, CC, ESR, hybrid process, and recycling of used rails.

Л.Б. Медовар¹, А.П. Стівченко^{1,2}, А.А. Полишко¹, А.В. Сибір³,
Д.В. Коломієць¹, Ю.В. Костецький¹

¹ Інститут електросварки ім. Е.О Патона НАН України,
ул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна,
+38 044 200 47 79, office@paton.kiev.ua

² Інжинирингова компанія «ЕЛМЕТ-РОЛ»,
а/я 259, Київ, 03150, Україна,
+38 044 337 30 81, office@elmet-roll.com.ua

³ Національна металургічна академія України,
просп. Гагарина, 4, Дніпро, Україна,
+38 056 745 31 56, nmetau@nmetau.edu.ua

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ В УКРАИНЕ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА

Вступлення. Развитие железнодорожного транспорта является необходимым фактором национального развития и европейской интеграции Украины.

Проблематика. На сегодня более 80 % рельсов в путях отечественной железной дороги не соответствуют требованиям скоростного движения и пропуска тяжеловесных поездов и требуют замены. Сейчас ОАО «Укрзалізниця» покупает рельсы за рубежом, что требует существенных валютных затрат, а поэтому налаживание в стране производства высококачественных магистральных и остряковых рельсов становится насущной необходимостью.

Цель. Разработка инновационных вариантов организации производства рельсов премиум класса в Украине.

Материалы и методы. Рельсовая сталь. Экспериментальные плавки и металлографические исследования (оптическая и электронная микроскопия).

Результаты. Экспериментально доказана высокая однородность (высокую чистоту границ и дисперсность первичных зерен, малое межламеллярное расстояние в перлите) и повышенный уровень свойств рельсового металла, изготовленного традиционным электрошлаковым переплавом (ЭШП), и аналогичные показатели металла из слитков, произведенных путем ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе с вдвое более высокой скоростью формирования. Экспериментами со скоростным ЭШП и испытанием фторидного шлака в кристаллизаторе реальной машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) создана технологическая основа гибридного процесса непрерывного литья с электрошлаковым подогревом мениска токоподводящим кристаллизатором (НЛ + ЭШП).

Выводы. ЭШП позволяет уменьшить минимальную пороговую скорость разлива на МНЛЗ, улучшить плотность и однородность металла осевой зоны и сохранить высокое качество поверхности заготовки. Разработанные и предложенные перспективные варианты технологических схем электрошлакового переплава отработанных рельсов с получением заготовок сечением, приближенным к профилю рельса, с использованием нескольких современных печей ЭШП специальной конструкции позволят обеспечить потребность ОАО «Укрзалізниця» в магистральных и/или остряковых рельсах премиум качества.

Ключевые слова: железнодорожные магистральные рельсы, остряки рельсы, рельсовые стали, МНЛЗ, ЭШП, гибридный процесс, переработка отработанных рельсов.