Г. О. Сребрянський, канд. техн. наук., ст. викладач,
e-mail: amorphus@ukr.net

Нікопольський технікум Національної металургійної академії України (Нікополь, Україна)

АЛЬТЕРНАТИВНИЙ ПОГЛЯД НА ОДЕРЖАННЯ МЕТАЛЕВОЇ СМУГИ З РОЗПЛАВУ

Розглянуто технології одержання металевого листа безпосередньо з розплаву на двовалковому модулі і одновалковим розливанням. Показано перспективність і економічну вигоду такого способу одержання листа. Проаналізовано закордонний досвід одержання сталевих листів розливанням між валками. Розглянуто і співставлено конструкції двовалкових установок різних фірм та вироблених ними продукцію. Одержуваний на двовалковому модулі лист по суті є напівфабрикатом для подальшої холодної прокатки на товщини 0,1 мм і менше, що вимагає додаткової холодної прокатки. Вивчено переваги і недоліки механізму формування листа в міжвалковому зазорі, конструкцію валків-кристалізаторів, матеріал бічних обмежувачів і розливних сопел. Вказано сортамент прецизійних сплавів, які застосовуються в товщині менше 1 мм. Ці сплави після загартування розплаву набувають сукупність унікальних властивостей, недосяжних при традиційних металургійних обробках. Проведено порівняння конструкцій промислових двовалкових і одновалкових установок різних фірм. Показано можливість використання конструкції валків із водяним охолодженням в якості барабана-холодильника одновалкового розливання, а також придатність матеріалу бічних обмежувачів для розливних сопел при одержанні стрічки на барабані-холодильнику. Обґрунтовано перспективність одержання стрічки прецизійних мікрокристалічних сплавів мікронних товщин безпосередньо з розплаву саме одновалковим розливанням.

Ключові слова: розплав, стрічка, смуга, валок, одновалкове розливання, барабан-холодильник, прецизійний сплав.

Одержання металевих смуг з розплаву методами безперервного розливання – одна з перспективних сучасних наукомістких і енергозберігаючих металургійних технологій, що ведуть свій початок від способу Генрі Бессемера з розливання сталі між двома валками [1–5]. Перспектива одержання тонкого листа безпосередньо з рідкої сталі приваблива, і промислова реалізація цього процесу триває й у цей час. Виробництво тонкого листа прокаткою розплаву на двовалковому модулі виключає з технологічної схеми нагрів і гарячу прокатку слябів з відповідним скороченням енерго- і працезатрат, знижує капітальні витрати на створення обладнання, значно знижує шкідливі викиди в атмосферу і т. д. [3, 4].

Багаторічні інтенсивні дослідження, що незалежно в багатьох країнах проводили провідні металургійні і машинобудівні компанії, привели до створення промислової технології безперервного розливання тонкої смуги на вертикальному двовалковому модулі (рис. 1) [6].

Рис. 1. Принципова схема одержання листа на двовалковому ливарному модулі

Фірми Німеччини, Італії, Франції й Австрії об'єднали свої зусилля в проєкті Eurostrip, у рамках якого створено дві промислові установки для розливання нержавіючих і вуглецевих сталей. В 1999 р. розлито першу промислову плавку нержавіючої сталі масою 36 тонн із одержанням листа товщиною 3 мм і шириною 1100 мм, який обтискували до 0,8 мм на стані холодної прокатки, відпалювали й оцінювали за діючими стандартами. Поверхневі дефекти були відсутні, чистота листа була вища, за звичайну, і підвищилася корозійна стійкість [3]. В 2000 р. американська фірма Nucor, австралійська BHP (Broken Hill Proprietary) і японська IHI (Ishikawajima Heavy Industries) створили проєкт Castrip з метою одержання листа з розплаву у двовалковому кристалізаторі товщиною 1 мм і шириною 1524 мм на першому етапі, а потім довести товщину до 0,6 мм і ширину до 2000 мм [3, 4]. Аналогічна технологія розроблялася в проєкті фірми Nippon Steel і Mitsubishi Heavy Industries (Японія) і в проєкті німецької фірми SMS Demag AG зі швейцарською MAIN AG/Marti–Technologie AG продуктивністю до декількох тисяч тонн у рік. Таким способом одержують лист товщиною 1–5 мм із нержавіючої і маловуглецевої сталі [3, 5–10]. Подальше зменшення товщини листа до 0,1–0,5 мм в електротехнічних сталях зі змістом кремнію до 4,5–6 % привело до більш низьких втрат на перемагнічуванні, порівняно із традиційними [11, 12]. Швидкість охолодження при цьому $\sim 10^3$ – 10^4 К/с дозволила отримати зерно 3–10 мкм і запас пластичності для наступної холодної прокатки (іншими способами отримати лист такого складу і товщини не вдається через високу крихкість металу).

Одержуваний на двовалковому модулі лист – по суті напівфабрикат (початкова заготовка) для подальшої холодної прокатки на менші товщини (0,1 мм і менше), що знижує ефективність процесу через необхідність декількох проходжень із проміжними відпалами (особливо для мікронних товщин). У той же час проєкти одновалкових машин для розливання такого тонкого листа не отримали розвитку [3].

Ціль даної роботи – спробувати спростувати останнє твердження і показати перспективність саме одновалкового розливання для одержання листа тонше 1 мм.

Як правило, на двовалкових машинах одержують листи з нержавіючих і інших сталей, тобто матеріалів, що не переходять в аморфний стан навіть при більш високих швидкостях охолодження розплаву (до $\sim 10^7$ К/с). У той же час ряд сплавів (так звані «мікрокристалічні») товщиною 0,1 мм менш успішно застосовуються в різних областях техніки [13]. Зазвичай це прецизійні сплави (від франц. *précision* — точність) – металеві сплави з особливими фізичними властивостями [14]. Вони створюють особливу групу сплавів, завдяки високому рівню властивих їм фізичних і хімічних властивостей, обумовлених точністю хімічного складу, відсутністю шкідливих домішок і відповідною структурою сплаву. Застосовуються в точному приладобудуванні, автоматичній й інших галузях техніки; використовуються переважно у вигляді тонкої стрічки і дроту, а також у вигляді кувань, листа, прутиків, поліметалевого дроту і стрічки [14]. Але масштаби їх виробництва значно менші за традиційні вуглецеві і нержавіючі сталі, тому що для досягнення найвищого рівня властивостей у цих сплавах необхідні, як правило, особливі способи виплавки і деформування, спеціальні режими термічної обробки, якісна обробка поверхні та висока культура експлуатації обладнання. Напрошується висновок доцільності застосування до цієї групи сплавів технологій загартування розплаву, що успішно використовують для одержання аморфних сплавів [15]. Таке загартування забезпечує в цих сплавах дуже дрібне зерно (від нанометрів до декількох мікронів), тому їх називали мікрокристалічними [13]. Залежно від технології одержання вони діляться за сортаментом: стрічка (від 20 до 100 мкм); смуга (від 100 до ~ 500 мкм товщиною); волокно; дріт і порошок, що визначає галузь застосування. Кожний сортамент може бути кінцевим продуктом або напівфабрикатом для подальшого переділу. У нашому випадку розглядаються дві перші позиції зазначеного сортаменту, оскільки їх теоретично можна одержати і прокаткою розплаву між валками, і подачею розплаву на поверхню барабана-холодильника [16]. При цьому в зазначений діапазон товщини стрічки вписуються наступні прецизійні

сплави: пермалой (79НМ і 50Н – 50–100мкм); ніхром і фехраль (Х20Н80 і Х23Ю5Т – 100–150мкм); елінвар (36НХТЮ – 10–300мкм); ковар (29НК – 10мкм); магнітно-м'які (34НКМП і 49К2ФА – 20–100мкм) [17], та інші. Як правило, вони підлягають подальшій термообробці для оптимізації експлуатаційних характеристик.

Відомо, що загартовування розплаву між валками і на поверхні барабана-холодильника ряду мікрокристалічних сплавів (у тому числі й прецизійних) дає цікаві властивості [18]:

- сплав Fe–Al–Si (сендаст) – найкращий матеріал для головок аудіо- і відеозапису, у стрічці товщиною 20–30 мкм, отриманої з розплаву, має технологічну пластичність (у традиційному виді – абсолютно крихкий);

- сплави Fe–Si(4–6,5 %) з низькими ватними втратами (трансформаторна сталь) у товщині 0,2–0,3 мм одержати складно через низьку пластичність, але після загартовування розплаву і відпалу стрічки товщиною від 0,15 до 0,3 мм пластичні і катаються на задану товщину;

- магнітострикційні сплави Fe–Al для ультразвукових випромінювачів в установках безперервного розливання сталі (альтернатива сплавам на основі нікелю) важко піддаються деформуванню, для одержання товщини ~100 мкм необхідно ~30 переділів (вихід придатного ~25–30 %), а після загартовування з розплаву стрічки товщиною 0,2–0,3 мм прокочуються з обтисненням до 100 %;

- лезова стрічка 65Х13 після традиційної обробки має розмір карбідів ≈3 мкм пластинчастої форми, а після загартовування з розплаву розмір карбідів ≈0,3 мкм, причому глобулярної форми;

- магнітотверді сплави, що використовуються в якості носіїв інформації (для «чорних ящиків» літальних апаратів) здобувають високу пластичність і більш високу температурну межу стабільності магнітних властивостей (до +750 °С);

- у пружинних сплавах підвищується температурний діапазон пружних властивостей;

- сплави опору для нагрівачів (типу Х23Ю5Т, Х27Ю5А, Х27Ю5Т) відносяться до сплавів, що важко деформуються, але після загартовування з розплаву легко прокочуються в холодному стані на задану товщину;

- у сплавах систем Al–Fe–Si і Cu–12%Al після загартовування з розплаву поліпшується ефект пам'яті форми.

Таким чином, загартовування розплаву дозволяє одержувати не тільки матеріали нового класу з унікальними властивостями, але й у традиційних металургійних матеріалах набувати нові властивості. Причому, одержання стрічки або листа безпосередньо з розплаву з високою швидкістю виключає багато металургійних переділів: кування, гарячу і холодну прокатку із численними проміжними відпалами.

Але промислова технологія прокатки розплаву має ряд проблем: вибір матеріалу валків і відвід тепла із зони кристалізації, матеріал бічних стінок-обмежувачів і їх конструкція, забезпечення постійного рівня сталі в кристалізаторі з точністю ±2 мм і запобігання коливання поверхні розплаву [3]. Умовно ці проблеми можна згрупувати в такі блоки: матеріал і розміри валків-кристалізаторів; матеріал кераміки для підведення розплаву і бічних обмежувачів; організація стабільного підведення розплаву в міжвалковий зазор при збереженні постійності розходу.

Формування смуги (рис. 2) при прокатці розплаву відбувається в три стадії [19]. Спочатку відбувається інтенсивний тепловідвід від розплаву в поверхню валків, потім починається утворення і ріст твердої

Рис. 2. Схема формування смуги при прокатці розплаву між валками

кірки металу на поверхні валків (відбір тепла триває). Потім ці кірки змикаються в міжвалковому зазорі і деформуються, утворюючи готову смугу. І чим більше діаметр валків, тим довшою буде зона охолодження й деформації.

Аналіз конструкції промислових двовалкових ливарних установок показує, що поки немає єдиної думки про оптимальний діаметр валків. Так, фірма Castrip використовує валки діаметром 0,5 м, фірма Nippon — 1,2 м, а фірма Eurostrip — 1,5 м. Але мікротопографія поверхні валків на промислових ливарних агрегатах невідома, тому що ці характеристики стосуються комерційно даних, що охороняються [6].

Збільшення діаметра валків знижує теплове навантаження і температуру їх поверхні, що дозволяє розливати при тій же швидкості більший об'єм металу, краще відбирання тепла й зростає продуктивність установки [20]. Крім того, зі збільшенням діаметра валків розширюється зона деформації (рис. 2) і збільшується зона контакту розплаву з валками, тобто створюються умови більш стабільного процесу лиття [21]. Якщо їх поверхня (бандаж) при цьому виготовлена з матеріалу з високою теплопровідністю, то швидкість охолодження буде вищою, структура стрічки більш дисперсною, а властивості вищими.

Але збільшення діаметра валків ускладнює проектування керамічних сопел для подачі розплаву в міжвалковий зазор через збільшення відстані від нижнього зрізу сопла до місця контакту з валками. Якщо при цьому потік розплаву плоский, то потрібно враховувати ефект інверсії потоку – плоский струмінь починає деформуватися вже на відстані декількох міліметрів від зрізу сопла [22]. Тому нижній зріз сопла повинен бути, по можливості, якнайближче до поверхні ванни. Потрібно також враховувати в протилежному випадку збуреність її поверхні внаслідок гідродару потоку розплаву. Крім цього, необхідно примусове охолодження валків, тому що об'єми розливання від десятків (сотень) кілограмів до десятків тонн.

Очевидно, що при збільшенні діаметра валків товщина смуги, що виготовляють, буде більшою через ряд причин. По-перше, нижній зріз сопла розташовуватиметься далі від міжвалкового зазору (стілки сопла мають кінцевий розмір з міркувань конструктивної міцності, і сопло неможливо наблизити до зазору). Тому висота ванни рідкого металу в цьому зазорі буде більшою. По-друге, через більшу висоту ванни час формування твердих скоринок на поверхні валків буде більший, а самі кірки товстіші (рис. 2), і після їхнього змикання кінцева товщина смуги збільшиться. Збільшення товщини смуги, з одного боку, – позитивний фактор для росту продуктивності установки, а з іншого – негативний, тому що для одержання більш тонкого перетину знадобиться додаткова холодна прокатка, і, можливо, за кілька проходів із проміжними відпалами.

Таким чином, збільшення діаметра валків дозволяє підвищити продуктивність установки, але знижує можливість одержувати смугу (стрічку) тонше 1 мм, яка необхідна для спеціальних сплавів [17, 18].

У той же час тонку смугу (аморфну або мікрокристалічну стрічку) стабільно одержують розливанням плоского струменя на зовнішній поверхні барабана-холодильника [13, 16, 18]. І в цьому випадку діаметр барабана має істотне значення – чим більше, тем краще з погляду умов тепловідводу. При цьому зберігаються зазначені вище переваги (зменшується теплове навантаження, кращий тепловідвід, вища продуктивність та ін.). Беручи до уваги діаметри валків-кристалізаторів [6], видно, що діапазон 0,5÷1,5 м узгоджується з величинами 1,0÷1,2 м, отриманими для барабана-холодильника в роботі [23] при одержанні аморфних стрічок. Крім того, в промисловому виробництві аморфних сплавів у вигляді стрічок товщиною 20–100 мкм шириною до 150 мм успішно використовуються водоохолоджуючі барабани діаметром 0,8–1,0 м.

З аналізу літературних даних про виробництво смуги і стрічки різними фірмами різних країн видно, що смугу товщиною менше 1 мм одержують на двовалкових установках з діаметром валків ≤ 500 мм (таблиця). Мінімальна товщина смуги (0,2÷0,9 мм) виходить у валках діаметром 500–550 мм, а 0,1÷0,5 мм – з діаметром 330–340 мм

Таблиця

Параметри і продукція дво- і одновалкових установок

Параметри двовалкових установок безперервного лиття смуги							
Країна	Фірма	Маса плавки, т	Швидкість лиття, м/хв.	Діаметр валків, мм (матеріал поверхні валків)	Товщина смуги, мм	Ширини смуги, мм	Матеріал
Німеччина	Eurostrip	90	60–100	1500	1,5–4,5	1100–1450	корозійностійка сталь
Італія		60	40–100	800/150, Cu	2–3	1130–1350	корозійностійка, вуглецева, спеціаль- на сталі
США	Nucor-hp-ili	110	80	500	1–2	1345–2000	вуглецева сталь
Франція	Myosotis	92	20–80	1500, (Cu+Ni)	2–4	865–1350	корозійностійка, вуглецева, спеціаль- на сталі
Австралія	BHP+ IHI	60	80–150	500, Cu	0,9–2	1345–2000	вуглецева сталь
Японія	NSC/MHI	60	20–130	1200, (Cu+Ni)	1,6–5	778/1330	корозійностійка сталь
	Kawasaki	3	60–420	550/800, Cu	0,2–0,8	500	корозійностійка, спеціальна сталі
	Pacific Metals	10	50	1200, сталь	2,5	1100	корозійностійка сталь
	Hitachi Zosen	10	50	1200, сталь	2,5	1100	корозійностійка сталь
Франція	IRSID	0,3/8	15–90	660, (вуглецева сталь, Cu), Cu+Ni, Cu+Zr	1–2	200/800	вуглецева, спеціальна сталь

(див. табл.). У той же час на барабанах-холодильниках діаметром від 500 до 1000 мм одержують як аморфну, так і мікрокристалічну стрічку товщиною менше 0,1 мм. Спостерігається ідентичність матеріалу валків і матеріалу барабанів-холодильників (таблиця), а також їх водяне охолодження. З наведених даних напрошується висновок про можливість використання одного з валків-кристалізаторів діаметром 1,5 м [6]

Продовження таблиці

Германія	ZFW	0,25	90-480	350/500, (сталь, Cu)	0,6-3	30-80	корозійностійка, спеціальна сталь
	Ахенський техно- логічний інститут (RWTH)	0,18	6-60	580, Cu	0,5-3	150-300	вуглецева, корозійностійка, спеціаль- на сталь
	Інститут Макса Планка	0,07	5-25	330, (сталь)	0,5-3	120	вуглецева, спеціальна сталь
Південна Корея	Posco RIST/Davy	5/10	50-125	750/1250, 1300, (Cu+Ni, сталь)	1,8-5,0	350/1300	корозійностійка, спеціальна сталь
Велико- британія	British Stee	2-5	8-36	750, (сталь)	1-5,5	74/500/750	корозійностійка, спеціальна сталь
Росія*	ВНИИМетмаш		120-360	340, (Cu+1%Cr)	0,1-0,5	150/300	спеціальна сталь
Тайвань	ITRI		12-24	400, (Cu+1%Cr)	2	300	корозійностійка сталь
Параметри одновалкових установок безперервного лиття стрічки							
Росія	АМЗ (АМЕТ)	0,15	900-1800	820/1000, (Cu+1%Cr), (Cu+Zr)	0,02-0,06	20-150	аморфні і нанокристалічні сплави
Україна	MELTA	0,002	900-1800	500/650, мідь, бронза	0,02-0,06	5-40	аморфні і нанокристалічні сплави
Росія	ГАМАМЕТ	0,15	900-1800	820/1000, (Cu+1%Cr), (Cu+Zr)	0,02-0,06	20-150	аморфні і нанокристалічні сплави

* - роботи зі створення установок припинені

двовалкової машини як барабана-холодильника для одержання тонких смуг загартуванням плоского струменя, виключивши тим самим наступну холодну прокатку. Інакше кажучи, є практично готове технічне рішення щодо конструкції барабана-холодильника для промислового виробництва стрічки і смуги товщиною $\leq 0,1$ мм.

Керамічні бічні обмежувачі (рис. 1) є одними з найдорожчих компонентів установки, їх ціна і стійкість у значній мірі впливають на собівартість одержуваної смуги та рентабельність виробництва [24]. Кожен з них щільно прилягає до торців валків, запобігаючи витіканню розплаву за межі міжвалкового зазору. При цьому матеріал обмежувачів повинен бути зносостійким, витримувати великі перепади температур між холодним валком і розплавом. Такі вимоги, наприклад, задовольняють керамічні матеріали на основі нітриду бору (BN) [25, 26]. Однак, їхня вартість коливається в межах 40–100\$ за кілограм [27–29], що співставно із цінами на аморфну стрічку мікронних товщин [30]. Цю кераміку можна застосовувати й для розливних сопел для подачі розплаву як у міжвалковий зазор при двовалковій розливці, так і на поверхню барабана-холодильника при одновалковій. Не виключено можливість застосування й інших сполук, наприклад, кварцової кераміки [31] або бакелітової на основі ZrO_2 [32]. Кварцову кераміку в цей час широко застосовують для одержання аморфної стрічки через малий коефіцієнт термічного розширення [31].

Щодо збуреності поверхні рідкої ванни в міжвалковому зазорі внаслідок гідроудару потоку розплаву слід зазначити, що при одновалковому розливанні така ванна просто відсутня. Замість неї на поверхні барабана-холодильника є маленька рідка ванна розплаву, яка притиснута зверху нижнім зрізом сопла (рис. 3) [33]. Величина зазору сопло–барабан звичайно на перевищує 0,2–0,4 мм, тому інверсія плоского струменя відсутня і сталість витрат дотримується. Саме із цієї ванни й утворюється (витягається) стрічка.

Приклади одержання мікрокристалічних сплавів таким методом загартування розплаву відомі [13, 16, 18, 34]. При цьому складали одержуваних сплавів різноманітні: від супер-сплавів на нікелевій основі [13, 16] до сендаста, сплавів опору, Fe-Al [18] і електротехнічної сталі з високим вмістом кремнію [34]. Причому, електротехнічна сталь із 6,5 % Si [34] у товщині 30 мкм і ширині до 30 мм має чудову пластичність і високі магнітні властивості. Діаметри барабанів-холодильників у цих роботах [13, 16, 18, 34] менше 1,5 м, про що повідомлялося в роботі [6].

Безперечно, технологія прямого розливання тонкого листа між двома валками виключає такі операції традиційного процесу, як розливання і зачищення слябів, їх повторний нагрів і прокатка. У результаті цього значно скорочуються капітальні вкладення, пов'язані з устаткуванням, і зменшуються енерговитрати. Проблеми, що при цьому виникають, технологічного характеру (обмежувачі, сопла, відновлення поверхні валків і т. п.) нівелюються при масовому виробництві листів і смуги з нержавіючих і вуглецевих сталей. Але для одержання стрічок з тих же нержавіючих сталей і прецизійних сплавів тонше 0,1–0,3 мм двовалкова технологія є тільки проміжним етапом перед подальшою холодною прокаткою.

Узагальнюючи викладене, можна зробити наступні висновки:

- одержання листа тонше 1 мм безпосередньо з розплаву є перспективне саме одновалковим розливанням;
- конструкція валків в установках для прокатки розплаву може бути використана в якості барабана-холодильника одновалкового розливання;
- розливні сопла для одержання стрічки з розплаву на барабані-холодильнику можуть виготовлятися з кераміки бічних обмежувачів двовалкових установок;
- значуще число прецизійних сплавів виготовляється у вигляді холоднокатаної стрічки мікронних товщин, що доцільно замінити загартуванням розплаву на барабані-холодильнику.

Рис. 3. Калюжа розплаву в зазорі «сопло-барабан»: 1 – сопло; 2 – розплав; 3 – барабан-холодильник; 4 – стрічка (стрілками показаний потік розплаву); V_δ – швидкість і напрямок обертання барабана

Список літератури

1. Roderick I., Guthrie L. Steel strips – The Long and Winding Road. ICS PROCEEDINGS, The 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, North California, USA, 2005. May 9–12. Vol. 1, pp. 691–702.
2. Donghui L., Michaela I., Roderick I., Guthrie L. Numerical Prediction and Experiments on Casting Fe-Based Amorphous Strips on a Twin Roll Caster and a Horizontal Single Belt Strip Caster. ICS PROCEEDINGS, The 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, North California, USA, 2005. May 9–12. Vol. 1, pp. 713–719.
3. Ревякин А. В. Промышленное использование технологии непрерывной отливки тонкого листа. *Сталь*. 2001. № 5. С. 27–30.
4. Черняховский Б. П., Погорелов В. Б., Смоляренко В. Д. Преимущества и перспективы непрерывной разливки тонкой стальной полосы на двухвалковом модуле. *Металлург*. 2001. № 11. С. 49–52.
5. А. с. 1053956 СССР, МКИЗ В 22 Д 11/06. Способ непрерывного литья заготовок / В. К. Гребенков, В. П. Кузнецов, Б. В. Солодовников, В. Г. Овсянников. № 3487297/22-02; Заявлено 16.11.77; Оpubл. 15.11.83, Бюл. № 42.
6. Запускалов Н. М. «Микрозавод» – новая концепция в металлургии. *Черные металлы*. 2004, ноябрь. С. 10–24.
7. Линдберг Х.-У., Генрион Ж., Шваха К. Новая Технология Eurostrip. *Сталь*. 2002. № 4. С. 61–62.
8. Mascaroni A., Damasse J. M., Hohenbicher G. Development of Carbon Steel Casting for “Eurostrip”. *Steel Times International*. 2001. No 6, pp. 45–46.
9. Lindenberger H.-V., Brückner G., Taske K.-H. Strip Properties and processing in twin roll casting of stainless and low carbon steels. *Steel Research*. 2001. No 11, 12, pp. 490–495.
10. Badowski M., Hentschel L., Kopp R. et al.: Strip formation and process stability in twin roll strip casting. *Steel Research*. 2001. No 11, 12, pp. 484–489.
11. Молотиллов Б. В., Запускалов Н. М., Савин А. Н. Структура и свойства быстрозакаленного мелкокристаллического Fe-Si-сплава. *МирТОН*. 1992. № 9. С. 8–11.
12. Молотиллов Б. В. Нетрадиционные технологии производства электротехнических сталей. *Металлург*. 2001. № 4. С. 34–35.
13. Селиванов М. В., Давыдова Н. М. Микроструктурные сплавы за рубежом. В сб. «Черная металлургия». 1988. № 1. С. 27–43.
14. <http://bse.sci-lib.com/article092587.html>.
15. Быстрозакаленные металлические сплавы: Материалы V Междунар. конф. / под ред. С. Штиба, Г. Варлимонта; пер. с англ. под рук. Ю. К. Ковнеристого. М.: Металлургия, 1989. С. 17–19.
16. Быстрозакаленные металлы: сб. науч. трудов / под ред. Б. Кантора. М.: Металлургия, 1983. 470 с.
17. <https://www.metalika.ua/price/pretsizionnie-splavi.html>.
18. Сребрянский Г. А. Аморфные, нано- и микроструктурные сплавы – новый класс металлургических материалов. Материалы конференции «Современная металлургия: проблемы, задачи, решения. Наука и производство». 28–29 квітня 2015р., Дніпропетровськ, Україна: «Герда», 2015. С. 125–133.
19. Ноговицын А. В., Баранов И. Р. Скорость литья алюминиевых и стальных полос на двухвалковых машинах. *Процессы литья*. 2013. № 2 (98). С. 54–59.
20. H. Legrand, U. Albrecht-Fruh, A. Flick: 85th Steelmaking Conference Proceedings, Nashville, Tennessee, the USA (2002), 211.
21. Badowski M., Hentschel L., Kopp R., Schmitz W., Senk D: *Steel Research*, 72 (2001), No. 11+12, 484.
22. Сребрянский Г. А., Пыхтин И. В., Сергиенко В. П., Усов Н. М., Сокур В. В., Зуев Е. Ю., Саккиев Д. И. Моделирование условий истечения расплава из сопел и насадок. *Процессы литья*. 2015. № 6 (114). С. 11–20.
23. Сребрянский Г. А., Белоусов В. В., Юрич П. Ю. Теоретические основы конструкции диска-холодильника установок для получения аморфных сплавов. *Сталь*. 2013. № 8. С. 79–82.
24. T. Kuster: *New Steel*, 12 (1996), No. 11, 68.
25. B. R. Marple, S. Poudrette, F. G. Hamel: *Steelmaking Conference Proceedings*, Iron and Steel Society, Toronto, Ontario, Canada, 75 (1992), 353.
26. P. Fournier, F. Platon: *Wear*, 244 (2000), 118.
27. <http://sanktpeterburg.flagma.ru/nitrid-bora-geksogonalny-o2286569.html>.

28. <https://prom.ua/Nitrid-bora.html>.
29. <http://bpks.ru/pricelist/product.39150>.
30. <https://mstator.ru/products/amag>
31. Шаповалов В. А., Никитенко Ю. А. Получение быстрозакаленных лент способом спиннингования при плазменно-дуговой плавке. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение* (98). 2011. № 4. С. 150–153.
32. Караулов А. Г., Пискун Т. В. Опыт применения огнеупоров из диоксида циркония в футеровках печей производства аморфных сплавов. *Огнеупоры*. М., 1995. № 7. С. 29–31.
33. Сребрянский Г. А. Теоретические и практические аспекты формирования быстрозакаленных лент при одновальковой разливке. *Процессы литья*. 2017. № 2 (122). С. 36–45.
34. Y. F. Liang, S. Wang, H. Li, Y. M. Jiang, F. Ye and J. P. Lin: Fabrication of Fe-6.5wt%Si Ribbons by Melt Spinning Method on Large Scale. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015, Article ID 296197, pp. 1–5.

Надійшла 22.04.2020

References

1. Roderick, I., Guthrie, L. Steel strips – The Long and Winding Road. ICS PROCEEDINGS, The 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, North California, USA, 2005. May 9–12. Vol. 1, pp. 691–702.
2. Donghui, L., Michaela, I., Roderick, I., Guthrie, L. Numerical Prediction and Experiments on Casting Fe-Based Amorphous Strips on a Twin Roll Caster and a Horizontal Single Belt Strip Caster. ICS PROCEEDINGS, The 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, Charlotte, North California, USA, 2005. May 9–12. Vol. 1, pp. 713–719.
3. Revyakin, A. V. (2001) Industrial use of technology for continuous casting of thin sheets. *Steel*, 5, 27–30.
4. Chernyakhovsky, B. P., Pogorelov, V. B., Smolyarenko, V. D. (2001) Advantages and prospects of continuous casting of thin steel strip on a two-roll module. *Metallurgist*, 11, 49–52.
5. A. p. 1053956 USSR, MKI3 V 22 D 11/06. The method of continuous casting / V. K. Grebenkov, V.P. Kuznetsov, B.V. Solodovnikov, V.G. Ovsyannikov. No. 3487297 / 22–02; Declared 11.16.77; Publ. 11/15/83, Bull. No. 42.
6. Zapuskalov, N. M. (2004) "Microzavod" - a new concept in metallurgy. *Black metals*, November, pp. 10–24.
7. Lindberg, H.-U., Henry, J., Schwach, K. (2002) New Eurostrip Technology. *Steel*, 4, 61–62.
8. Mascaroni, A., Damasse, J. M., Hohenbicher, G. (2001) Development of Carbon Steel Casting for "Eurostrip". *Steel Times International*, 6, 45–46.
9. Lindenberg, H.-V., Brückner, G., Taske, K-H. (2001) Strip Properties and processing in twin roll casting of stainless and low carbon steels. *Steel Research*, 11, 12, pp. 490–495.
10. Badowski, M., Hentschel, L., Kopp, R. et al.: Strip formation and process stability in twin roll strip casting. *Steel Research*. 2001, 11, 12, pp. 484–489.
11. Molotilov, B.V., Zapuskalov, N.M., Savin, A.N. (1992) Structure and properties of rapidly quenched finely crystalline Fe-Si alloy. *MITOM*, 9, 8–11.
12. Molotilov, B. V. (2001) Non-traditional technologies for the production of electrical steel. *Metallurgist*, 4, 34–35.
13. Selivanov, M. V., Davydova, N. M. (1988) Microcrystalline alloys abroad. In Sat "Ferrous metallurgy", 1, 27–43.
14. <http://bse.sci-lib.com/article092587.html>.
15. Quick-hardened metal alloys: Materials of the V Intern. conf. / ed. S. Stib, G. Warlimont; trans. from English at hand. Yu.K. Kovneristy. M.: Metallurgy, 1989, pp. 17–19.
16. Quick-hardened metals: Sat. scientific proceedings / ed. B. Cantor. M.: Metallurgy, 1983, 470 p.
17. <https://www.metalika.ua/price/pretsizionnie-splavi.html>.
18. Srebryansky, G. A. Amorphous, nano- and microcrystalline alloys - a new class of metallurgical materials. Materials of the conference "Modern Metallurgy: Problems, Tasks, Solutions. Science and production. " 28–29 April 2015, Dnipropetrovsk, Ukraine: Gerda, 2015, pp. 125–133.
21. Nogovitsyn, A. V., Baranov, I. R. (2013) Casting speed of aluminum and steel strips on twin-roll machines. *Casting processes*, 2 (98), pp. 54–59.
20. H. Legrand, U. Albrecht-Fruh, A. Flick: 85th Steelmaking Conference Proceedings, Nashville, Tennessee, the USA (2002), 211.

21. M. Badowski, L. Hentschel, R. Kopp, W. Schmitz, D. Senk: *Steel Research*, 72 (2001), no. 11+12, 484.
22. Srebryansky, G. A., Pykhtin, I. V., Sergienko, V. P., Usov, N. M., Sokur, V. V., Zuev, E. Yu., Sakiev, D. I. (2015) Modeling the conditions for the flow of melt from nozzles and nozzles. *Casting processes*, 6 (114), 11–20.
23. Srebryansky, G. A., Belousov V. V., Yurich, P. Yu. (2013) Theoretical foundations of the design of a disk-cooler of installations for producing amorphous alloys. *Steel*, 8, pp. 79–82.
24. T. Kuster: *New Steel*, 12 (1996), no. 11, 68.
25. B. R. Marple, S. Poudrette, F. G. Hamel: *Steelmaking Conference Proceedings*, Iron and Steel Society, Toronto, Ontario, Canada, 75 (1992), 353.
26. P. Fournier, F. Platon: *Wear*, 244 (2000), 118.
27. <http://sanktpeterburg.flagma.ru/nitrid-bora-geksogonalny-o2286569.html>.
28. <https://prom.ua/Nitrid-bora.html>.
29. <http://bpks.ru/pricelist/product.39150>.
30. <https://mstator.ru/products/amag>
31. Shapovalov, V. A., Nikitenko, Yu. A. (2011) Obtaining rapidly hardened tapes by spinning in plasma-arc melting. *Questions of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science* (98), no. 4, pp. 150–153.
32. Karaulov, A. G., Piskun, T. V. (1995) Experience in the use of zirconia refractories in the linings of furnaces for the production of amorphous alloys. *Refractories. M.*, no. 7. P. 29–31.
33. Srebryansky, G. A. (2017) Theoretical and practical aspects of the formation of rapidly hardened tapes during single-roll casting. *Casting processes*, 2 (122), 36–45.
34. Y. F. Liang, S. Wang, H. Li, Y. M. Jiang, F. Ye and J. P. Lin: *Fabrication of Fe-6.5wt%Si Ribbons by Melt Spinning Method on Large Scale. Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015, Article ID 296197, pp. 1–5.

Received 22.04.2020

G. O. Srebrianskyi, PhD (Engin.), Senior Lecturer, e-mail: amorphus@ukr.net
Nikopol College of National metallurgical Academy of Ukraine (Nikopol, Ukraine)

THE ALTERNATIVE VIEW ON OBTAINING A METAL STRIP FROM THE MELT

The paper discusses the technology for producing a metal sheet directly from the melt on a two-roll module and single-roll casting. The prospects and economic benefits of this method of obtaining a sheet are shown. The foreign experience of producing a steel sheet by casting between rolls is analyzed. The designs of two-roll plants of various companies and their products are examined and compared. The sheet obtained on a two-roll module is essentially a semi-finished product for further cold rolling to a thickness of 0.1 mm or less, which requires additional cold rolling. The advantages and disadvantages of the sheet forming mechanism in the roll gap, the design of the mold rolls, the material of the side stops and pouring nozzles are studied. The assortment of precision alloys that are used in a thickness of less than 1 mm is indicated. After quenching of the melt, these alloys acquire a set of unique properties that are not achievable in traditional metallurgical treatments. A comparison of the designs of industrial twin-roll and single-roll plants of various companies. The possibility of using the design of water-cooled rolls as a single-roll casting drum-cooler is shown, as well as the suitability of the side stop material for pouring nozzles when receiving the tape on the drum-cooler. The prospects of obtaining a tape of precision microcrystalline alloys of micron thicknesses directly from the melt by single-roll casting are substantiated.

Keywords: melt, tape, strip, roll, single-roll casting, drum-cooler, precision alloy.