УДК 669.185:66-932

М. І. Тарасевич, д-р техн. наук, ст. наук. співроб., зав. відділу;
e-mail: nit@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1092-0949

І. В. Корнієць, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., заст. зав. відділу;
e-mail: ivk@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1803-9283

О. В. Ноговіцин, д-р техн. наук, ст. наук. співроб., зав. відділу;
e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com; ORCID 0000-0003-2929-5300

О. О. Токарева, гол. математик; e-mail: olgatokareva@ukr.net

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

ПРОГНОЗУВАННЯ УМОВ ФОРМУВАННЯ ТОНКОЇ СМУГИ З ВИСОКОМІЦНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ЗАЛЕЖНО ВІД ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ВАЛКОВОГО РОЗЛИВАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Валкове розливання є одним з прогресивних способів отримання тонкого листа, що знаходить широке застосування в машинобудуванні та інших галузях промисловості. Методами математичного та комп'ютерного моделювання проведено аналіз впливу швидкісних режимів і технологічних параметрів установки валкового розливання в водоохолоджувальному кристалізаторі (кут меніску, радіус валка, температура перегріву розплаву) на умови формування тонкої смуги з високоміцних алюмінієвих сплавів різної товщини (2, 3 і 4 мм). Серії обчислювальних експериментів дозволили побудувати аналітичні залежності для визначення оптимальної швидкості розливання розплаву при заданих параметрах, що забезпечують твердіння смуги різної товщини на рівні виходу з валків. Для високоміцних алюмінієвих сплавів встановлено діапазони швидкостей розливання, які визначають різні умови формування смуги – в міжвалковому просторі та на рівні виходу з валкового кристалізатора. Отримані результати можуть бути використані для відпрацювання технології і вибору раціонального співвідношення технологічних параметрів при створенні та удосконаленні валкового обладнання.

Ключові слова: валкове розливання, кристалізатор, тонка стрічка, тепловідвід, математичне моделювання, параметри тверднення.

В сучасних умовах для отримання алюмінієвої смуги широко застосовують технологію двовалкового розливання. Суть даного способу виробництва тонкого і особливо тонкого прокату полягає в формуванні листа безпосередньо з рідкого металу шляхом кристалізації і подальшої його деформації поміж двох валків, що обертаються.

До переваг цієї технології виробництва плоских металовиробів належать: компактність агрегату (загальна протяжність лінії від 20 до 60 м [1]) та висока продуктивність процесу; економія енергоресурсів за рахунок відсутності проміжного підігріву матеріалу та мінімальної кількості технологічних операцій, порівнюючи

з найбільш поширеними на сьогодні способами, що передбачають безперервне розливання тонких слябів [2]; менші капітальні витрати на будівництво нових ліній [3]; екологічність виробництва за рахунок відсутності проміжного нагріву, що дозволяє, якщо порівняти з традиційною схемою, знизити викиди вуглекислого газу в 7 разів, окисів азоту – 1,5 рази, сірчистого газу – 3 рази [4]; швидкість розливання металу між валками, що обертаються, за умови забезпечення високої якості поверхні листа, істотно вища, ніж в кристалізаторах, що є нерухомими або гойдаються [3]. Тому питання, що пов'язані з умовами формування тонкої смуги у валковому кристалізаторі, без сумніву, є важливими і актуальними.

Методами математичного і комп'ютерного моделювання [5] проведено аналіз впливу швидкісних режимів валкового розливання металу на умови формування смуги з високоміцних алюмінієвих сплавів (АД35, АМг5, Д16, В95) товщиною 2, 3 і 4 мм при різній температурі перегріву розплавів (2–20 °С). Теплофізичні характеристики алюмінієвих сплавів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики сплавів

Сплав Характеристики	АД35	АМг5	Д16	В95
Щільність, кг/м ³	2700	2650	2770	2850
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1180	922	922	922
Теплопровідність, Вт/(м·К)	–	–	–	–
Температуропровідність, 10 ⁵ м/с ²	2,35	5,156	5,09	4,87
Теплота фазового переходу, кДж/кг	180	180	180	180
Температура ліквідус, °С	650	632	635	630
Температура солідус, °С	590	568	503	470
Інтервал кристалізації, °С	60	64	132	160

Обчислювальний експеримент провадили при таких технологічних параметрах: радіус валка (R) – 200мм; кут меніска (β) – 33°; інтенсивність тепловідводу на межі «метал-валок» – 15000 Вт/(м²·К); ширина смуги – 67 мм. Рівень металу в кристалізаторі (H) визначали із співвідношення: $H = R \cdot \sin\beta$. Мало місце припущення, що рівень ванни розплаву підтримується постійним за рахунок синхронізації об'єму металу, що подається, і швидкості обертання валків; теплоперенос у напрямку, що є перпендикулярним до площини поперечного перерізу зони кристалізації-деформації, є нескінченно малим. В силу симетрії відносно вертикальної площини між валками розглядали ½ частину об'єму металу. В початковий момент часу вважали, що температура металу відповідає температурі металу в проміжному ковші.

Обробка результатів обчислювальних експериментів, за умов формування смуги товщиною 2, 3 і 4 мм для різних сплавів, дозволила визначити швидкості розливання (за фіксованої температури перегріву розплаву), які забезпечують твердіння розплаву в центральній частині валкового зазору на рівні виходу з валків для всіх товщин смуг сплавів, що досліджуються (табл. 2).

Вочевидь чим тонша смуга, тим вища швидкість розливання і менший час твердіння розплаву у валках. Встановлено, що для смуги товщиною 2 мм із сплаву АД35 швидкість розливання становить 1,238 м/с, а для смуги 4 мм – 0,535 м/с. Час знаходження у валках відповідно становить 0,093 с та 0,216 с. Максимальне значення градієнту температур – 110 °С/мм на виході з валкового кристалізатора по перерізу смуги має місце для сплаву АД35 (інтервал кристалізації 60 °С), мінімальне значення – 28 °С/мм – для сплаву В95 (інтервал кристалізації 160 °С).

Таблиця 2

Параметри формування смуги товщиною 2, 3 і 4 мм на виході з валкового кристалізатора (температура перегріву розплаву 5 °С)

Параметр \ Сплав	АД35 ($T_{\text{лік.}} = 650 / T_{\text{сол.}} = 590$)	АМг5 ($T_{\text{лік.}} = 632 / T_{\text{сол.}} = 568$)	Д16 ($T_{\text{лік.}} = 635 / T_{\text{сол.}} = 503$)	В95 ($T_{\text{лік.}} = 630 / T_{\text{сол.}} = 470$)
	товщина смуги 2 мм			
Швидкість розливання, м/с	1,238	1,354	1,008	0,87
Час досягнення рівня виходу з валків ($H = 0$ мм), с	0,093	0,08507	0,11428	0,1324
Температура поверхні смуги, °С	527,45	529,5	476,4	441,12
Температура центру смуги, °С	590,11	568,27	507,33	470,09
Гradient температур по товщині смуги, °С/мм	63	39	31	29
	товщина смуги 3 мм			
Швидкість розливання, м/с	0,773	0,859	0,649	0,56
Час досягнення рівня виходу з валків ($H = 0$ мм), с	0,15	0,1336	0,1776	0,2057
Температура поверхні смуги, °С	502,3	512,235	457,9	428,08
Температура центру смуги, °С	591,9	568,09	502,68	470,3
Гradient температур по товщині смуги, °С/мм	60	37,33	29,85	28
	товщина смуги 4 мм			
Швидкість розливання, м/с	0,535	0,619	0,471	0,406
Час досягнення рівня виходу з валків ($H = 0$ мм), с	0,216	0,186	0,245	0,284
Температура поверхні смуги, °С	477,47	496,24	444,51	415,27
Температура центру смуги, °С	588,25	568,04	501,8	469,17
Гradient температур по товщині смуги, °С/мм	110,78	71,8	57,29	53,9

В результаті обробки обчислювальних експериментів методом регресійного аналізу одержано аналітичні залежності вигляду $v = f(\Delta T)$, які дозволяють визначити швидкість розливання розплаву, що забезпечує його повне тверднення на виході з валкового кристалізатора для смуг із заданою товщиною (2, 3 і 4 мм) при зміні температури перегріву розплаву ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) від 2 до 20 °С.

Для сплаву АД35:

$$\text{смуга 2 мм: } v = 1,3712 - 0,0041535 \cdot \Delta T, r^2 = 98,852; \quad (1)$$

$$\text{смуга 3 мм: } v = 0,785829 - 0,00304128 \cdot \Delta T, r^2 = 98,8552; \quad (2)$$

$$\text{смуга 4 мм: } v = 0,543487 - 0,00173921 \cdot \Delta T, r^2 = 99,552; \quad (3)$$

для сплаву АМг5:

$$\text{смуга 2 мм: } v = 1,2538 - 0,0040159 \cdot \Delta T, r^2 = 99,5; \quad (4)$$

$$\text{смуга 3 мм: } v = 0,872902 - 0,00225985 \cdot \Delta T, r^2 = 98,5157; \quad (5)$$

$$\text{смуга 4 мм: } v = 0,628365 - 0,001682363 \cdot \Delta T, r^2 = 99,52; \quad (6)$$

для сплаву Д16:

$$\text{смуга 2 мм: } v = 1,02499 - 0,00330201 \cdot \Delta T, r^2 = 99,51; \quad (7)$$

$$\text{смуга 3 мм: } v = 0,652585 - 0,000787054 \cdot \Delta T, r^2 = 95,0962; \quad (8)$$

$$\text{смуга 4 мм: } v = 0,475103 - 0,000986713 \cdot \Delta T, r^2 = 99,49; \quad (9)$$

для сплаву В95:

$$\text{смуга 2 мм: } v = 0,884612 - 0,0025796 \cdot \Delta T, r^2 = 97,69; \quad (10)$$

$$\text{смуга 3 мм: } v = 0,565439 - 0,00119606 \cdot \Delta T, r^2 = 98,6717; \quad (11)$$

$$\text{смуга 4 мм: } v = 0,409359 - 0,000776762 \cdot \Delta T, r^2 = 98,58. \quad (12)$$

Побудовані залежності мають лінійний характер відносно температури перегріву (ΔT). Збіг розрахункових даних по формулах (1–12) з прогнозованими значеннями свідчать про адекватний опис отриманими рівняннями процесу, що розглядається.

На рисунку наведено графічні результати проведених досліджень для смуг товщиною 2 (а), 3 (б) і 4 (в) мм. При швидкостях розливання, нижчих за наведені криві, метал твердне у міжвалковому просторі. При швидкостях розливання, вищих за наведені криві, метал на виході з валків перебуватиме в рідкому або рідко-твердому стані.

а

б

в

Співвідношення між швидкістю розливання і температурою перегріву розплаву, що забезпечує оптимальне формування смуги при виході з валкового кристалізатора для різних сплавів: 1 – АМг5; 2 – АД35; 3 – Д16; 4 – В95; товщина смуги, мм: а – 2; б – 3; в – 4. — обчислювальний експеримент; - - - результати статистичної обробки

Зміна швидкості розливання при варіюванні температури перегріву в інтервалі 2–20 °С становить для сплаву АД35 біля 5 %, для сплаву АМг5 – 7 %; для сплаву Д16 – 2,2 %; для сплаву В95 – 4 %. На підставі цих даних можна зробити висновок, що зміна температури перегріву розплаву не впливає суттєво на вибір швидкості розливання, яка забезпечуватиме повне твердіння розплаву на рівні виходу з валків. В табл. 3 наведено оптимальні швидкості розливання для смуг з різною товщиною для відповідного сплаву.

Таблиця 3
Оптимальні швидкості розливання для
смуг різної товщини (м/с)

Сплав	Товщина смуги, мм		
	2	3	4
АД35	1,2176	0,7552	0,5269
АМг5	1,3338	0,8496	0,61113
Д16	0,9952	0,6461	0,4662
В95	0,86139	0,5523	0,4023

Для вивчення комплексного впливу геометричних і технологічних параметрів валкового розливання на умови формування тонкої смуги використано методи планування експерименту та регресійний аналіз. План обчислювального експерименту відносно чотирьох змінних, в якості яких обрано: товщина смуги (δ – 2–4 мм), кут меніску (β – 10–33°), радіус валка (R – 200–400 мм) та температура перегріву розплаву (ΔT – 10–60 °С), представлено в табл. 4 (стовпчики 2–5).

Для всіх високоміцних сплавів, які досліджували, було розраховано швидкості розливання, що забезпечують твердіння смуги на виході з валків, тобто при досягненні в її центрі температури солідус (табл. 4, стовпчики 6–9).

Методом покрокової регресії з послідовним виключення малозначущих факторів було побудовано залежності швидкості розливання відносно заданих технологічних параметрів: товщина смуги (δ = 2–4 мм), кут меніску (β = 10–33°), радіус валка (R = 200–400 мм); температура перегріву розплаву (ΔT = 10–60 °С).

Для сплаву АД35:

$$v = -0,554349 + 0,047554313 \cdot \beta + 0,00323754 \cdot R - 0,0147693 \cdot \delta \cdot \beta - 0,00109545 \cdot \delta \cdot R + 0,000123445 \cdot \beta \cdot R - 0,000112264 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,056446 \cdot v^2, r^2 = 98,6807 \% \quad (13)$$

Для сплаву АМг5:

$$v = -0,5917 + 0,0518209 \cdot \beta + 0,00336569 \cdot R - 0,016948 \cdot \delta \cdot \beta - 0,00115526 \cdot \delta \cdot R + 0,000143401 \cdot \beta \cdot R - 0,000115017 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,060388 \cdot \delta^2, r^2 = 98,8323 \% \quad (14)$$

Для сплаву В95:

$$v = -0,440354 + 0,0306303 \cdot \beta + 0,00249233 \cdot R - 0,0110831 \cdot \delta \cdot \beta - 0,000883578 \cdot \delta \cdot R + 0,000102798 \cdot \beta \cdot R + 0,0473633 \cdot \delta^2, r^2 = 98,4265 \% \quad (15)$$

Для сплаву Д16:

$$v = -0,39715 + 0,0355903 \cdot \beta + 0,00244194 \cdot R - 0,0115194 \cdot \delta \cdot \beta - 0,000846548 \cdot \delta \cdot R + 0,000107717 \cdot \beta \cdot R - 0,0000658956 \cdot \beta \cdot \Delta T + 0,04276 \cdot \delta^2, r^2 = 98,922 \% \quad (16)$$

Отримані рівняння регресії мають коефіцієнт детермінації r^2 (відсоток експериментальних даних, які збігаються з моделлю) не нижчий за 98,5 %.

З використанням рівнянь (13–16) розраховано оптимальні швидкості розливання смуги різної товщини для сплавів, що досліджували.

Таблиця 4

План проведення обчислювального експерименту та його результати

Номер експерименту	δ , мм	β , °	R , мм	ΔT , °C	АД35	АМг5	Д16	В95
					швидкість розливання розплаву, v , м/с			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	10	200	10	0,367	0,4021	0,3006	0,2597
2	2	10	200	60	0,3116	0,3466	0,301	0,2345
3	2	10	400	10	0,7353	0,805	0,602	0,52
4	2	10	400	60	0,6241	0,6942	0,538	0,477
5	2	33	200	10	1,2087	1,3241	0,9898	0,855
6	2	33	200	60	1,0261	1,1414	0,884	0,772
7	2	33	400	10	2,4215	2,6514	1,983	1,7126
8	2	33	400	60	2,0556	2,2862	1,771	1,7419
9	4	10	200	10	0,1587	0,1842	0,141	0,1213
10	4	10	200	60	0,137	0,1601	0,126	0,116
11	4	10	400	10	0,3193	0,3692	0,282	0,248
12	4	10	400	60	0,2754	0,32106	0,252	0,2243
13	4	33	200	10	0,5269	0,6066	0,463	0,3996
14	4	33	200	60	0,4512	0,5273	0,415	0,382
15	4	33	400	10	1,0515	1,2158	0,929	0,8168
16	4	33	400	60	0,9069	1,0573	0,833	0,73864
17	2	20	300	30	1,009	1,1127	0,846	0,7339
18	4	20	300	30	0,4403	0,5118	0,397	0,3438
19	3	10	300	30	0,3189	0,3614	0,277	0,24072
20	3	33	300	30	1,0505	1,19025	0,914	0,79272
21	3	20	200	30	0,4174	0,4736	0,363	0,2972
22	3	20	400	30	0,8375	0,9489	0,728	0,5957
23	3	20	300	10	0,6697	0,7104	0,572	0,4935
24	3	20	300	60	0,5736	0,6534	0,512	0,4463

Згідно рівняння (13) для смуги товщиною 4 мм зі сплаву АД35 при радіусі валка 200 мм з кутом меніску 33° та температурою перегріву розплаву над ліквідусом 5 °C швидкість розливання, що забезпечує її тверднення на виході з кристалізатора становить 0,536 м/с. В результаті обчислювального експерименту отримали

0,535 м/с, тобто маємо практично 100 % збіг прогнозованої і розрахункової швидкості розливання. Аналогічні порівняння було проведено: для сплаву АМг5 (рівняння (14)) для смуги товщиною 3 мм – прогнозована швидкість розливання 0,861 м/с, в результаті експерименту – 0,859 м/с; для сплаву Д16 (рівняння (15)) розрахункова швидкість розливання 1,013 м/с для смуги товщиною 2 мм, в результаті обчислювального експерименту – 1,008 м/с; для сплаву В95 (рівняння (16)) прогнозована швидкість розливання для смуги 4 мм – 0,399 м/с, а розрахункова – 0,406 м/с. Розбіжності в прогнозованому і розрахунковому значеннях швидкостей розливання менші за коефіцієнт детермінації, що свідчить про придатність запропонованих моделей для опису реального процесу.

Таким чином, в розглянутому діапазоні швидкостей (v) можна виділити: v_1 – мінімальна швидкість розливання, яка забезпечить початок твердіння з боку кристалізатора; v_2 – швидкість розливання, що забезпечує повне твердіння смуги на рівні виходу з валків; v_3 – швидкість розливання, за якої на рівні виходу з валків в центрі смуги метал знаходиться в рідкому або рідко-твердому стані.

Отримані результати дозволили оцінити стан металу в міжвалковому просторі та на рівні виходу з валкового кристалізатора залежно від вказаних швидкостей розливання:

– метал твердне в міжвалковому просторі на різній висоті:

$$v_1 < v < v_2; \quad (17)$$

– на рівні виходу з валків товщина твердої кірочки відповідає товщині смуги:

$$v = v_2; \quad (18)$$

– на рівні виходу з валків маємо тверду кірочку, що змінюється від заданої товщини до нуля:

$$v_2 < v < v_3; \quad (19)$$

– на виході з валків в середині смуги метал знаходиться в рідкому або рідко-твердому стані:

$$v \geq v_3. \quad (20)$$

Таким чином, аналіз впливу швидкісних режимів валкового розливання на формування тонкої смуги з високоміцних алюмінієвих сплавів показав, що умови теплообміну на межі «метал-валок» мають бути такими, щоб твердіння смуги проходило в області водоохолоджувального валкового кристалізатора. При фіксованому центральному куті β дзеркала металевої ванни та кутовій швидкості обертання валків ω час формування смуги τ має задовольняти умові: $\beta \geq \omega \cdot \tau$ або $\tau \leq \frac{\beta}{\omega}$. Знаючи радіус валка, швидкість розливання можна визначити як: $v = R \cdot \omega$.

Отримані результати можуть бути використані для відпрацювання технології і обрання раціонального співвідношення технологічних параметрів при створенні та удосконаленні валкового обладнання.

Список літератури

1. Zapuskalov N. Comparison of continuous strip casting with conventional technology. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43 (№ 8). P. 1115–1127.
2. M. Ferry. Direct Strip Casting of Metals and Alloys. The Institute of Materials, Minerals & Mining / Woodhead Pub. and Maney Pub., Sawston, Cambridge, UK, 2006, 296 p.
3. Killmore C. R., Creely H., Phillips A., Kaul H. Development of ultra-thin cast strip products by the Castrip process. *Materials forum*, volume 32. 2008. P. 13–28.
4. Ge S., Isac M., Guthrie R.I.L. Progress of Strip casting Technology for steel; Historical Developments // *ISIJ International*. 2013. V. 53. P.729-742.

5. Naidek V. L., Tarasevich N. I., Korniets I. V., Tarasevich I. N. Computer modelling for thin strip twin-roll casting. *Steel in Translation*, Vol. 47, № 7, 2017, pp. 497–503.

Надійшла 15.10.2020

References

1. Zapuskalov N. (2003) Comparison of continuous strip casting with conventional technology. *ISIJ International*, vol. 43 (№ 8), pp. 1115–1127 [in English].
2. M. Ferry. (2006) Direct Strip Casting of Metals and Alloys. The Institute of Materials, Minerals & Mining/ Woodhead Pub. and Maney Pub., Sawston, Cambridge, UK [in English].
3. Killmore C. R., Creely H., Phillips A., Kaul H. (2008) Development of ultra-thin cast strip products by the Castrip process. *Materials forum*, vol. 32, pp. 13–28 [in English].
4. Ge S., Isac M., Guthrie R.I.L. (2013) Progress of Strip casting Technology for steel; Historical Developments. *ISIJ International*, vol. 53, pp. 729–742. [in English].
5. Naidek V. L., Tarasevich N. I., Korniets I. V., Tarasevich I. N. (2017) Computer modelling for thin strip twin-roll casting. *Steel in Translation*, vol. 47, № 7, pp. 497–503 [in English].

Received 15.10.2020

N. I. Tarasevich, *Dr. Sci. (Engin.)*, Head of the department of Mathematical Research Methods and Information and Computer Technologies; e-mail: nit@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1092-0949, Senior Research Scientist

I. V. Korniets, *PhD (Engin.)*, Senior Researcher, Deputy Head of Department e-mail: ivk@ptima.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1803-9283

O. V. Nogovitsyn, *Dr. Sci. (Engin.)*, Head of the department of continuous casting and deformation processes; e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com, ORCID 0000-0003-2929-5300, Senior Researcher Scientist

O. O. Tokareva, *Chief Mathematician*; e-mail: olgatokareva@ukr.net

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

PREDICTION OF THE CONDITIONS FOR THE FORMATION OF A THIN STRIP OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOYS, DEPENDING ON THE SPEED OF CASTING ROLLS AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS

The roller pouring is one of advanced methods of thin metal sheet manufacturing and it is widely used in engineering and other branches of industry. The analysis of influence of speed rates and technological parameters of unit for roller pouring in water-cooled crystallizer (meniscus angle, roller radius, melt overheat temperature) on the condition of metal bar forming from high-strength aluminum alloy with different thickness (2, 3 and 4 mm) was made using methods of mathematical and computing modeling. The series of executed computing experiments allowed to build the analytic dependencies for determination of optimal melt pouring speed under given technological parameters that arranged the solidification of the strips with different thickness on the level of rollers output. For high-strength aluminum alloys there were detected the pouring speeds ranges that determined different conditions of strip forming in inter-roller space and on the level of roller crystallizer output. The obtained results can be used for technology refinement and for choosing balance between technological parameters during roller equipment creation and advancing.

Keywords: twin-roll casting, crystallizer, thin strip, heat remover, mathematical modeling, solidification parameters