

Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич,
О. О. Токарева

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОТВОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТОНКОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ

Проведен анализ влияния интенсивности теплоотвода на границе «металл-кристаллизатор» на толщину и долю затвердевшего металла при выходе из водоохлаждаемого валкового кристаллизатора и построены соответствующие аналитические зависимости для технологии получения полосы различной толщины (0,1-0,6 см) из среднеуглеродистой и нержавеющей стали. Предложенная методика может быть успешно использована при разработке технологии и проектировании оборудования валковой разливки.

Ключевые слова: валковая разливка, кристаллизатор, тонкая полоса, теплоотвод, математическое моделирование, параметры затвердевания.

Проведено аналіз впливу інтенсивності тепловідводу на межі «метал-кристалізатор» на товщину та частку затверділого металу на виході з водоохолоджуваного валкового кристалізатора і побудовано відповідні аналітичні залежності для технології отримання штаби різної товщини (0,1-0,6 см) із середньовуглецевої та нержавкої сталі. Запропонована методика може бути успішно застосована при розробці технології і проектуванні устаткування для валкового розливу.

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

The analysis of heat removal intensity on the metal-crystallizer border effect on solid metal thickness in output from water-cooled twin-roll crystallizer is made. The analytic dependences for the technology of obtaining the strips with different thickness (from 0.1 to 0.6 sm) from medium carbon and stainless steel were shown. The proposed method can be successfully used for technology development and equipment design for twin-roll casting.

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

В современном производстве для получения тонкой полосы на предприятиях Украины и за рубежом широко применяется двухвалковая разливка в водоохлаждаемый кристаллизатор. В работах [1, 2] были проанализированы особенности формирования полосы различной толщины при изменении технологических параметров процесса (интенсивности теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор, скорости вытягивания полосы, угла мениска и др.).

В настоящей статье проведен анализ влияния интенсивности теплоотвода на границе «металл-кристаллизатор» на толщину затвердевшего металла при выходе из водоохлаждаемого валкового кристаллизатора. Вычислительный эксперимент проводили при следующих технологических параметрах (рис. 1): скорость разливки (v) – 0,85 м/с; угол мениска (β) – 30°; радиус вала (R) – 250 мм; высота металла (H) в кристаллизаторе (согласно рисунку 1, б: $H = R \cdot \sin \beta = 12,5$ см; ширина

(L) жидкометаллической ванны (плоскость XY): $L = \delta \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - H^2} \right) = 3,58 \cdot \delta$.

Новые методы и прогрессивные технологии литья

Толщина полосы (δ) менялась от 0,1 до 0,6 см, интенсивность теплоотвода на границе «металл-валок» (α) варьировалась от 1000 до 20000 Вт/(м²·К).

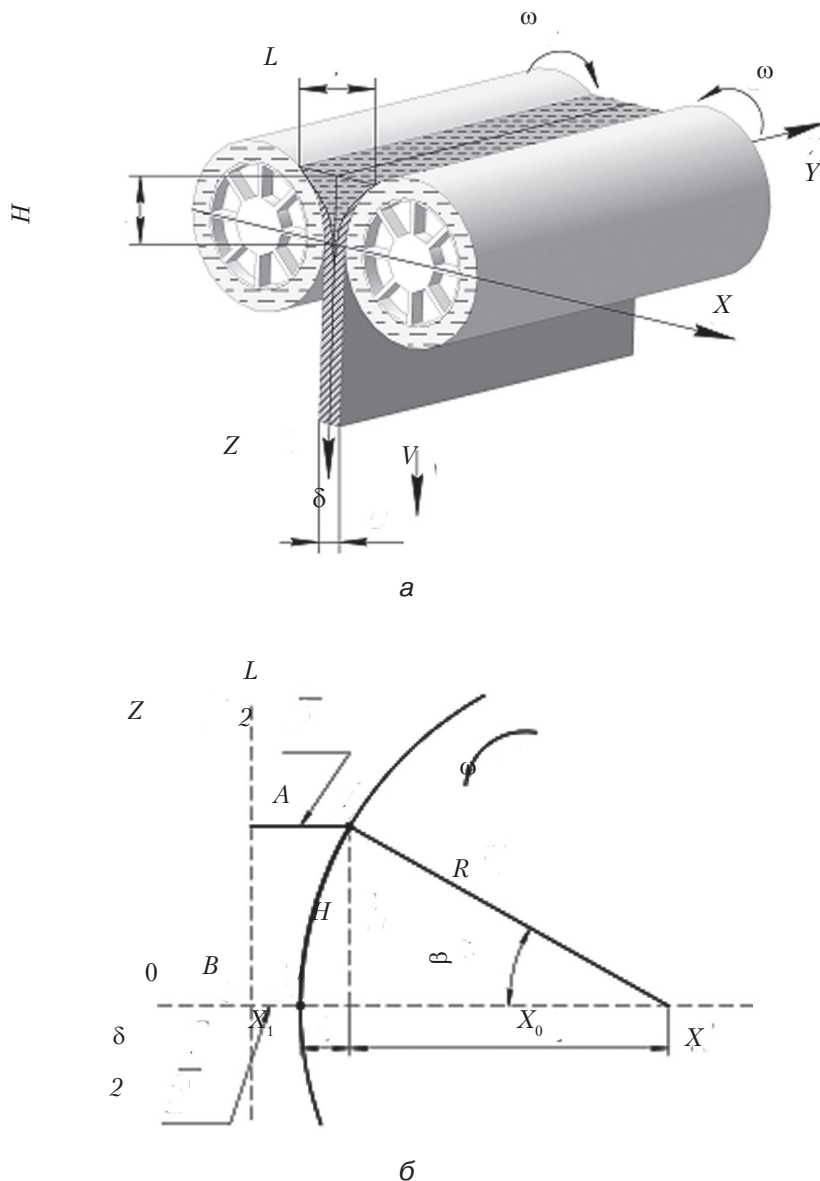


Рис. 1. Валковый кристаллизатор и основные параметры разливки:
а – общий вид; б – схема, используемая при моделировании

В каждом эксперименте определяли толщину затвердевшей корочки металла в момент выхода из кристаллизатора. Серию экспериментов проводили для двух марок стали – среднеуглеродистой и нержавеющей (табл. 1).

В табл. 2 представлены значения затвердевшей корочки и доля затвердевшего металла для полосы различной толщины при изменении интенсивности теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор (α).

Методами регрессионного анализа, для каждой толщины полосы были построены уравнения, позволяющие оценить размер затвердевшей корочки (Y , см) на выходе из водоохлаждаемого кристаллизатора при изменении интенсивности теплоотвода с боковой поверхности (α , Вт/(м²·К)).

Таблица 1. Теплофизические характеристики исследуемых материалов

Теплофизические характеристики	Среднеуглеродистая сталь	Нержавеющая сталь
Плотность, кг/м ³	6900	7800
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	766	496
Теплопроводность, Вт/(м·К)	35	16
Теплота фазового перехода, кДж/кг	275	256
Температура ликвидус, °С	1494	1455
Температура солидус, °С	1465	1400
Начальная температура жидкой стали, °С	1550	1505

В табл. 3 приводятся соответствующие уравнения для фиксированной толщины полосы (δ , см).

Для того, чтобы учесть влияние толщины полосы ($\delta \in [0, 1; 0, 6]$, см), были построены двупараметрические зависимости (для каждой из сталей) изменения толщины затвердевшей корочки от $\alpha \in [1000; 20000]$, Вт/(м²·К) и методом пошаговой регрессии с последовательным исключением малозначащих факторов были получены следующие уравнения регрессии: для полосы из среднеуглеродистой стали

$$Y = 0,035633 + 0,133201 \cdot \frac{\alpha}{41868,0} - 0,00521068 \cdot \frac{41868,0}{\alpha} + 0,00270454 \cdot \frac{1}{\delta}, R^2 = 99,8609\% \quad (1)$$

для полосы из нержавеющей стали

$$Y = 0,0344083 + 0,0870436 \cdot \frac{\alpha}{418686,0} - 0,00441012 \cdot \frac{41868,0}{\alpha} + 0,00100469 \cdot \frac{1}{\delta}, R^2 = 99,8123\% \quad (2)$$

где R^2 – коэффициент детерминации.

На рис. 2 построены прогнозные кривые (по уравнениям 1, 2) изменения толщины затвердевшей корочки для полосы 0,35; 0,45; 0,55 см. На этом же графике показаны значения для различных толщин полосы, по которым были получены соответствующие описания. Сопоставление представленных результатов свидетельствует об удовлетворительном описании уравнениями (2) и (3) толщины затвердевшей корочки на выходе из валкового кристаллизатора при изменении интенсивности теплоотвода на границе «металл-кристаллизатор».

Проанализировав описания, представленные в табл. 3, не трудно видеть, что уравнения для среднеуглеродистой и нержавеющей стали имеют идентичный вид, а именно:

$$Y = c_0 - c_1 \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

Таблица 2. Толщина затвердевшего металла со стороны водоохлаждаемого валька-кристаллизатора при выходе полосы из него

Толщина полосы (δ), см	Коэффициент теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор (α), Вт/(м ² ·К)	Среднеуглеродистая сталь		Нержавеющая сталь	
		толщина затвердевшей корочки при выходе из кристаллизатора, (см)	доля затвердевшего металла	толщина затвердевшей корочки при выходе из кристаллизатора, (см)	доля затвердевшего металла
1	2	3	4	5	6
0,1	4186,8	0,0218	0,436	0,00974	0,195
	5024,16	0,05	1,0	0,01865	0,373
	5987,12	0,05	1,0	0,02845	0,569
	6991,95	0,05	1,0	0,03969	0,794
	7201,29	0,05	1,0	0,04278	0,8556
	9964,58	0,05	1,0	0,05	1,0
	11513,7	0,05	1,0	0,05	1,0
	13983,9	0,05	1,0	–	–
	15700,5	0,05	1,0	0,05	1,0
	17961,37	0,05	1,0	–	–
18840,6	0,05	1,0	0,05	1,0	
0,2	4186,8	0,011	0,11	0,00485	0,0485
	5024,16	0,02041	0,204	0,01238	0,1238
	5987,12	0,03	0,30	0,02005	0,2005
	6991,95	0,03883	0,3883	0,02693	0,269
	7201,29	0,04046	0,4046	0,02823	0,2823
	9964,58	0,0595	0,595	0,04248	0,4248
	11513,7	0,06833	0,6833	0,04869	0,4869
	13983,9	0,08133	0,8133	–	–
	15700,5	0,09185	0,9185	0,06144	0,614
	17961,37	0,1	1,0	–	–
18840,6	0,1	1,0	0,06873	0,687	
20934,0	–	–	0,07288	0,7288	
0,3	4186,8	0,00697	0,046	0,00318	0,021
	5024,16	0,01624	0,108	0,01060	0,071
	5987,12	0,02578	0,172	0,01821	0,121
	6991,95	0,03459	0,2306	0,02507	0,167
	7201,29	0,03625	0,2416	0,02637	0,176
	9964,58	0,05522	0,368	0,04060	0,279
	11513,7	0,06377	0,425	0,04675	0,311
	13983,9	0,07521	0,501	–	–
	15700,5	0,08194	0,5462	0,05928	0,395
	17961,37	0,08966	0,5947	–	–
18840,6	0,09332	0,622	0,06615	0,441	
0,4	4186,8	0,00497	0,0248	0,00255	0,0127
	5024,16	0,01406	0,0783	0,00988	0,049
	5987,12	0,02340	0,117	0,01732	0,087
	6991,95	0,03210	0,1605	0,02423	0,121
	7201,29	0,03372	0,1686	0,0255	0,127
	9964,58	0,05245	0,262	0,03962	0,198
	11513,7	0,06092	0,3046	0,0457	0,228
	13983,9	0,07226	0,361	–	–

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
0,4	15700,5	0,07895	0,395	0,05812	0,291
	17961,37	0,08663	0,433	–	–
	18840,6	0,08928	0,446	0,06870	0,325
	20934,0	–	–	0,0687	0,3435
0,5	4186,8	0,00697	0,017	0,00239	0,0095
	5024,16	0,00427	0,053	0,0097	0,039
	5987,12	0,01329	0,09	0,01722	0,069
	6991,95	0,02256	0,1246	0,02399	0,096
	7201,29	0,03115	0,131	0,02527	0,101
	9964,58	0,03279	0,205	0,03929	0,157
	11513,7	0,05131	0,239	0,04534	0,181
	13983,9	0,05967	0,283	–	–
	15700,5	0,07086	0,31	0,05771	0,2231
	17961,37	0,07742	0,34	–	–
18840,6	0,085	0,351	0,06445	0,258	
0,6	4186,8	0,00236	0,07	0,00236	0,0079
	5024,16	0,0131	0,044	0,00966	0,032
	5987,12	0,02232	0,074	0,01718	0,057
	6991,95	0,03089	0,103	0,02394	0,0798
	7201,29	0,03249	0,108	0,02522	0,084
	9964,58	0,05097	0,17	0,03922	0,131
	11513,7	0,05925	0,1975	0,04526	0,151
	13983,9	0,07038	0,235	–	–
	15700,5	0,07694	0,256	0,0576	0,192
	17961,37	0,08442	0,281	–	–
	18840,6	0,08705	0,298	0,06434	0,214
20934,0	–	–	0,06805	0,2268	

Так как Y соответствует толщине затвердевшей корочки с одной стороны теплоотводящей поверхности, то доля затвердевшего металла (D) на выходе из кристаллизатора может быть оценена выражением $D = 2Y \cdot 1/\delta$. После подстановки имеем:

$$D = 2 \cdot \left(c_0 - \frac{c_1}{\alpha} \right) \cdot \frac{1}{\delta} \quad (4)$$

Из (4) следует, что

$$\alpha = \frac{2 \cdot c_1}{2 \cdot c_0 - D \cdot \delta} \quad (5)$$

Исходя из того, что $\alpha > 0$, уравнение (4) имеет смысл при $2c_0 - D \cdot \delta > 0$. Таким образом, для заданной толщины пластины на выходе из кристаллизатора доля затвердевшего металла должна удовлетворять условие:

$$D_{\max} \leq 2 \cdot \frac{c_0}{\delta} \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет оценить максимально возможную долю затвердевшего металла при выходе из валкового кристаллизатора (с оговоренными в начале статьи технологическими параметрами) при получении полосы толщиной δ .

На рис. 3 (кривая б) показано как меняется максимально возможная доля затвердевшего металла на выходе из валкового кристаллизатора при увеличении

Таблица 3. Выражения для расчета размера затвердевшей корочки на выходе из водоохлаждаемого кристаллизатора при изменении интенсивности теплоотвода с боковой поверхности (α , Вт/(м²·К))

Толщина полосы (δ , см)	Размер затвердевшей корочки на выходе из кристаллизатора (Y, см)	
	среднеуглеродистая сталь	нержавеющая сталь
0,2	0,2	$Y = 0,0802645 - 0,00819575 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 95,909$
0,3	$Y = 0,109519 - 0,0113402 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 95,2629$	$Y = 0,0778541 - 0,00811303 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 96,0425$
0,4	$Y = 0,105874 - 0,0111612 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 95,3144$	$Y = 0,0765293 - 0,00804136 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 96,0192$
0,5	$Y = 0,104078 - 0,0110346 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 95,3628$;	$Y = 0,0760091 - 0,00799759 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 96,0575$
0,6	$Y = 0,103914 - 0,0111069 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 95,8598$.	$Y = 0,0758853 - 0,00798687 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}$, $R^2 = 96,0654$

толщины получаемой полосы из среднеуглеродистой (а) и нержавеющей (б) стали.

С увеличением толщины получаемой полосы на выходе из кристаллизатора доля затвердевшего металла падает. Так при толщине полосы 0,6 см доля затвердевшего металла не превышает 0,35 и 0,25 соответственно для среднеуглеродистой и нержавеющей стали.

Так как доля затвердевшего металла всегда больше либо равна нулю, из (4) следует, что

$$C_0 - C_1 \cdot \frac{1}{\alpha} \geq 0. \quad (7)$$

Отсюда процесс получения полосы при рассматриваемых технологических условиях разливки возможен, когда $\alpha \geq \frac{C_1}{C_0}$. При получении полосы из среднеуглеро-

дистой стали интенсивность теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор должна быть больше 4325 Вт/(м²·К) при $\delta = 0,3$ см и больше 4425 Вт/(м²·К) при толщине полосы 0,6 см. Для нержавеющей стали интенсивность теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор должна быть больше 4275 Вт/(м²·К) при получении полосы толщиной 0,2 см и больше 4406 Вт/(м²·К) при толщине полосы 0,6 см.

Методами регрессионного анализа для шести кривых, представленных на

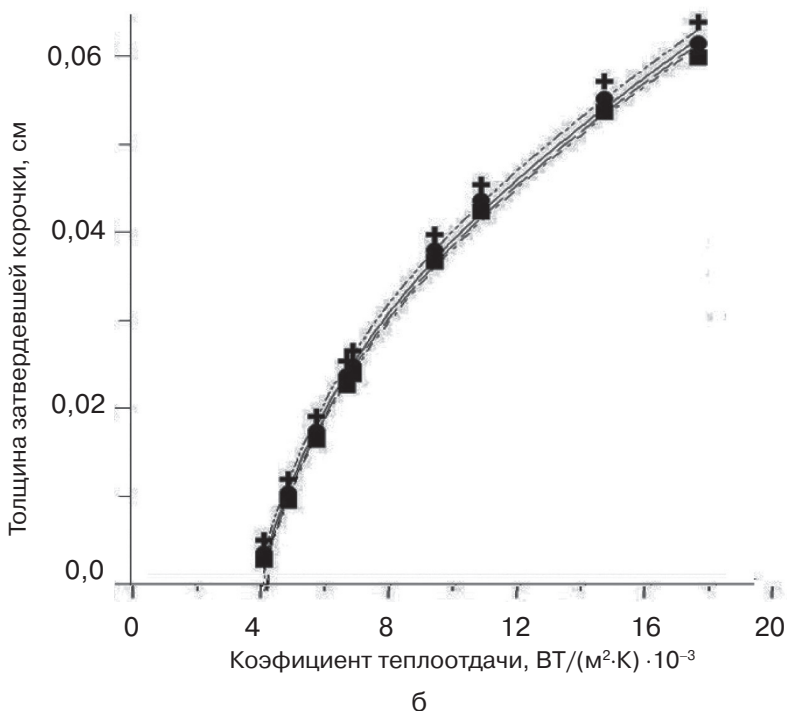
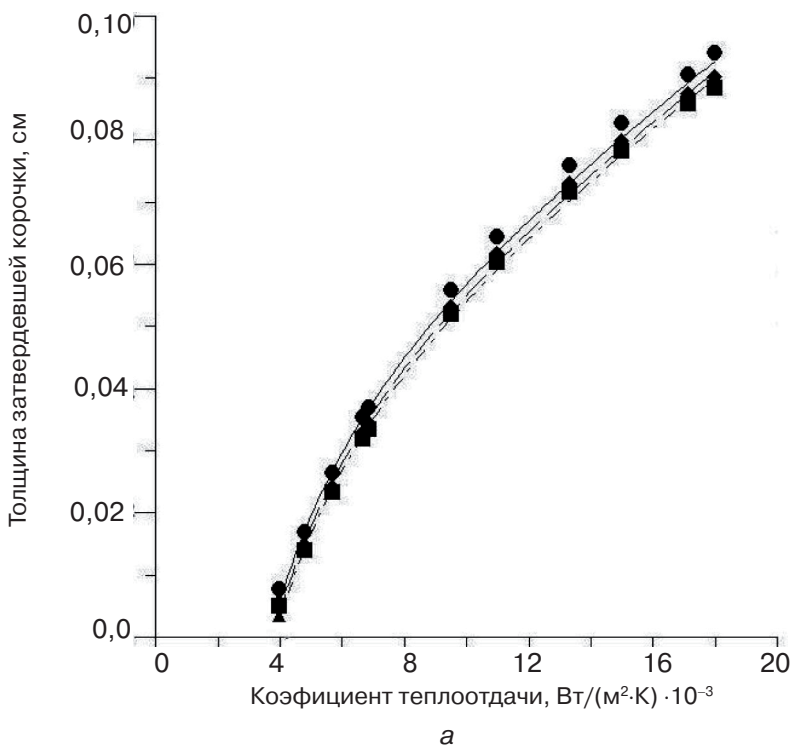
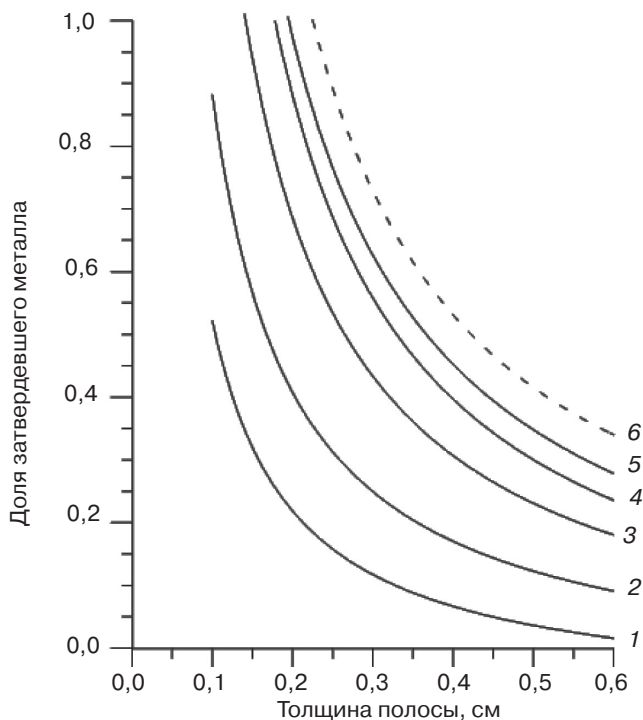
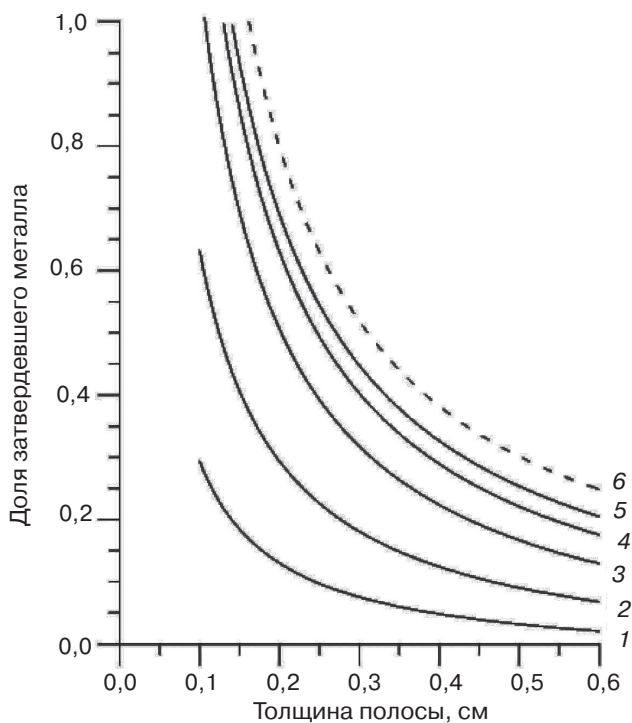


Рис. 2. Изменение толщины затвердевшей корочки на выходе из валкового кристаллизатора при формировании полосы из среднеуглеродистой (а) и нержавеющей (б) стали различной толщины при изменении интенсивности теплоотвода на границе «металл-кристаллизатор». Толщина полосы, см: + – 0,2; • – 0,3; ◊ – 0,4; ■ – 0,5; Δ – 0,6; 0,25; — 0,35; ----- 0,45; - - - - 0,55



а



б

Рис. 3. Изменение доли затвердевшего металла на выходе из валкового кристаллизатора в зависимости от толщины получаемой полосы из среднеуглеродистой (а) и нержавеющей (б) стали при различной интенсивности теплоотода в водоохлаждаемый кристаллизатор (α , Вт/(м²·К): 1 – 5024,16; 2 – 7201,3; 3 – 11513,7; 4 – 15700,5; 5 – 18840,6; 6 – максимально возможная доля затвердевшего металла

рис. 3, были получены уравнения для оценки максимально возможной доли затвердевшего металла (D) в валковом кристаллизаторе при получении полосы заданной толщины ($\delta \in [0, 1; 0,6]$, см):

для полосы из среднеуглеродистой стали толщиной

$$D = \delta^{-1,10101} \cdot 0,193715; \quad (8)$$

для полосы из нержавеющей стали толщиной

$$D = \delta^{-1,06348} \cdot 0,144228. \quad (9)$$

Полностью затвердевший металл возможно получить при толщине полосы до 0,162 см для нержавеющей стали и до 0,225 см для среднеуглеродистой стали.

Обработав результаты вычислительных экспериментов, представленных в табл. 2, относительно доли затвердевшего металла при изменении толщины получаемой полосы, были получены для фиксированной интенсивности теплоотвода от затвердевающего металла уравнения, которые представлены в табл. 4.

Таблица 4. Выражения для расчета доли затвердевшего металла на выходе из водоохлаждаемого кристаллизатора при изменении толщины полосы

Интенсивность теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор (α), Вт/(м ² ·К)	Доля затвердевшего металла (D)	
	среднеуглеродистая сталь	нержавеющая сталь
5024,16	$D = - 0,0852911 + 0,0606819 / \delta$, $R^2 = 97,5123\%$	$D = - 0,0337542 + 0,0326782 / \delta$, $R^2 = 98,8476\%$
7201,3	$D = - 0,0670645 + 0,0948595 / \delta$, $R^2 = 99,5691\%$	$D = - 0,0451624 + 0,0676746 / \delta$, $R^2 = 99,188\%$
11513,7	$D = - 0,0723389 + 0,151564 / \delta$, $R^2 = 99,6249\%$	$D = - 0,0590724 + 0,112868 / \delta$, $R^2 = 98,8197\%$
15700,5	$D = - 0,0865103 + 0,193287 / \delta$, $R^2 = 99,2589\%$	$D = - 0,0518949 + 0,136331 / \delta$, $R^2 = 99,2453\%$
18840,6	$D = - 0,0691847 + 0,208576 / \delta$, $R^2 = 99,4392\%$	$D = - 0,0374172 + 0,145422 / \delta$, $R^2 = 99,7379\%$

Графическое представление полученных описаний показано на рис. 3 (кривые 1-5).

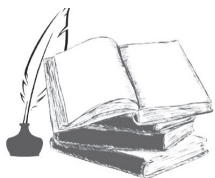
Полученные описания могут быть использованы при разработке технологии и оборудования, предназначенных для получения тонкого листа в установках валковой разливки.

Предложенные в настоящей работе и работах [1, 2] методики позволяют провести оценку параметров затвердевания при изменении геометрических характеристик оборудования валковой разливки.



Список литературы

1. Тарасевич Н. И., Корниец И. В., Рыбицкий А. И., Тарасевич И. Н. Затвердевание стальной полосы в установках двухвалковой разливки // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 2. – С. 9-14.
2. Тарасевич Н. И., Корниец И. В., Тарасевич И. Н., Токарева О. О. Прогнозирование параметров затвердевания тонкой полосы при валковой разливке // *Металл и литье Украины*. – 2016. – № 3. – С. 11-16.



References

1. Tarasevich N. I., Korniec I. V., Rybitskii A. I., Tarasevich I. N. (2016). Zatverdevaniie stal'noi polosity v ustanovkakh dvukhvalkovoii razlivki. *Metall i lit'e Ukrainy*. [*The solidification of the steel strip in twin roll casting units*]. № 2, pp. 9-14. [in Russian].
2. Tarasevich N. I., Korniec I. V., Rybitskii A. I., Tarasevich I. N., Tokareva O. O. (2016). Prognozirovaniie parametrov zatverdevaniia tonkoi polosity pri valkovoii razlivke. *Metall i lit'e Ukrainy*. [*Prediction parameters solidification thin strip at the roll casting*]. № 3, pp. 11-16. [in Russian].

Поступила 03.10.2016