

## Прогнозирование параметров затвердевания тонкой полосы при валковой разливке

На основании серии вычислительных экспериментов и метода регрессионного анализа построены уравнения, позволяющие прогнозировать параметры затвердевания тонкой полосы толщиной до 6 мм в двухвалковом водоохлаждаемом кристаллизаторе с интенсивностью теплоотвода от 1000 до 20000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) когда угол мениска составляет 30°, а также оценивать скорость разливки металла и угловую скорость вращения валков.

**Ключевые слова:** валковая разливка, параметры затвердевания, теплопередача, математическое моделирование

В современном производстве для получения тонкой полосы на предприятиях Украины и за рубежом широко применяется двухвалковая разливка в водоохлаждаемый кристаллизатор. В предыдущей статье [1] был проведён анализ формирования тонкой полосы толщиной до 6 мм при различной интенсивности теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор.

Цель настоящей работы – получение аналитической зависимости параметров формирования полос различной толщины при изменении режима интенсивности теплоотвода.

Объектом исследования является стальная полоса (табл. 1), получаемая при разливке жидкого металла между бандажированными водоохлаждаемыми изнутри вращающимися валками.

Таблица 1

### Теплофизические характеристики среднеуглеродистой стали

Характеристики	Значения
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6900
Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	766
Теплопроводность, Вт/(м·К)	35
Теплота фазового перехода, кДж/кг	275
Температура, °С: ликвидус солидус	1494 1465
Начальная температура жидкой стали, °С	1550

При проведении вычислительного эксперимента предполагали, что уровень ванны расплава поддерживается постоянным за счёт синхронизации объёма подаваемого металла и скорости вращения водоохлаждаемых валков. Используемые при моделировании основные обозначения представлены на рис.1:  $H$  – уровень металла в кристаллизаторе;  $L$  – толщина жидкометаллической ванны (плоскость  $XY$ );  $R$  – радиус валка 250 мм. При моделировании приняты следующие значения: толщина полосы ( $\delta$ ) изменялась в диапазоне 1÷6 мм; скорость разливки ( $v$ ) – 0,85 м/с; угол мениска ( $\beta$ ) – 30°. Считаем, что теплоперенос в направлении, перпендикулярном плоскости попе-

речного сечения зоны кристаллизации-деформации, пренебрежимо мал; деформированное состояние в области пластического обжатия полностью закристаллизованного металла – плоское.

Указанные допущения позволяют рассматривать задачу теплопереноса и течения металла при непрерывной валковой разливке как двумерную.

Из рис. 1, б следует, что, зная угол мениска и радиус валка, можно однозначно определить высоту

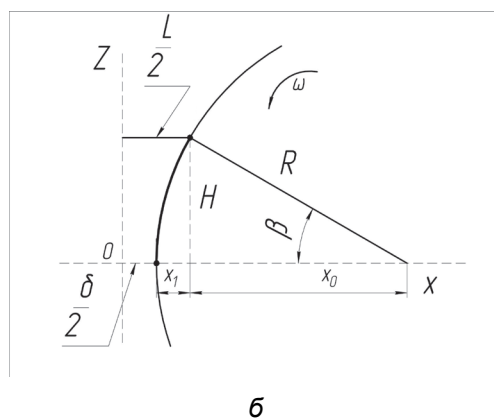
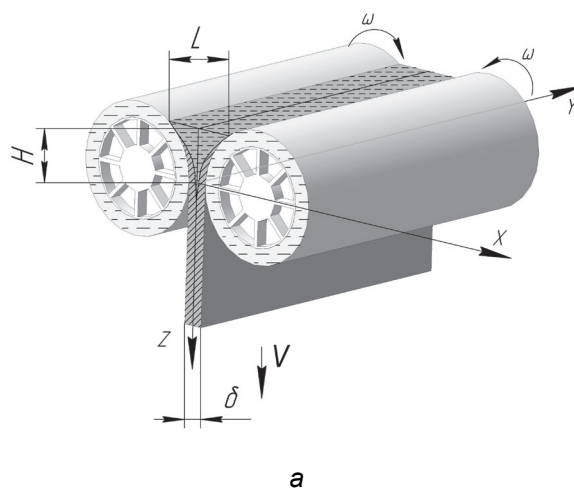


Рис. 1. Валковый кристаллизатор и основные параметры разливки: а – общий вид; б – схема, используемая при моделировании

металла в кристаллизаторе и ширину жидкометаллической ванны как:

$$\begin{cases} H = R \cdot \sin \beta \\ x_0 = \sqrt{R^2 - H^2} \\ x_1 = R - x_0 \\ \frac{L}{2} = \frac{\delta}{2} + x_1 \end{cases} \quad (1)$$

При формировании полосы должны быть обеспечены условия, исключающие прорыв металла при выходе из валков. Исходя из этого, после выхода из валков металл должен быть либо полностью затвердевшим, либо толщина сформированной корки не допускает её разрыва после выхода из валков. Таким условиям может удовлетворять наличие в объёме не затвердевшего металла не более 20 % жидкой фазы, то есть не затвердевшая часть металла находится в двухфазном состоянии либо весь металл затвердел.

Для получения прогнозных моделей была проведена серия вычислительных экспериментов, при проведении которых для полос различной толщины интенсивность теплоотвода на границе «металл-валок» изменялась в пределах 1000÷20000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Полученные данные были сведены в табл. 2 и обработаны методом регрессионного анализа. Для фиксированной толщины полосы ( $\delta$ ) были построены зависимости, связывающие функции отклика (временные параметры, с) – время снятия перегрева ( $\tau_L$ ), время достижения 80 % твёрдой фазы ( $\tau_{80}$ ), время полного затвердевания ( $\tau_S$ ) с величиной коэффициента теплопередачи ( $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К)) на границе «металл-валок».

Ниже приводятся вид соответствующих уравнений для конкретной толщины ( $\delta$ , см) полосы ( $R$  – коэффициент корреляции для построенных уравнений):

$$\begin{cases} \text{для } \delta = 0,1 \\ \tau_L = 0,0122386 + 0,0024831 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999973; \\ \tau_{80} = 0,0115046 + 0,0195207 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999997; \\ \tau_S = 0,0164135 + 0,0195693 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999994. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{для } \delta = 0,2 \\ \tau_L = 0,0491587 + 0,006077 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999062; \\ \tau_{80} = 0,0406015 + 0,0394277 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999991; \\ \tau_S = 0,0586361 + 0,0397029 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999973. \end{cases} \quad (3)$$

для  $\delta = 0,3$

$$\begin{cases} \tau_L = 0,103748 + 0,0120217 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999232; \\ \tau_{80} = 0,0518991 + 0,0650734 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999195; \\ \tau_S = 0,091684 + 0,0654467 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999292. \end{cases} \quad (4)$$

для  $\delta = 0,4$

$$\begin{cases} \tau_L = 0,134314 + 0,00281492 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,997116; \\ \tau_{80} = 0,138186 + 0,081726 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999996; \\ \tau_S = 0,201188 + 0,0830476 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999976. \end{cases} \quad (5)$$

для  $\delta = 0,5$

$$\begin{cases} \tau_L = 0,207893 + 0,0422786 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999671; \\ \tau_{80} = 0,201062 + 0,105107 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999965; \\ \tau_S = 0,295056 + 0,107268 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999983. \end{cases} \quad (6)$$

для  $\delta = 0,6$

$$\begin{cases} \tau_L = 0,26571 + 0,0645951 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999888; \\ \tau_{80} = 0,274482 + 0,129672 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,999895; \\ \tau_S = 0,393135 + 0,131291 \cdot \frac{41868,0}{\alpha}, \\ R = 0,997517. \end{cases} \quad (7)$$

Для того, чтобы учесть влияние толщины полосы  $\delta$ , были построены двухпараметрические (от  $\alpha$  и  $\delta$ ) зависимости изменения временных параметров формирования полосы. Рассматривая уравнения (2-7) нетрудно видеть, что они имеют вид:

Таблица 2

## Изменение временных параметров затвердевания полосы при валковой разливке

Толщина полосы ( $\delta$ ), см	Коэффициент теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор ( $\alpha$ ), Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Время, с		
		снятия перегрева ( $\tau_L$ )	достижения 80 % твёрдой фазы ( $\tau_{80}$ )	затвердевания ( $\tau_S$ )
0,1	2093,4	0,06197	0,40164	0,40741
	4186,8	0,03698	0,20729	0,21286
	7201,3	0,02656	0,12516	0,13052
	11513,7	0,02117	0,08245	0,08758
	15700,0	0,01889	0,06339	0,06834
	18840,6	0,01796	0,05463	0,05946
0,2	2093,45	0,1698	0,82819	0,85111
	4186,8	0,11076	0,4367	0,45848
	7201,3	0,08675	0,27072	0,29126
	11513,7	0,07258	0,18403	0,20324
	15700,0	0,06449	0,14509	0,16335
	18840,6	0,06003	0,12707	0,14477
0,3	1046,7	0,58263	2,69159	2,74409
	2093,4	0,3435	1,28057	1,33073
	4186,8	0,23118	0,68521	0,73215
	7201,3	0,18231	0,43412	0,47803
	11513,7	0,14905	0,3023	0,34299
	15700,0	0,13069	0,24268	0,2814
0,4	18840,6	0,12078	0,21506	0,25212
	2093,4	0,63358	1,77284	1,85991
	4186,8	0,41687	0,95332	1,03403
	7201,3	0,313291	0,61501	0,6894
	11513,7	0,24854	0,43684	0,50524
	15700,0	0,21519	0,35593	0,42038
0,5	18840,6	0,19873	0,31825	0,38043
	2093,4	1,04855	2,30803	2,44113
	4186,8	0,63688	1,24032	1,36289
	7201,3	0,46347	0,81229	0,92425
	11513,7	0,36397	0,58654	0,68910
	15700,0	0,31609	0,48377	0,58025
0,6	18840,6	0,29246	0,4358	0,52891
	2093,4	1,56153	2,87858	3,0667
	4186,8	0,89971	1,54659	1,57975
	7201,3	0,6454	1,02602	1,18217
	11513,7	0,50635	0,75151	0,89412
	15700,0	0,43874	0,62617	0,76035
	18840,6	0,40663	0,56757	0,69704

$$Y = a + b \cdot \frac{41868,0}{\alpha} \quad (8)$$

Полагая, что коэффициенты  $a$  и  $b$  меняются в зависимости от толщины полосы  $\delta$ , можно построить уравнения регрессии для этих коэффициентов. Значения коэффициентов уравнений (2-7) будем считать элементами такого массива данных. Изменение значений коэффициентов от толщины полосы представлено в таблице 3.

По этим данным были построены уравнения регрессии, выражающие зависимости коэффициентов уравнения (8) от толщины полосы:

$$\text{для } \tau_L \quad \begin{cases} a = -0,0485569 + 0,506816 \cdot \delta, \\ R = 0,99315; \\ b = -0,017595 + 0,124369 \cdot \delta, \\ R = 0,96537. \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{для } \tau_{80} \quad \begin{cases} a = -0,000394593 + 0,389957 \cdot \delta, \\ R = 0,815415; \\ b = -0,00302357 + 0,218413 \cdot \delta, \\ R = 0,998843. \end{cases} \quad (10)$$

для  $\tau_S$

$$\begin{cases} a = -0,094222 + 0,772122 \cdot \delta, R = 0,981444; \\ b = -0,00350289 + 0,222544 \cdot \delta, R = 0,999131. \end{cases} \quad (11)$$

Подставив полученные выражения для коэффициентов в соответствующие уравнения (2-7), получим следующий вид двухпараметрических уравнений:

$$\begin{cases} \tau_L = -0,048559 + 0,506816 \cdot \delta + \\ + (-0,017595 + 0,124369 \cdot \delta) \cdot 41868,0 / \alpha; \\ \tau_{80} = 0,000394593 + 0,389947 \cdot \delta + \\ + (-0,00302357 + 0,218413 \cdot \delta) \cdot 41868,0 / \alpha; \\ \tau_S = -0,094222 + 0,772122 \cdot \delta + \\ + (-0,00350289 + 0,222544 \cdot \delta) \cdot 41868,0 / \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

Для проверки полученных уравнений оценим характер изменения исследуемых параметров для толщин полосы 0,25; 0,35; 0,45; 0,55 см (сплошные линии на рис. 2) с расчётными значениями (отдельные точки) для толщин 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 см. Видно, что прогнозные кривые находятся между соответствующими значениями, по которым строились аналитические зависимости.

Таким образом, уравнения (12) могут быть использованы для оценки указанных параметров формирования полосы толщиной до 0,6 см при валковой разливке.

Условия теплоотвода на границе «металл-валок» должны быть такими, чтобы формирование полосы проходило в области водоохлаждаемого кристаллизатора. При фиксированном центральном угле  $\beta$  (угол мениска) зеркала металлической ванны при валковой разливке и угловой скорости вращения валков  $\omega$  время формирования полосы  $\tau$  должно удовлетворять условию:

$$\beta \geq \omega \tau \quad \text{или} \quad \beta / \omega \geq \tau \quad (13)$$

Подставив в выражение (13) соответствующие значения центрального угла зеркала металлической ванны ( $\beta$ ) 0,52 радиана и значение угловой скорости ( $\omega$ ) 0,72 рад/с, получим, что время формирования полосы в валковой зоне должно быть меньше 0,72 с (пунктирная линия на рис. 2, б).

Этому условию, как видно из рисунка 2, б (время достижения 80 % твёрдой фазы), соответствует режим теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор более  $4,18 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) при получении полосы толщиной до 0,35 см, более  $7,4 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) – при получении полосы толщиной от 0,35 до 0,45 см и более  $11,7 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) при получении полосы толщиной до 0,6 см.

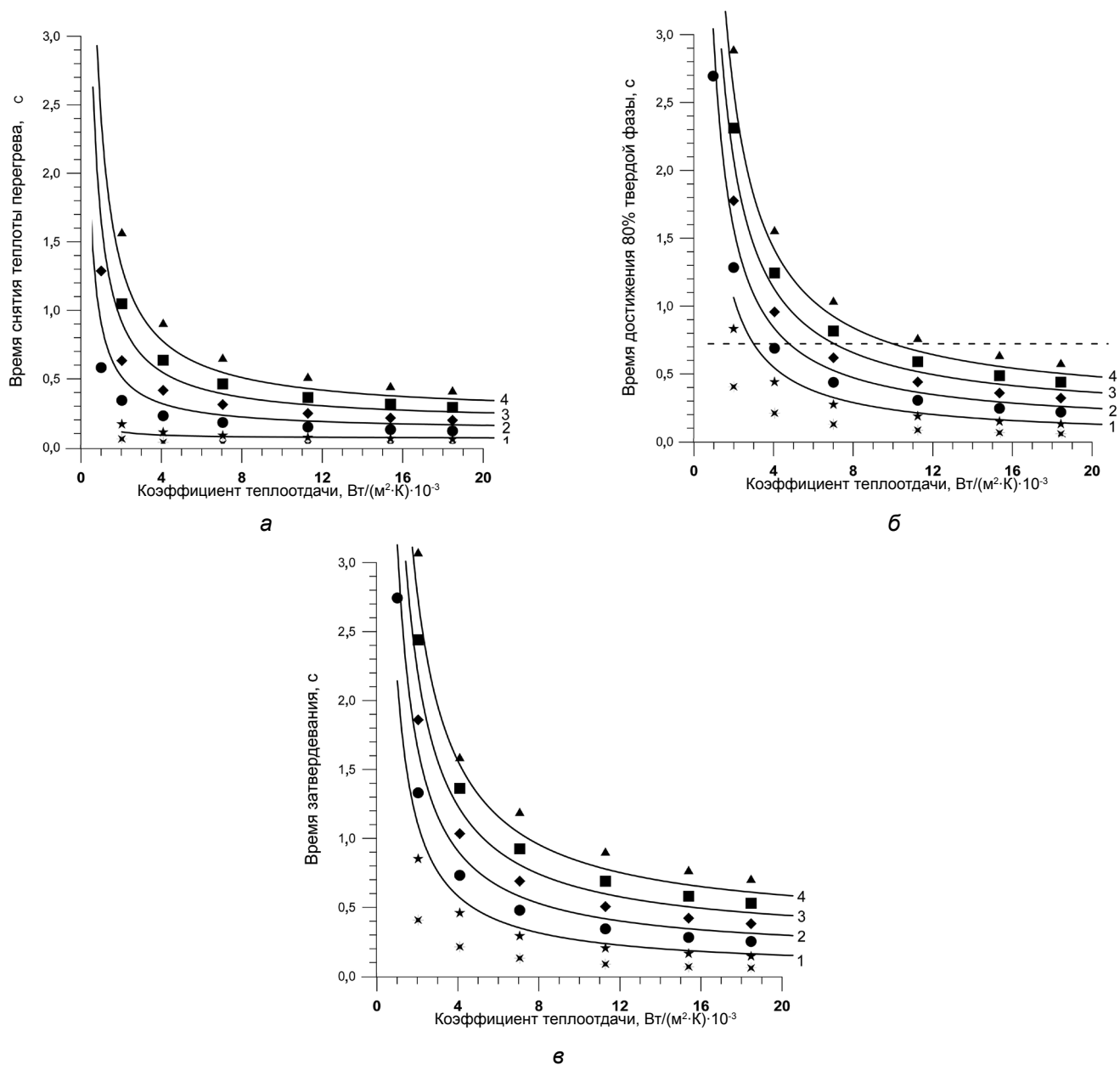
Также по уравнениям (12) можно определить время формирования ( $\tau$ ) полосы толщиной  $\delta$  в водоохлаждаемом кристаллизаторе с интенсивностью теплоотвода  $\alpha$  и угле мениска  $\beta = 30^\circ$ . Из выражения (13) следует, что угловая скорость вращения валков должна удовлетворять условию  $\beta / \tau^3 \geq \omega$  и соответствующая скорость разливки ( $v$ ) при радиусе валка  $R$  может быть оценена в соответствии с выражением (14):

$$R \cdot \beta / \tau \geq v \quad (14)$$

Таблица 3

#### Значения коэффициентов в уравнениях (1-4)

$\delta$ , см	$\tau_L$		$\tau_{80}$		$\tau_S$	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
0,1	0,0122386	0,0024831	0,0115046	0,0195207	0,0164135	0,0195693
0,2	0,0491587	0,00607719	0,0406015	0,0394277	0,0586361	0,0397029
0,3	0,103748	0,0120217	0,0518991	0,0650734	0,091684	0,06544
0,4	0,134314	0,0281492	0,138186	0,081726	0,201188	0,08304
0,5	0,207803	0,0422786	0,201062	0,105107	0,295056	0,10726
0,6	0,26571	0,0645951	0,274482	0,129672	0,393135	0,13129

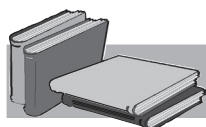


**Рис. 2.** Изменение времени снятия теплоты перегрева (а), достижения 80 % твёрдой фазы (б) и полного затвердевания (в) от интенсивности теплоотвода на границе «металл-валок» при формировании полосы различной толщины, см: 1 – 0,25; 2 – 0,35; 3 – 0,45; 4 – 0,55; \* – 0,1; ★ – 0,2; ● – 0,3 см; ◆ – 0,4 см; ■ – 0,5 см; ▲ – 0,6 см

### Выводы

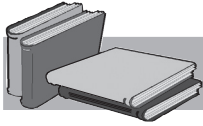
Полученные зависимости позволяют обоснованно выбрать параметры формирования полос толщиной до 6 мм в двухвалковом водоохлаждаемом кристал-

лизаторе с интенсивностью теплоотвода от 1000 до 20000 Вт/(м²·К), а также при угле мениска 30° можно оценить угловую скорость вращения валков и линейную скорость разливки.



### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасевич Н. И. Затвердевание стальной полосы в установке двухвалковой разливки / Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, А. И. Рыбицкий, И. Н. Тарасевич // *Металл и литьё Украины*. – 2016. – № 2. – С. 9-14.



## REFERENCES

1. Tarasevich N. I., Korniets I. V., Ryibitskiy A. I., Tarasevich I. N. (2016). Zatverdevanie stalnoy polosy v ustanovke dvuhvalkovoy razlivki [Stell strip solidification in twin-roll casting unit]. Metall i lite Ukrainiyi, no 2, pp. 9-14. [in Russian].

### Анотація

*Тарасевич М. І., Корнієць І. В., Тарасевич І. М., Токарева О. О.*

Прогнозування параметрів тверднення тонкої смуги при валковому розливанні

*На підставі серії обчислювальних експериментів і методу регресійного аналізу побудовано рівняння, які дозволяють прогнозувати параметри тверднення тонкої смуги товщиною до 6 мм в двовалковому водоохолоджуваному кристалізаторі з інтенсивністю тепловідведення від 1000 до 20000 Вт/м<sup>2</sup>·К, коли кут меніска складає 30°, а також оцінювати швидкість розливання металу і кутову швидкість обертання валків.*

### Ключові слова

*валкове розливання, параметри тверднення, теплопередача, математичне моделювання*

### Summary

*Tarasevich N., Korniets I., Tarasevich I., Tokareva O.*

Prediction of solidification parameters for twin-roll thin strip casting

*The regression equations are developed on the base of computing experiments series. They allow to predict solidification parameters for thin strip with thickness up to 6 mm in twin-roll water-cooled crystallizer with heat removal rate from 1000 to 20000 W/(m<sup>2</sup>·K), when meniscus angle is 30°, and also to estimate the teeming rate and rolling rotation rate.*

### Keywords

*twin-roll casting, solidification parameters, heat transfer, mathematical modeling*

Поступила 20.03.2016