

- логии / Е. И. Марукович, А. Г. Борисов, А. И. Семенченко и др. // Литье и металлургия. – 2013. – №4. – С. 24-28.
3. Борисов Г. П., Смутьский А. А., Семенченко А. И. Экспресс-контроль расплава и прогнозирование свойств будущей отливки на стадии приготовления жидкого металла на основе усовершенствованного метода термического анализа // Процессы литья. – 2007. – № 1-2. – С. 19-22.
4. Веллер И., Ремане С. Информативность параметров кратковременной прочности алюминиевых литейных материалов // Теория и практика процессов цветной металлургии. Опыт металлургов ГДР. – Москва: Металлургия. – 1987. – С. 22-30.
5. Василенко З. А., Крушенко Г. Г., Балашов Б. А. Оценка качества отливок из сплава АЛ9 по твердости // Проблемы прочности. – 1990. – № 8. – С. 121-122.
6. Борисов А. Г., Белик В. И., Семенченко А. И. Исследование формирования псевдокомпозиционных структур путем двухстадийной кристаллизации для сплава АК7ч // Процессы литья. – 2012. – № 4. – С. 20-26.

Поступила 08.12.2014

УДК 621.771

**А. В. Ноговицын, А. Д. Подольцев\*, И. Н. Кучерявая\***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*Институт электродинамики НАН Украины, Киев

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ДВУХВАЛКОВОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ЩЕЛЕВЫМ ПИТАТЕЛЕМ

*Разработана трехмерная математическая модель и компьютерная методика по расчету турбулентного течения расплавленного металла в межвалковом канале двухвалкового кристаллизатора при вертикальной подаче металла через щелевой питатель. Компьютерные исследования проведены с использованием численного метода конечных элементов и программы Comsol. По результатам моделирования изучены особенности течения металла в объеме кристаллизатора с учетом краевых эффектов, формирования вихревых структур течения расплава в межвалковом зазоре, распределения характеристик турбулентности в объеме расплава.*

**Ключевые слова:** валковая разливка-прокатка, трехмерное компьютерное моделирование, турбулентное течение, поле скорости, циркулирующая расплава, характеристики турбулентности.

*Розроблено тривимірну математичну модель та комп'ютерну методику з розрахунку турбулентної течії розплавленого металу в міжвалковому каналі двохвалкового кристалізатора при вертикальній подачі металу через щілину. Комп'ютерні дослідження проведено з використанням методу кінцевих елементів у програмі Comsol. За результатами моделювання вивчено особливості руху металу в об'ємі кристалізатора, з урахуванням крайових ефектів, замкнуті вихрові структури течії розплаву в міжвалковому зазорі, розподілення характеристик турбулентності в об'ємі розплаву.*

**Ключові слова:** валкова розливка-прокатка, тривимірне комп'ютерне моделювання, турбулентна течія, поле швидкості, циркуляція розплаву, характеристики турбулентності.

*The three-dimensional mathematical model and computer technique are developed for computations of turbulent molten metal flowing in the gap of twin-roll caster at vertical melt feeding through the slit nozzle. The computer modeling is carried out by finite-element method in Comsol. The fea-*

*tures of metal flow in the caster including edge effects, closed vortex structures of the flow in the gap between rolls, distribution of turbulence characteristics are studied using the computational results.*

**Keywords:** roll metal casting, 3D computer modeling, turbulent flow, velocity field, melt circulation, characteristics of turbulence.

Двухвалковая разливка-прокатка металлов и сплавов, в том числе цветных металлов и сталей, является прогрессивной, высокоэкономичной и энергосберегающей технологией, интенсивно развиваемой в последние годы во многих странах мира, среди которых – Япония, Австралия, Италия, Франция, Южная Корея, где действуют двухвалковые литейно-прокатные комплексы [1, 2]. Технология позволяет получать тонколистовой металлопрокат (листы толщиной 1-12 мм), в том числе листы углеродистых, нержавеющей и электротехнических сталей толщиной от 0,85 до 1,5 мм [3-5].

Обеспечение эффективности процесса отливки полосы металлов и получения высококачественных листовых изделий требует предварительных теоретических исследований технологии, что, прежде всего, предполагает изучение гидродинамических процессов при течении жидкого металла в межвалковом зазоре кристаллизатора. Проведение комплексного численного исследования гидродинамических процессов в кристаллизаторе позволяет снизить затраты ресурсов и времени на проведение физических экспериментов, а также получить исходную информацию для дальнейшего изучения тепловых процессов и структурно-механического состояния обрабатываемого материала.

В данной работе исследование характера течения расплава в канале двухвалкового кристаллизатора проводится численно с использованием метода конечных элементов, реализованного в коммерческом пакете программ Comsol [6]. Математическая модель и компьютерная методика основываются на решении дифференциальных уравнений двухпараметрической  $k-\epsilon$  модели турбулентности. Трехмерное компьютерное моделирование выполняли с целью изучения закономерностей турбулентного течения расплавленного металла в зазоре между валками и выявления особенностей в распределении характеристик турбулентности (кинетической энергии и скорости ее диссипации) в канале кристаллизатора с щелевым питателем.

### Описание математической модели

Моделировали вариант вертикального двухвалкового кристаллизатора при подаче жидкого металла в межвалковый зазор через щелевой питатель (рис. 1). Щель, через которую подается металл, расположена по центру, на заданной длине валков (рис. 2).

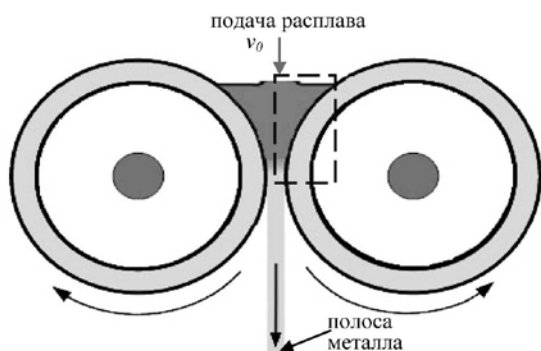


Рис. 1. Двухмерное представление системы валковой разливки-прокатки металла со щелевым питателем; штрих-пунктиром выделена исследуемая область расплава между валками

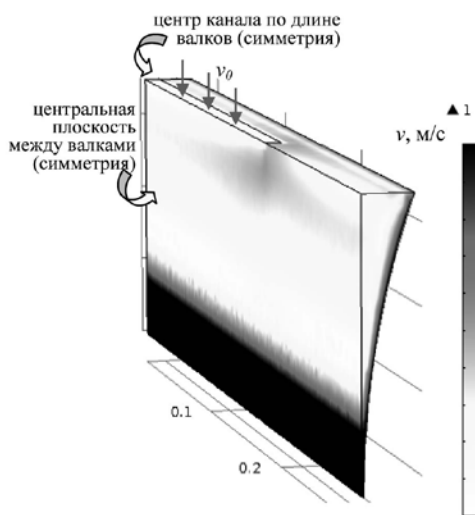


Рис. 2. Распределение поля скоростей расплава на поверхностях расчетной области

Предполагается, что валки вращаются с постоянной угловой скоростью в противоположных направлениях, расплавленный металл – несжимаемая вязкая жидкость, течение расплава – ньютоновское, турбулентное.

Поскольку щелевой питатель расположен на определенной длине валков и концевыми эффектами нельзя пренебречь, гидродинамическую задачу решали в области расплава в трехмерной постановке. При этом учитывается наличие симметрии относительно вертикальной плоскости между валками и относительно центральной вертикальной плоскости по длине валков. В силу симметрии рассматривали 1/4 часть объема расплавленного металла (рис. 2).

Гидродинамические процессы рассчитали в установившемся режиме, без учета нагрева, при постоянных физических свойствах расплава.

Основу модели составляет система уравнений Навье-Стокса [7]:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + (\eta + \eta_T) \cdot (\nabla u + (\nabla \cdot u)^T)] - \frac{2}{3}(\eta + \eta_T) \cdot (\nabla \cdot u)I - \frac{2}{3}\rho k I, \quad (1)$$

$$\Delta \cdot (\rho u) = 0, \quad (2)$$

которая дополняется дифференциальной двухпараметрической моделью турбулентности [8], состоящей из уравнения для кинетической энергии турбулентности  $k$ :

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

и уравнения изменения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon$ :

$$\rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (4)$$

После определения величин  $k$  и  $\varepsilon$  турбулентная кинетическая вязкость определяется согласно выражению:

$$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

В уравнениях (3, 4) величина  $P_k = \eta_T [(\nabla u : (\nabla u + (\nabla \cdot u)^T)) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u)^2] - \frac{2}{3}\rho k \nabla \cdot u$

представляет собой скорость генерации турбулентности.

Неизвестными в системе (1-4) являются:  $u$  – вектор скорости металла;  $p$  – давление;  $k$  – турбулентная кинетическая энергия;  $\varepsilon$  – скорость генерации турбулентной энергии. Приняты также обозначения:  $\eta$  – динамическая вязкость;  $\rho$  – плотность. Стандартные модельные постоянные [8]:  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

Граничные условия гидродинамической задачи (1-4) следующие: на поверхностях симметрии задается условие симметрии; на входе – скорость истечения металла из щели  $v_0$ ; на выходе – скорость жидкого металла по условию равенства расхода; на границе с валком – скорость его вращения  $v_n$ ; на граничной краевой поверхности по ширине полосы – условие твердой стенки. Для переменных турбулентности выбрано условие  $k = \varepsilon = 0$  на всех границах расчетной области.

*Реализация модели и результаты компьютерных расчетов*

Рассчитывали вариант подвода металла в кристаллизатор через щель. Расчетную область задачи в виду имеющейся симметрии определяли как 1/4 рабочей зоны кристаллизатора (показана на рис. 2). В качестве разливаемого

металла выбирали расплавленную сталь, характеристики которой вместе с основными параметрами двухвалковой системы разливки приведены в таблице.

При расчетах использовались основные положения работ [9, 10]. Важным в расчетах был выбор мелкого конечно-элементного разбиения расчетных областей с измельчением сеточного разбиения в пристеночной зоне у границы с валком и в подобластях с наибольшими значениями скорости – вблизи выхода металла из межвалкового зазора.

Задавали максимальный размер сеточных элементов 4 мм, общее количество элементов разбиения трехмерной области – более 24200 тетраэдрных элементов и ~ 9400 треугольных элементов, элементов на ребрах (границах) расчетной области на рисунке 2 – более 500. Расчет проводили с использованием итеративного метода решения GMRES (generalized minimal residual method). Относительная погрешность вычислений составила  $10^{-4}$ .

### Исходные данные для расчетов

Параметры	Значения
Радиус валка, $R$ , мм	210
Длина валка (ширина полосы), мм	600
Высота мениска, $l$ , мм	70
Толщина полосы металла, мм	1
Скорость разливки (валка), $v_{\eta}$ , м/с	1,0
Ширина щели для подачи расплава, $\Delta$ , мм	8
Длина щели для подачи расплава, мм	360
Скорость истечения расплава, $v_0$ , м/с	0,20833
Плотность расплава, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7000
Динамическая вязкость расплава, $\eta$ , Па/с	$6,2 \cdot 10^{-3}$

В качестве значений характерного масштаба длины турбулентности в Comsol-модели задавался параметр  $L_T = 0,01$  м, а интенсивность турбулентности  $I_T = 0,05$ .

Результаты численных расчетов основных характеристик течения расплава в рабочей зоне кристаллизатора при заданных параметрах согласно данным таблицы показаны на рис. 2-5.

Из полученных результатов можно сделать следующее заключение.

1. Жидкий металл, поступая в активную зону из щелевого пита-

теля, через приповерхностный слой движется к поверхности вращающегося валка и далее, увлекаясь этой поверхностью, часть металла движется вдоль нее до выхода из активной зоны. Вместе с тем, в центральной зоне, особенно вблизи краев канала, формируется вихревая структура, обеспечивающая объемное перемешивание жидкого металла (рис. 3, а и 4).

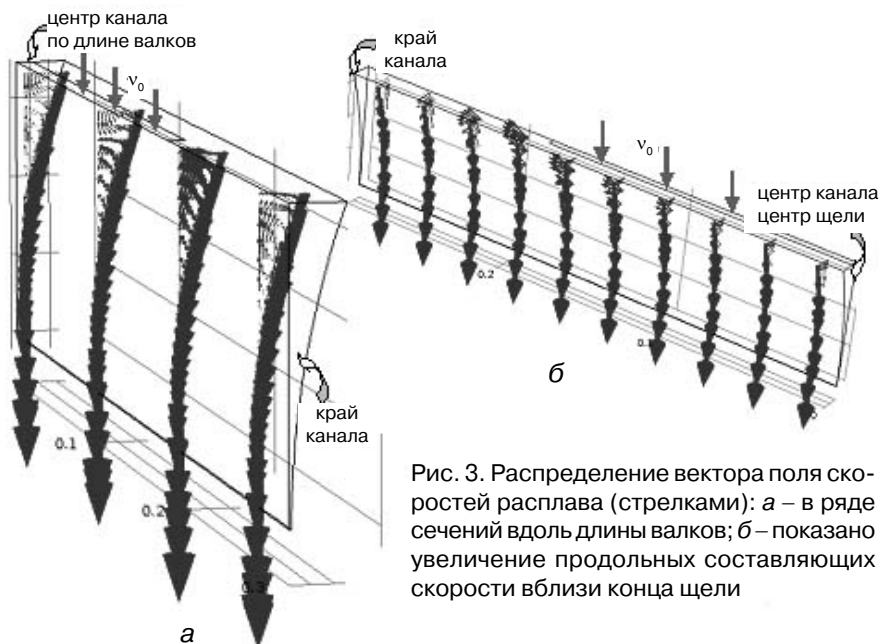


Рис. 3. Распределение вектора поля скоростей расплава (стрелками): а – в ряде сечений вдоль длины валков; б – показано увеличение продольных составляющих скорости вблизи конца щели

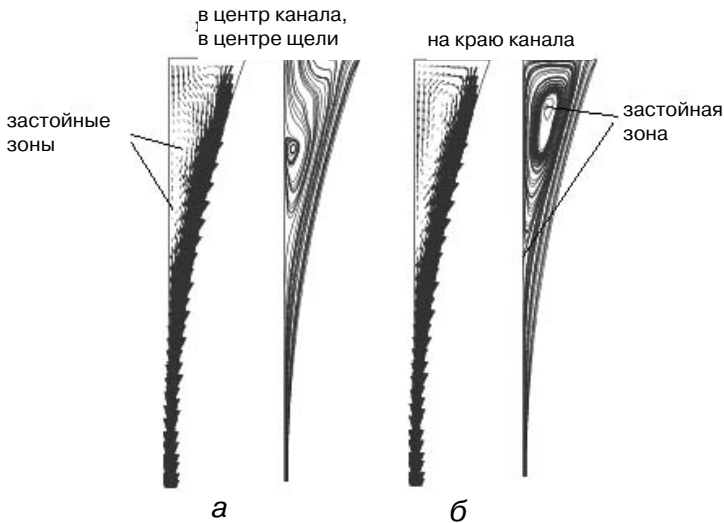


Рис. 4. Характер течения расплава в виде стрелок и линий потока в центре канала по длине валков (а) и на краю канала (б)

2. Вихревые структуры течения металла в различных продольных сечениях несколько отличаются друг от друга (рис. 3, а и 4). Поступая из питателя, в центральных областях канала металл в тонком приповерхностном слое растекается в продольном направлении (продольные составляющие скорости показаны на рис. 3, б) и далее увлекается движущимися валками.

3. В расплаве в рассматриваемой 1/4 части активной области формируются по две застойные зоны в центральной части канала (рис. 4, а) и в концевой зоне канала (см. рис. 4, б). Максимальные значения скорости достигаются на поверхности валков и на выходе из канала, и равны линейной скорости на поверхности вала – 1 м/с (рис. 2).

4. Основные характеристики турбулентного характера течения металла в активной зоне показаны на рис. 5. Видно, что турбулентная кинетическая вязкость  $\eta_T$ , вычисленная согласно выражению (5), а также турбулентная кинетическая энергия  $k$  и скорость ее диссипации  $\varepsilon$  имеют наибольшие значения в двух областях – в концевой зоне канала и в его центральной зоне (рис. 5, а, б, в, соответственно), а области

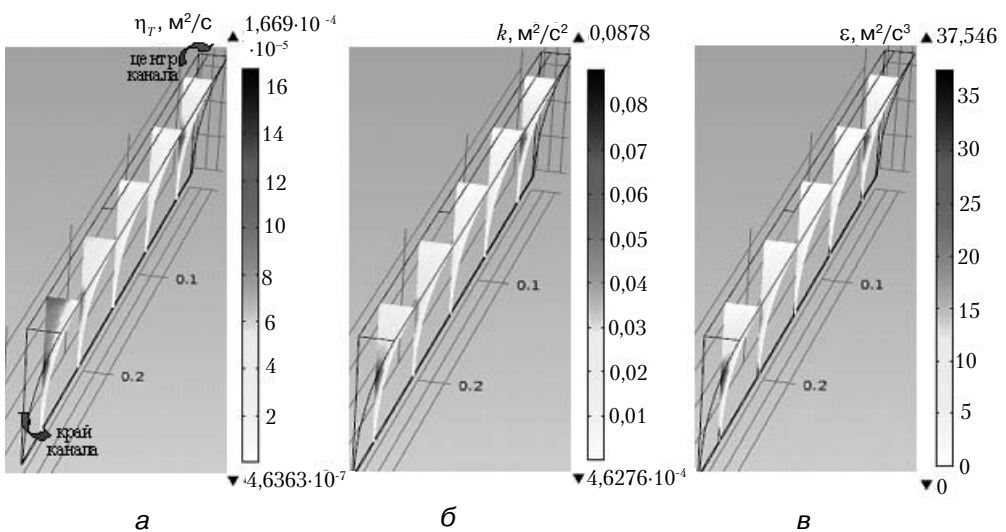


Рис. 5. Распределение в ряде сечений вдоль длины валков турбулентной кинетической вязкости  $\eta_T$  (а), турбулентной кинетической энергии  $k$  (б) и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  (в)

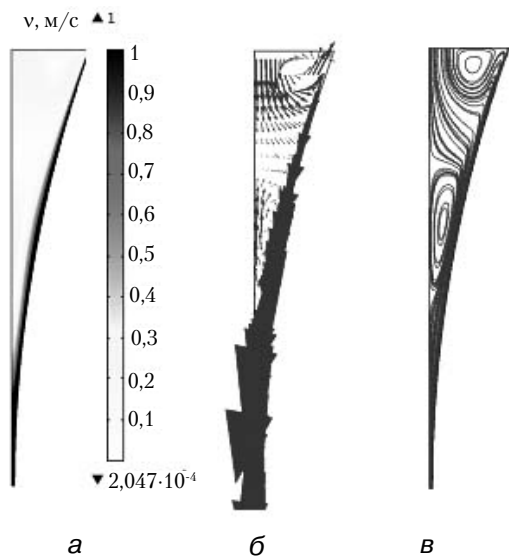


Рис. 6. Распределения поля скоростей, полученные в результате решения двумерной задачи: в оттенках цвета (а); в виде стрелок (б) и линиями потока (в)

нижней застойной зоны показаны на рис. 4, а, б.

С целью сравнительного анализа результатов расчета гидродинамического течения металла, полученного по трехмерной и упрощенной двумерной модели, в данной работе выполняли также расчет двумерной гидродинамической задачи для поперечного сечения канала, расположенного в его центре. Очевидно, что такая модель справедлива при большой протяженности канала и при подачи металла через щель по всей длине валков. Результаты расчетов приведены на рис. 6 и 7. Из этих рисунков видно, что характер течения металла, в общем, совпадает с трехмерным расчетом, с тем лишь отличием, что при сделанных предположениях наверху канала между щелевым питателем и поверхностью валка образуется еще одна вихревая структура течения (см. рис. 6, б-в в сравнении с рис. 4, а). Как

показали численные расчеты, турбулентные характеристики для двумерного случая (рис. 7) по порядку величины и закономерностям распределения аналогичны картинам их распределения, полученным в результате решения трёхмерной гидродинамической задачи в центральной области канала по длине валков. Отметим, что некоторое отличие в характере течения металла и отличие в значениях характеристик турбулентности объясняется относительно небольшой длиной щелевого питателя, что не может быть учтено при решении двумерной гидродинамической задачи.

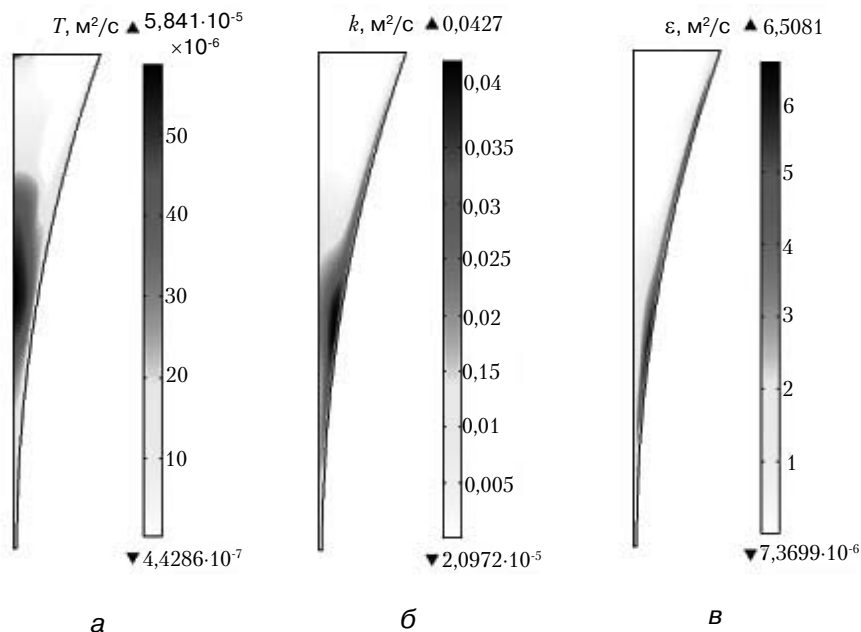


Рис. 7. Распределение турбулентной кинетической вязкости  $\eta_T$  (а), турбулентной кинетической энергии  $k$  (б) и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  (в), полученные в результате решений двумерной задачи

### Выводы

Разработана компьютерная модель и методика расчета трехмерного турбулентного течения расплавленного металла в активной зоне валкового кристаллизатора применительно к технологии производства листового металла. Рассмотрен случай подвода расплава в межвалковое пространство через щелевой питатель. Методика обладает широкими возможностями по заданию исходных данных процесса, включая возможность моделирования различных способов подачи расплава в межвалковый канал, и в отличие от двухмерных методик позволяет исследовать особенности течения металла в концевых зонах щелевого питателя и на краях валков (краевые эффекты).

По результатам компьютерного моделирования показаны особенности течения металла, формирование вихревой структуры, наличие застойных зон и определены количественные характеристики турбулентного характера течения расплава в объеме межвалкового канала. Данные результаты, не учитывающие процесс кристаллизации расплава, следует рассматривать как предварительный этап решения технологической задачи – получение листового металла. Дальнейшее усовершенствование расчетной методики за счет учета связанных гидродинамических и тепловых процессов позволит более детально изучить процессы кристаллизации расплавленного металла в валковом кристаллизаторе, и выбрать на этапе проектирования рациональные значения основных параметров и режимы литья листовых заготовок.



### Список литературы

1. *Ge S., Isac M., Guthrie I. L.* Progress of strip casting technology for steel; historical developments. Review // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52, № 12. – P. 2109-2122.
2. *Капланов В. И.* Модернизация листопрокатного производства Украины: главные направления развития и перспектива // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. Серія: Технічні науки. – 2011. – Вип. 22. – С. 86-89.
3. *Гридин А. Ю., Шапер М., Данченко В. Н.* Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой // Обработка материалов давлением – 2011. – № 3 (28). – С. 184-194.
4. *Grydin O. Yu., Ogins'kyi Y. K., Danchenko V. M., Bach Fr.-W.* Experimental twin-roll casting equipment for production of thin strips // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – Vol. 2, № 5. – P. 348-354.
5. *Park J. J.* Finite-Element analysis of melt flow in a vertical twin-roll casting // Metals and Materials International. – March 2014. – Vol. 20, Is. 2. – P. 317-322.
6. COMSOL multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com>
7. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
8. *Launder B. E., Spalding D. B.* Mathematical models of turbulence. – London / New York: Academic Press, 1972. – 169 p.
9. *Белов И. А., Исаев С. А.* Моделирование турбулентных течений / Учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. – 108 с.
10. *Исаев С. А., Леонтьев А. И., Усачев А. Е.* Методологические аспекты численного моделирования динамики вихревых структур и теплообмена в вязких турбулентных течениях // Известия АН. Энергетика. – 1996. – № 4. – С. 133-141.

Поступила 15.12.2014