

УДК 621.771

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

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Институт электродинамики НАН Украины, Киев

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА В ДВУХВАЛКОВОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Исследованы картины течения расплава в межвалковом зазоре двухвалкового кристаллизатора при вертикальной подаче металла через щелевой питатель и насадку. Жидкий металл рассмотрен как линейная вязкая среда. Компьютерное моделирование проведено с применением программы Comsol. Приведены и проанализированы результаты расчетов поля скоростей течения расплава.

Ключевые слова: валковая разливка металла, компьютерное моделирование, поле скорости, вихревая структура течения.

Досліджено картини перебігу розплаву в міжвалковому зазорі довалкового кристаллизатора при вертикальній подачі металу через щілинний живильник і насадку. Рідкий метал розглянуто як лінійне в'язке середовище. Комп'ютерне моделювання проведено із застосуванням програми Comsol. Наведено результати розрахунку швидкостей розливу.

Ключові слова: валкове розливання металу, комп'ютерне моделювання, поле швидкості, вихрова структура течії.

The patterns of molten metal flow in the gap of twin roll caster at vertical melt feeding through slit nozzle and vertical pass nozzle are studied. The melt is considered as a linear viscous medium. The computer modeling is performed using code Comsol. The results of computations of velocity field and melt motion are given and analyzed.

Keywords: roll metal casting, computer modeling, velocity field, vortex flow.

Внастоящее время в мире проводятся широкие научные исследования и проектные работы, направленные на разработку эффективных технологий и оборудования для металлургических процессов получения и обработки материалов, в том числе стали и цветных металлов, с применением метода валковой разливки-прокатки [1].

Валковая разливка-прокатка является одной из перспективных и энергосберегающих технологий производства полос из металлических материалов и сплавов.

Получение тонкого плоского проката заключается в формировании полосы непосредственно из жидкого металла путем кристаллизации и деформации его между двумя вращающимися валками (рис. 1).

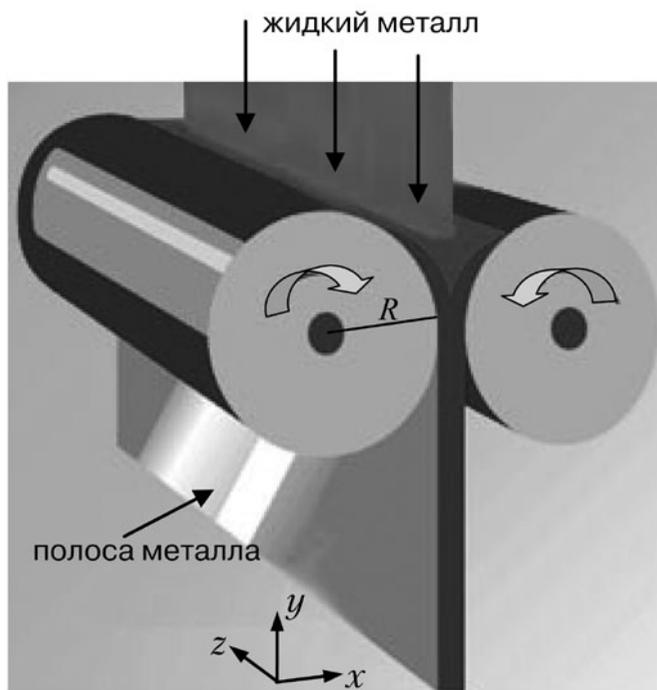


Рис. 1. Схематическое представление процесса валковой разливки-прокатки

В двухвалковых кристаллизаторах как с вертикальной, так и горизонтальной подачей жидкого металла производят листы толщиной от 1 до 12 мм и шириной до 2350 мм [1, 2]. Производство листового металлопроката с помощью валковых агрегатов отличается сравнительно небольшими энергозатратами, экономическими преимуществами за счет устранения промежуточных технологических операций, а также экологической чистотой.

Одним из малоизученных способов производства плоского проката является технология валковой разливки стали. Для получения полос из сталей чаще всего используется вертикальная подача расплава. Жидкий металл поступает в межвалковый зазор, внутри которого происходит сложное по характеру течение металла. Анализ ряда публикаций [1, 3-8, 0] показал необходимость решения вопросов, связанных с исследованием характера течения металла в межвалковом зазоре и в целом в потоке жидкого металла.

В связи с тем, что проведение экспериментальных исследований закономерностей протекания гидродинамических процессов затруднительно, в большинстве работ методом исследования является численное моделирование.

В настоящей работе компьютерное моделирование проводили с применением программы Comsol [9], в которой использованы основные теоретические положения работ [10-12].

Математическая модель для исследования

В модели используются следующие положения и допущения:

- валки недеформируемые;
- расплав является ньютоновской вязкой несжимаемой жидкостью;
- течение расплава ламинарное (скорость разливки и вязкость расплава достаточно низкие);

- поскольку расплав подается по всей длине валков, задачи решаются в двухмерной постановке в декартовой системе координат в плоскости сечения Oxy непосредственно в области жидкого металла (рис. 2);
- вследствие симметрии относительно центральной вертикальной плоскости между валками рассматривается 1/2 часть объема металла;
- в силу того, что отношение ширины полосы металла к его толщине велико, торцевыми эффектами пренебрегают;
- процессы рассматриваются в установившемся режиме без учета малого по продолжительности начального переходного режима;
- физические свойства металла (плотность, вязкость) постоянны, не зависят от температуры.

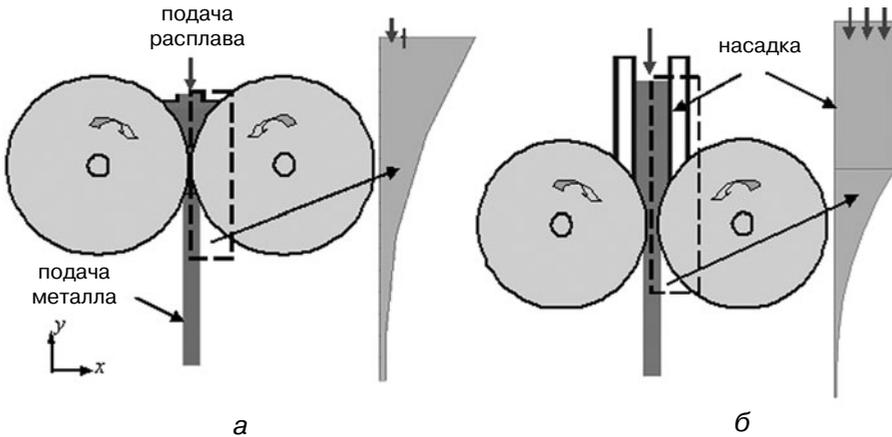


Рис. 2. Два варианта подачи металла в межвалковый зазор: *а* – подача металла через щель по всей длине валков (вариант 1); *б* – подача металла через насадку по всей длине валков (вариант 2); справа показаны расчетные области с расплавом

Процессы течения расплава описываются системой уравнений Навье-Стокса [10]: уравнением движения

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla u + (\nabla \cdot u)^T) - (2\eta/3)(\nabla \cdot u)I] \quad (1)$$

и уравнением неразрывности

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

где неизвестные величины: u – вектор скорости металла; p – давление. Приняты также обозначения: η – динамическая вязкость; ρ – плотность расплава; I – единичный тензор; составляющая $\eta(\nabla u + (\nabla \cdot u)^T) - (2\eta/3)(\nabla \cdot u)I$ представляет собой тензор вязких напряжений (Па).

Уравнения (1-2) дополняются граничными условиями для скорости: условие симметрии на оси области; на входе – скорость истечения металла из щели и подачи металла через насадку v_0 ; на выходе – скорость течения металла по условию равенства расхода; на границе с валком – скорость его вращения v_n .

В качестве разливаемого металла выбрали сталь, характеристики которой вместе с параметрами двухвалковой системы разливки соответствуют данным работ [4, 13] (таблица).

Важным в расчетах был выбор мелкого конечно-элементного разбиения расчетных областей с дополнительным измельчением зон на границе с валком, где мак-

Данные для компьютерных расчетов

Характеристики	Значения
Радиус валка, R , мм	250
Длина валка, мм	200
Угол / высота мениска, $^{\circ} / l$, мм	30 / 135
Толщина полосы металла, мм	3
Скорость разливки (валка), v_p , м/с	0,085
Ширина щели для подачи расплава Δ , мм	10
Скорость истечения расплава, v_0 , м/с	0,0255
Плотность расплава, ρ , кг/м ³	7000
Динамическая вязкость расплава, η , Па/с	$6,2 \cdot 10^{-3}$

симальный размер сеточных элементов ограничивался 0,1 мм. Общее количество элементов сеточного разбиения – ~ 41000. Относительная погрешность решения гидродинамической задачи задавалась равной 10^{-6} .

Гидродинамические процессы в зазоре двухвалкового кристаллизатора с вертикальной подачей жидкой стали по всей длине валков исследовали для двух вариантов: подача расплава щелевым питателем – вариант 1 (рис. 2, а); подача расплавленного металла через насадку – вариант 2 (рис. 2, б).

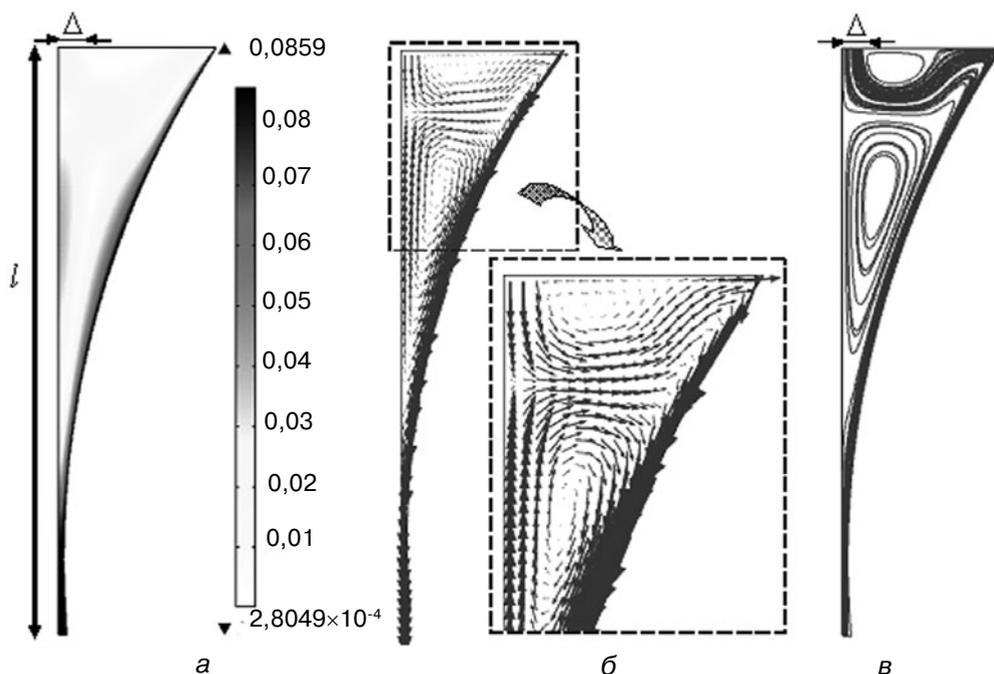


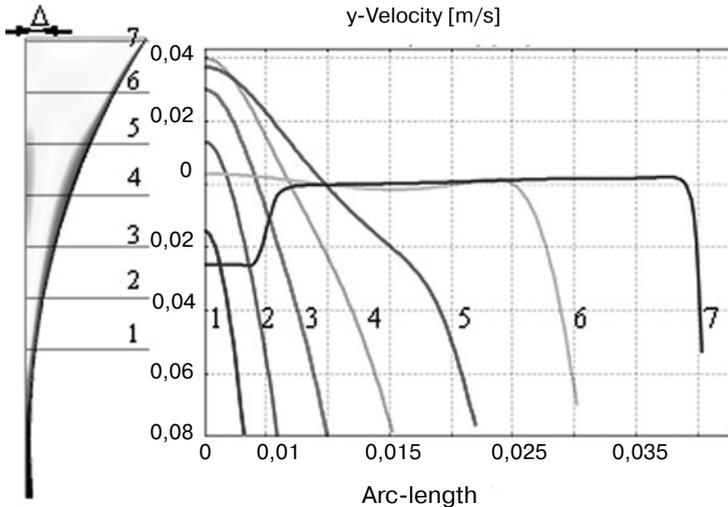
Рис. 3. Распределение поля скоростей в цвете (а); векторное поле скорости в виде стрелок (б) и линий потока (в) в межвалковом зазоре системы со щелевым питателем (вариант 1)

Результаты компьютерного моделирования

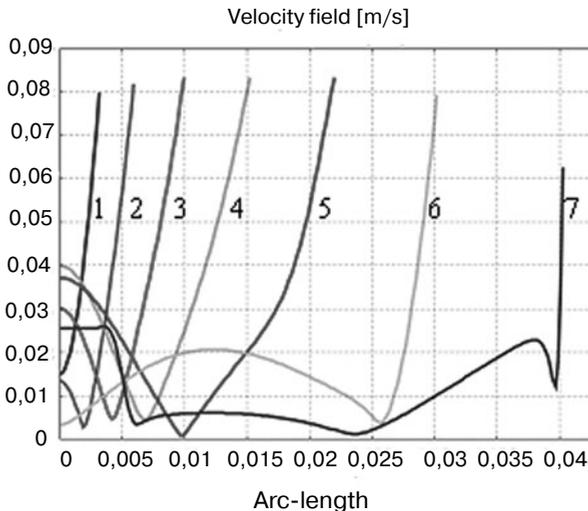
Вариант 1 – подача расплава через щель. Результаты численных расчетов представлены на рис. 3 и 4 для валка радиусом 250 мм при ширине щели $\Delta = 10$ мм и высоте мениска $l = 135$ мм. Показаны увлечение расплава в область, прилегающую к валку, и наибольшие значения скорости в этой приграничной области. Течение металла в 1/2 части межвалкового зазора двухвихревое, причем значения скорости в замкнутой области справа от щели наименьшие.

Гидродинамика процессов литья

Вариант 2 – подача расплава через насадку. На рис. 5 и 6 показаны результаты расчета поля скоростей в области насадки высотой $h = 0,5 \cdot R = 125$ мм в межвалковом пространстве при неизменной высоте мениска $l = 135$ мм. Представлена одновихревая структура движения расплава в расчетной области. Центр вихря находится в зоне насадки несколько выше уровня мениска. Наибольшие значения скорости имеют место на границе с вращающимся валком. Расчеты при меньшей высоте насадки ($h = 0,2$, $R = 50$ мм) показали, что она не влияет на характер течения расплава в исследуемой области – центр вихревой структуры находится в зоне насадки. Аналогичные результаты получены для радиуса валка 500 мм и угла мениска 30° .



а



б

Рис. 4. Изменение продольной составляющей скорости (а) и модуля вектора скорости (б) вдоль семи показанных слева поперечных сечений межвалкового зазора для системы со щелевым питателем (вариант 1)

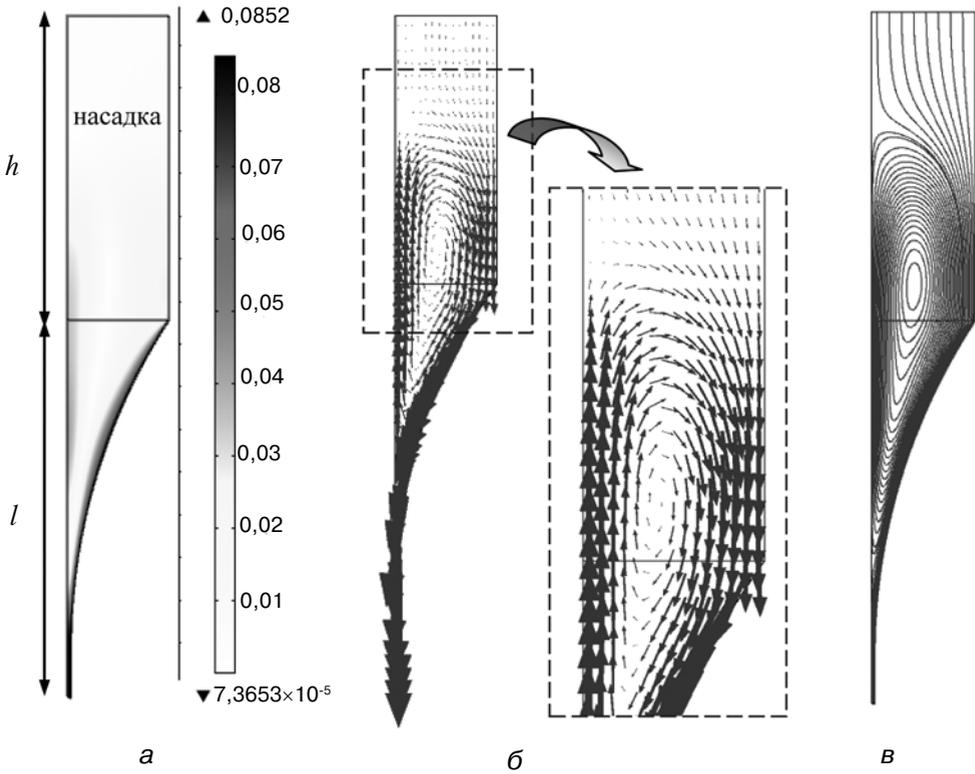


Рис. 5. Распределение поля скоростей в цвете (а); векторное поле скорости в виде стрелок (б) и линий потока (в) в межвалковом зазоре системы с подачей металла через насадку (вариант 2)

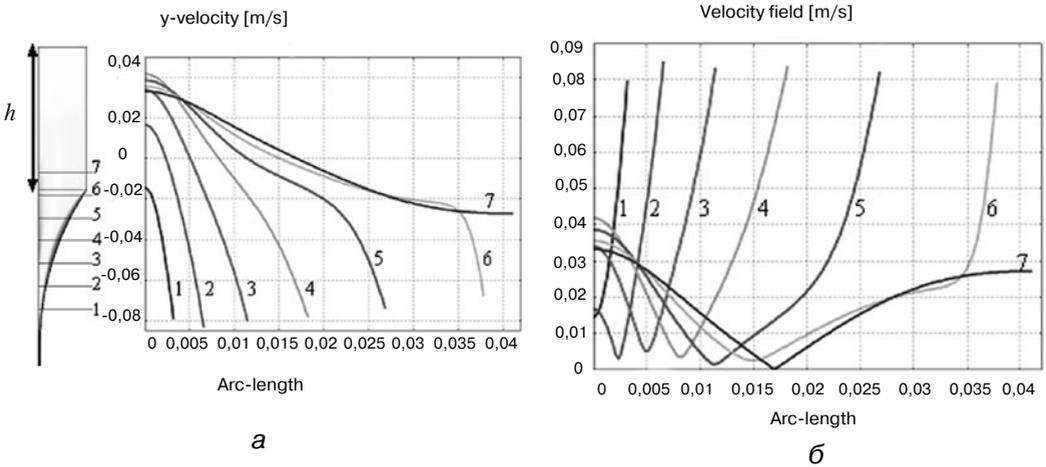


Рис. 6. Изменение y -составляющей скорости (а) и модуля вектора скорости (б) вдоль семи показанных слева поперечных сечений системы с подачей металла через насадку (вариант 2)

Отметим, что характер течения расплава в межвалковом пространстве, полученный в работе в результате компьютерного моделирования, аналогичен картина гидродинамики, представленным в работах [5, 14, 15].

Выводы

Проведено компьютерное моделирование ламинарного течения расплавленной стали в межвалковом пространстве двухвалкового кристаллизатора в случаях подачи расплава через щель и насадку различной высоты.

- Показано, что при подаче расплава через щель течение металла в расчетной области, то есть в 1/2 части межвалкового зазора, двухвихревое, а при подаче через насадку структура течения – одновихревая.

- При сохранении геометрического подобия межвалкового зазора (равенства соотношения радиуса вала и высоты мениска) выявлено, что высота насадки, как и радиус вала, практически не влияют на характер течения расплава.



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. *Гридин А. Ю.* Анализ влияния геометрических параметров области кристаллизации-деформации на протяженность зоны деформации при валковой разливке-прокатке // *Обработка металлов давлением*. – 2013. – № 2 (35). – С. 192–198.
3. *Choudhary S. K., Mazumdar D.* Mathematical modeling of transport phenomena in continuous casting of steel // *ISIJ International*. – 1994. – Vol. 34, № 7. – P. 584-592.
4. *Guthrie R. I. L., Tavares R. P.* Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin-roll/horizontal belt thin-strip casting machines // *Applied Mathematical Modelling*. – 1998. – Vol. 22, №. 11. – P. 851–872.
5. Modelling of melt flow and solidification in the twin-roll strip casting process / *B. Wang, J. Y. Zhang, J. F. Fan et. al.* // *Steel Research International*. – 2009. – Vol. 80, № 3. – P. 218-222.
6. *Matsushita T., Nakayama K., Fukase H., Osada S.* Development and commercialization of twin roll strip caster. // *IHI Engineering Review*. – 2009. – Vol. 42, № 1. – P. 1-9.
7. Thomas Development of the twin-roll casting process / *R. Cook, P. G. Grocock, P. M. et. al.* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 55, № 2. – P. 76-84.
8. *Haga T.* Development of a twin roll caster for light metals // *Journal of of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2010. – Vol. 43, №1. – P. 393-402 .
9. COMSOL multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
10. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
11. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
12. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
13. *Santos C. A., Spim J. A., Garcia A.* Modeling of solidification on twin-roll strip casting // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 102. – P. 33–39.
14. *Zhang Y.* Modelling of vertical twin-roll casting of magnesium alloys. – Master of Engineering thesis // University of Wollongong, Faculty of Engineering. – 2012. – 131 p. – <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=4536&context=theses>
15. *Yayakrishnan V.* Feasibility of producing clad twin roll cast (TRC) AZ31. – A thesis for the degree of Master of Applied Science in Mechanical Engineering // University of Waterloo, Ontario, Canada. – 2011. – 114 p. – <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/6372?show=full>

Поступила 10.07.2014