

УДК 621.771

Смирнов Е. Н.
Кравченко А. В.
Митьев А. П.
Подобный С. О.
Кравченко Е. А.

РАЗРАБОТКА МАЛОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ

В условиях мирового возрастания цен на энергоносители, приоритетным направлением развития металлургии становится всемирное внедрение инновационных энергосберегающих технологий, которые позволяют минимизировать долю энергозатрат в себестоимости проката и повысить, тем самым, его конкурентоспособность. В полной мере указанному направлению соответствует процесс валковой разливки-прокатки, идея которого была предложена Генри Бессемером в 1856 году [1].

Не смотря на то, что технология валковой разливки-прокатки дошла до промышленной реализации [2], актуальность исследования данной технологии остается крайне высокой из-за её повышенной наукоёмкости и, до сегодняшнего дня, неоптимизированности ряда технологических элементов.

Фактом подтверждения этому может служить то, что ведущие исследовательские центры в области металлургии создали за последние годы целую совокупность лабораторных установок: Рейн-Вестфальская высшая школа, г. Ахен, Институт изучения железа им. Макса-Планка, г. Дюссельдорф (Германия), Оксфордский Университет (Великобритания), Технологичный Институт, г. Осака (Япония) и Институт промышленных материалов, г. Боучервилль (Канада) и др. [3].

Основные характеристики имеющихся в указанных исследовательских центрах лабораторных установок приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1

Основные характеристики существующих экспериментальных машин валковой разливки-прокатки

Исследовательский центр	Направление разливки	Диаметр валков, мм	Материал банджа	Ширина рабочего участка валка, мм	Макс. скорость разливки, м/мин	Толщина литой полосы, мм	Макс. масса плавки, кг	Разливаемый материал
Рейн-Вестфальская высшая техническая школа, Ахен	вертикально	580	Cu-Cr-Zr, с Ni-покрытием	150	60	0,6-3	180	сталь
Институт изучения железа им. Макса-Планка, Дюссельдорф	вертикально	330	Elbrodur NIB CH48	120	51,8	1-20	70	сталь
Оксфордский Университет, Оксфорд	горизонтально	400	штамповая сталь	250	60	0,5-6,5	60	Al-сплавы
	вертикально	600						
Технологический Институт, Осака	вертикально	1500	Cu	100	60	3	нет данных	Al-сплавы 6xxx серии
	вертикально	250-300	Cu	50...100	180	1-2,6		Al-сплавы
	горизонтально	300	Cu	100	60	1,8-3,2		Al-сплавы
Институт промышленных материалов, Боучервилль	вертикально	600	Cu-сплав	200	12	4-7,5	1000	сталь и цветные металлы

Анализ приведенных данных показал, что созданные лабораторные установки ориентированы на исследование процесса разливки стали. Вследствие этого создатели вынуждены были увеличивать диаметр валков. Как видно, он изменяется от 1500 мм (Технологичный Институт, г. Осака) до 330 мм (Институт изучения железа им. Макса-Планка, г. Дюссельдорф). Кроме того существенным образом колеблется и масса плавки разливаемого металла. Так же большинство экспериментальных двухвалковых литейно-прокатных модулей имеют максимальную скорость более 50 м/мин.

Вместе с тем, анализ результатов научных работ, выполненных на этих машинах, показывает, что подавляющее число исследований проводится при темпе разливки на порядок меньшем, чем его предельная величина, заложенная в характеристики оборудования. С другой стороны, слабым местом существующих экспериментальных установок является относительно низкая деформирующая способность, ограниченная максимальным крутящим моментом двигателя. При этом анализ данных в имеющихся публикациях показал, что на текущий момент остаются нерешёнными или требуют дальнейшего изучения вопросы следующего характера:

- достижение равномерного теплоотбора при скоростях вращения валков $> 0,5$ рад/с;
- вопросы оптимизации подвода металла в ванну кристаллизации;
- организация процесса получения качественной боковой кромки полосы;
- не отработанные элементы пуска системы;
- вопросы оптимизации глубины ванны жидкого металла в между валками и т. д.

В свете вышеизложенных нерешённых вопросов видится целесообразным применение малых лабораторных установок, которые имеют небольшой диаметр валков [4].

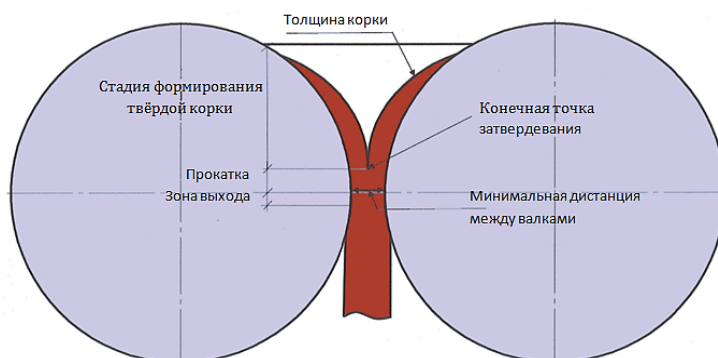


Рис. 1. Схема двухвалковой разливки-прокатки, подчеркивающая аспекты ванны жидкого расплава и образования твердой корки

Таблица 2

Физические свойства сплава [5]

Физические свойства	
Теплопроводность в твердом состоянии, Вт/мК	50.2
Теплопроводность в жидком состоянии, Вт/мК	21
Теплоёмкость в твердом состоянии, Дж/кгК	230
Теплоёмкость в жидком состоянии, Дж/кгК	250
Плотность в твердом состоянии, кг/м ³	7200
Плотность в жидком состоянии, кг/м ³	7200
Скрытая теплота (фазового перехода)	159106
Температура ликвидуса, °С	208
Температура солидуса, °С	183

В табл. 3 приведены некоторые конструктивные и технологические параметры малой лабораторной установки, имеющей диаметр рабочих валков 89 мм. В этом случае становится возможным использование сплавов на основе олова + 15 % Pb (табл. 2), которые имеют достаточно низкую температуру кристаллизации 183 °С, что позволяет минимизировать риски исследований (исключает работу с высокими температурами), а с другой стороны создаются возможности для оптимизации целого ряда параметров. Наиболее привлекательным является

вопрос изучения гидродинамики струи расплава с целью гарантированного получения профиля полосы (особенно боковой кромки). Кроме того данные, полученные в условиях малых лабораторных машин, могут служить критерием и источником натуральных исследований.

Таблица 3

Начальные параметры малой лабораторной установки [5]

Входные параметры	Значения
Диаметр валков (медь), мм	89
Температура поверхности охлаждаемого валка, °С	17
Толщина ванны (плоскость XY), мм	30
Ширина ванны (плоскость YZ), мм	100
Угол между расплавленным металлом и поверхностью валка, °	43
Коэффициент теплоотдачи металл/валок, Вт/м ² К	3000
Скорость вращения валков, рал/с	0,72
Расстояние между валками, мм	3,25
Температура расплава на поверхности ванны, °С	209

Таким образом, основываясь на анализе конструктивных особенностей известных из литературы экспериментальных машин валковой разливки-прокатки можно сделать вывод о целесообразности изучения объекта на малых лабораторных установках.

Целью исследования является разработка конструктивной, кинематической и гидродинамической схемы малой лабораторной установки для реализации процесса валковой разливки-прокатки на сплавах с низким значением температуры ликвидус.

При проектировании экспериментальной установки использовали вертикальную схему ведения процесса, когда жидкий металл подаётся от печи к разливочной ванне, а после в межвалковое пространство в зону кристаллизации металла под действием сил тяжести.

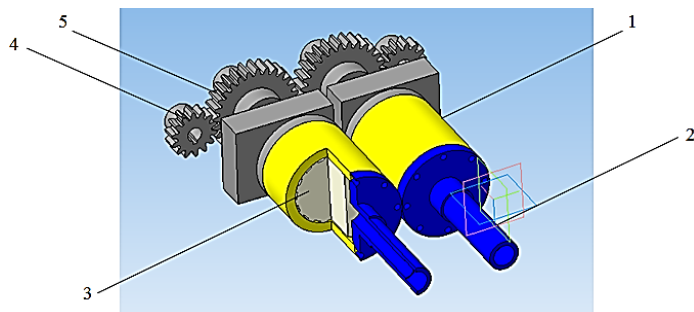


Рис. 2. Схема узла валков-кристаллизаторов (3D-модель):

1 – водоохлаждаемая гильза; 2 – опора-подвод;
3 – внутренняя вставка; 4 – ведущая шестерня;
5 – ведомая шестерня

Валки-кристаллизаторы состоят из водоохлаждаемой медной гильзы и двух осевых вставок, обеспечивающих требуемые характер теплоотбора с внутренней поверхности бандажей (рис. 2). Каждый валок имеет индивидуальный привод постоянного тока, который обеспечивает реализацию высоких крутящих моментов и возможность ведения процесса с требуемыми пластическими деформациями. Кроме того, предусмотрена возможность регулирования расстояния между валками, что позволяет расширить диапазон исследуемых толщин конечной полосы: максимально до 4,0 мм.

Дополнительно, параллельно с созданием физической модели была разработана математическая модель процесса, позволяющая исследовать процесс разливки различных материалов на вышеописанной установке. Модель реализована в программном комплексе ANSYS [6].

Для математического моделирования процессов валковой разливки-прокатки был выбран универсальный пакет прикладных программ ANSYS Int., который используется для решения задач, связанных со многими разделами науки и техники, такими, электротехника, электромагнетизм, гидродинамика, газовая динамика и т. д.

Результаты выполненного проектирования в виде 3D-модели и фотографии разливного блока приведены на рис. 3.

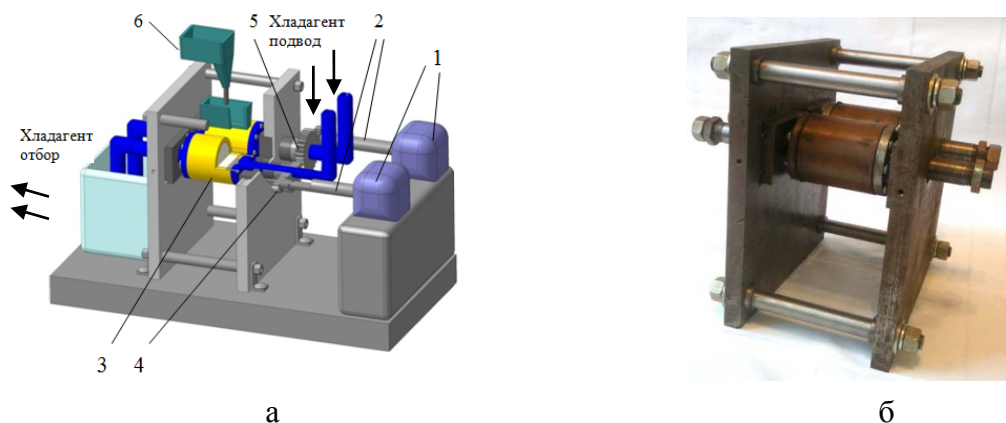


Рис. 3. Объёмная модель проектируемой лабораторной установки процесса валковой разливки-прокатки (а) и фотография лабораторной натурной установки (б):

1 – двигатели привода; 2 – шпиндели; 3 – валки; 4 – ведущая шестерня; 5 – ведомая шестерня; 6 – ковш разливочного материала

Технические характеристики изготовленной лабораторной установки в части разливочной клетки представлены в табл. 4.

Таблица 4
Основные характеристики проектируемой экспериментальной установки процесса валковой разливки-прокатки

Диаметр валков, мм	76
Толщина стенки, мм	10
Длина рабочей зоны валка, мм	80
Расстояние между полностью разведёнными валками, мм	3,75
Температура водоохлаждаемой поверхности, °С	17–20
Частота вращения валков, Рад / с	0–0,72
Температура кристаллизации моделирующего материала, °С	80–210
Планируемый диапазон толщины полосы, мм	1–3,75
Планируемые материалы для разливки	Парафин, Pb +15 % Sn

Создание математической модели для исследования процессов перемешивания металлического расплава и затвердевания полосы при валковой разливке осуществлялось в среде *ANSYS CFX*, обладающей следующими возможностями:

- моделирование невязких, ламинарных и турбулентных потоков;
- моделирование теплопереноса, включая различные виды конвекции, сопряженный теплообмен и излучение и т. д.

В основе разработанной математической модели лежит решение с помощью метода конечных элементов основного уравнения нестационарной теплопроводности (1):

$$\rho(T) \cdot C_{эф}(T) \cdot \frac{dT}{d\tau} = \frac{d}{dx} \left(\lambda_{эф}(T) \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \cdot \left(\lambda_{эф}(T) \cdot \frac{dT}{dy} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность металла (кг/м³);

$C_{эф}$ – эффективная теплоемкость металла (кДж/кг·°С);

$\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности (Вт/м²·°С);

T – температура (°С);

τ – время (с).

Из уравнения Навье-Стокса, включающие:

- уравнение неразрывности (закон сохранения массы);
- уравнение импульса (закон сохранения импульса);
- уравнение энергии (закон сохранения энергии).

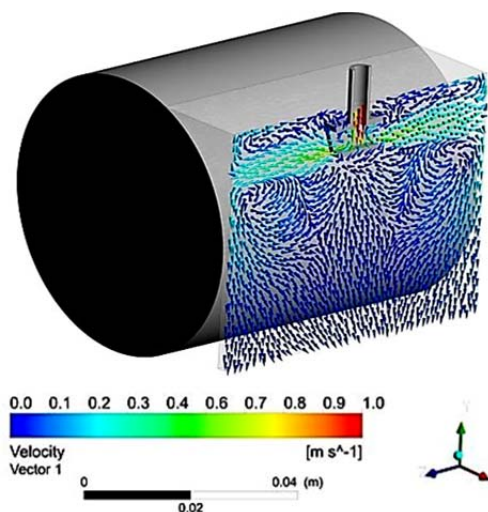


Рис. 4. Результирующая скорость движения расплава (векторная картина) в продольной плоскости двухвалкового кристаллизатора

На первом этапе моделирования, решалась задача способа подачи расплава в кристаллизатор. Проведенные исследования показали значительное влияние распределения потоков расплава в кристаллизаторе (рис. 4) на процессы затвердевания и необходимость разработки погружного стакана.

ВЫВОДЫ

На основании анализа конструкций имеющихся лабораторных установок разработан вариант малой лабораторной установки, предназначенной для исследования гидродинамики струи расплава и оптимизации ряда технологических параметров. Результаты первичного математического моделирования для получения технической характеристики установки показали, что она позволяет использовать широкий спектр моделирующих материалов, имеющих достаточно низкую температуру кристаллизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nakayama K. Twin roll caster / K. Nakayama // *Zairyo to Prosesu CAMP ISIJ*. – 2009. – № 22. – С. 242–245.
2. Schueren V. The Castrip Process – an Update on Process Development at Nucor Steel's First Commercial Strip Casting Facility / V. Schueren, P. Cambell, W. Blejde // *Iron & Steel Technology*. – 2008. – July. – С. 64–70.
3. Степанов А. Н. Производство листа из расплава / А. И. Степанов, Ю. В. Зильберг, А. А. Неуструев. – М. : *Металлургия*, 1978. – 160 с.
4. Santos C. A. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – № 102. – С. 33–39.
5. Saitoh T. Two-dimensional model for twin-roll continuous casting / T. Saitoh, H. Hojo, H. Yaguchi, C. G. Kang // *Metall Trans.* – 1989. – № 20.B. – С. 381.
6. Гридін О. Ю. Математичне моделювання процесу валкової розливки прокатки за допомогою програми Ansys / О. Ю. Гридін, В. М. Данченко // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 5. – С. 90–94.

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;
 Кравченко А. В. – аспирант ДонНТУ;
 Митьев А. П. – канд. техн. наук, доц. ДонНТУ;
 Подобный С. О. – магистр ДонНТУ;
 Кравченко Е. А. – магистр ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 03.04.2012 г.