

УДК 621.771.23:669.71

Гридин А. Ю.

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ-ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОТЯЖЕННОСТЬ ЗОНЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ

Повышение энергоэффективности и экологичности производства являются, наряду с разработкой и освоением выпуска новых высокопрочных материалов, основными векторами развития мировой металлургической промышленности на протяжении последнего десятилетия. Одним из путей одновременного решения указанных задач при изготовлении листов из стали и сплавов легких металлов может служить внедрение технологий с использованием методов получения тонкого подката непосредственно из расплава. К наиболее распространенным способам формирования листов и полос малой толщины из расплавленного материала относят разливку в ленточные и валковые кристаллизаторы [1].

В установках первого типа затвердевание материала осуществляется на одной или между двумя бесконечными стальными лентами, как показано на рис. 1, а и 1, б соответственно. Интенсивный теплоотвод, необходимый для быстрой кристаллизации металла, обеспечивается на подобных агрегатах за счет организации водяного или водо-воздушного спрейерного охлаждения лент с обратной их стороны. На машинах с ленточными кристаллизаторами производится плоский подкат толщиной от 9 до 70 мм и шириной до 1600 мм [2]. Марочный сортамент двухленточных установок включает в себя сплавы алюминия, меди, магния и свинца. Одноленточные машины ориентированы преимущественно на производство стали.

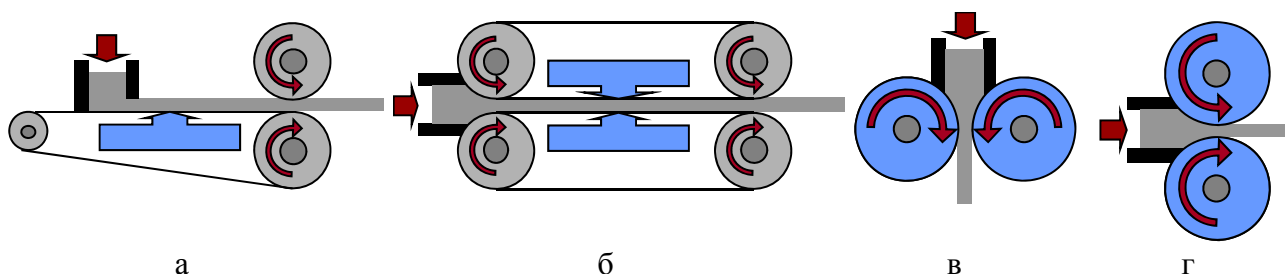


Рис. 1. Схемы наиболее распространенных способов получения полос непосредственно из расплава на машинах с одноленточным кристаллизатором (а), двухленточным кристаллизатором, также известным как процесс Хазелетта (б), а также на установках с двухвалковыми кристаллизаторами с вертикальной (в) и горизонтальной (г) операционными плоскостями [1]

В агрегатах с двухвалковым кристаллизатором затвердевание материала осуществляется между двумя вращающимися навстречу друг другу валками (см. рис. 1, в и 1, г). Конструкция составного валка-кристаллизатора предполагает наличие бандажа, изготавливаемого из жаропрочного материала с высокой теплопроводностью, внутренняя поверхность которого омывается циркулирующей в замкнутой системе водой [3]. В технической литературе имеются также сведения о достаточности для интенсивного теплоотбора принудительного внутреннего и внешнего воздушного охлаждения валков [4]. Однако практического применения исключительно воздушная схема охлаждения инструмента пока не получила. Как видно из рисунка 1, подача расплава в валки-кристаллизаторы может осуществляться как вертикально, так и горизонтально. Традиционно установки с горизонтальной операционной плоскостью используются для производства листов из алюминиевых и магниевых сплавов.

Вертикальная схема подачи жидкого металла чаще всего реализуется при получении полос из сталей и сплавов свинца. Вместе с тем разделение вертикальных и горизонтальных агрегатов по марочному сортаменту установок является условным. В литературе можно найти единичные примеры реализации процесса, отличающиеся от приведенной выше классификации. На сегодняшний день на машинах с двухвалковым кристаллизатором промышленно производят листы толщиной от 1 до 12 мм и шириной до 2350 мм.

По оценкам экспертов, в мировой индустрии эксплуатируется около 600 агрегатов для получения тонких полос непосредственно из расплава, половина из которых работает в КНР [5]. Подавляющее большинство из указанного числа установок, в том числе и две находящиеся в Украине, используются для обработки алюминия и его сплавов. Производство литых стальных листов в настоящее время промышленно осуществляется на пяти технологических линиях в США, ФРГ и Южной Корее. Еще один агрегат строится фирмой Bao Steel в КНР [6]. Примерно 90 % от всех эксплуатирующихся в мире установок прямого литья тонких полос являются машинами с двухвалковым кристаллизатором [5]. Такое соотношение обусловлено определенными преимуществами данной схемы, речь о которых и пойдет ниже.

Отличительной особенностью реализации разливки в двухвалковых агрегатах, по сравнению с производством листов на установках ленточного типа, является возможность пластической деформации металла в очаге между валками непосредственно после его сквозной кристаллизации, из-за чего процесс получил название валковой разливки-прокатки. Благодаря пластическому формоизменению при высоких температурах активируются процессы рекристаллизации, вследствие чего возможным становится превращение характерной литой дендритной микроструктуры в глобулярную мелкозернистую. За счет этого улучшаются механические свойства полос, формируемых непосредственно из расплава. В некоторых случаях качество листового материала после валковой разливки-прокатки уже отвечает требованиям стандартов и не требует дополнительной обработки металла путем горячей или холодной прокатки, что продемонстрировано, в частности, в работе [7] на примере получения полос из алюминиевого сплава EN AW-7020.

Степень деформации, которой подвергается материал в двухвалковом кристаллизаторе, с одной стороны должна быть достаточной для формирования рекристаллизованной мелкозернистой структуры, а с другой – излишне высокие обжатия в сочетании с неблагоприятным температурным режимом работы водоохлаждаемых валков, для которого характерны большие перепады температур и соответствующий высокий уровень термических напряжений, приводят к повышенным нагрузкам на инструмент и к его ускоренному износу. Также ведение процесса валковой разливки-прокатки с большими степенями пластического формоизменения приводит к снижению производительности агрегата. Таким образом, при производстве листов непосредственно из расплава в двухвалковых кристаллизаторах существует оптимальное значение обжатия, которое подбирается индивидуально в зависимости от обрабатываемого материала. В литературе имеются общие сведения о необходимых минимальных степенях деформации при валковой разливке-прокатке, которые согласно М. Я. Бровману и др. составляют для сталей 15 % [8]. При обработке в двухвалковых кристаллизаторах алюминия и его сплавов, в соответствии с данными М. Ферри, минимальный уровень обжатий должен находиться в диапазоне от 20 % до 30 % [9]. Однако, как уже отмечалось выше, в зависимости от комбинации легирующих элементов в сплаве, величина требуемой степени деформации может быть выше указанных значений.

Очевидно, что для успешной реализации процесса валковой разливки-прокатки и получения в данной установке полос высокого качества, необходимой является информация о протекании процессов кристаллизации и последующего пластического формоизменения. Ввиду того, что непосредственное наблюдение за зоной кристаллизации-деформации в ходе разливки существенно затруднено, экспериментальные исследования закономерностей формирования полос из расплава опираются чаще всего на косвенные признаки, описанные, в частности, в работах [10, 11]. В результате, выводы о сложном взаимодействии в системе металл-валки-кристаллизаторы основываются на относительно просто регистрируемых данных

о деформирующей силе, о температуре материала на входе и выходе из валков, о микроструктуре производимых полос. Кроме того, осуществление натуральных экспериментов связано со значительными материальными и временными затратами, что дополнительно ограничивает возможности их проведения. Указанные причины способствовали широкому распространению при анализе процесса валковой разливки-прокатки методов математического моделирования. При этом для теоретических исследований условий формирования тонких полос из расплава металлов используются модели как на основе эмпирических формул, так и на основе дифференциальных уравнений, решение которых осуществляется при помощи численных методов.

Из эмпирических подходов по описанию развития кристаллизации материала в межвалковом пространстве наибольшее распространение получила предложенная М.К. Флеммингом в 1974 году функция зависимости толщины затвердевшей корки металла от корня продолжительности кристаллизации (1) [9], которая в модифицированном виде до сих пор широко используется при анализе процесса валковой разливки-прокатки [8, 12]:

$$\delta = k \cdot \sqrt{t}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – толщина сформировавшейся на валках-кристаллизаторах твердой корки материала;

$k$  – коэффициент затвердевания, мм/с<sup>0,5</sup>;

$t$  – время кристаллизации в секундах.

Очевидным преимуществом метода расчета с использованием формулы М. К. Флемминга является его простота. Однако данному подходу присущи и серьезные недостатки: значения эмпирического коэффициента  $k$  в настоящее время подобраны для ограниченного числа материалов и приводятся в литературе в виде диапазона величин, составляющих, например, для углеродистых сталей от 2,7 до 3,6 мм/с<sup>0,5</sup> [13], что затрудняет его обоснованный выбор. Кроме того, формула М. К. Флемминга не принимает во внимание перегрев расплава выше температуры плавления, который всегда имеет место при подаче жидкого металла в двухвалковый кристаллизатор. Также затруднительным представляется адекватный учет изменения температуры инструмента на начальной стадии процесса валковой разливки-прокатки.

Указанных недостатков лишены более сложные модели, решения в которых получают при помощи численных методов, наибольшее распространение из которых получили метод конечных разностей и метод конечных элементов. Данные методы являют собой мощный математический инструмент, позволяющий с достаточно высокой точностью описывать процессы, протекающие при прохождении материала через зону кристаллизации-деформации. Необходимым для этого является решение связанных задач тепло- и массопереноса в системе валок-металл с учетом изменения фазового состояния последнего. Типичными примерами приложения моделей на основе численных методов для описания процесса валковой разливки-прокатки служат расчеты с целью определения положения фронта кристаллизации [14, 15], характеристики тепловых условий работы валков [16, 17], формируемой микроструктуры и связанной с ней микросегрегации [18]. Ранее в работах [17, 19, 20, 21] автором подробно рассматривались существующие подходы к математическому моделированию формирования полос из расплава в двухвалковом кристаллизаторе, а также анализировались результаты теоретических исследований и зависимости, полученные расчетным путем. В целом, опираясь на известные из технической литературы данные, можно сделать вывод о том, что общими недостатками существующих моделей и, как следствие, полученных с их помощью результатов, является отсутствие учета тепла, выделяемого от работы деформации, а также упрощения, часто принимаемые при задаче теплофизических и механических свойств обрабатываемого металла и материала инструмента без приема во внимание их температурной зависимости. Кроме того, до настоящего времени не проводилось комплексных исследований независимого влияния на формирование полосы и степень пластического формоизменения, получаемого материалом при валковой разливке-прокатке и в значительной мере определяющего

качество получаемого продукта, таких параметров процесса, как температура подачи расплава, скорость вращения валков, общая протяженность зоны кристаллизации-деформации и величина межвалкового зазора. Соответственно отсутствует возможность установления количественной зависимости между показателями валковой разливки-прокатки при переносе данной перспективной технологии на производство листов из новых материалов.

Целью работы является анализ влияния геометрических параметров зоны кристаллизации-деформации, таких как ее общая длина и высота в сечении выхода из валков-кристаллизаторов, на закономерности формирования полосы из расплава, в частности – на протяженность зоны деформации – показатель, определяющий микроструктуру и свойства получаемого валковой разливкой-прокаткой плоского продукта. В качестве обрабатываемого материала выбрана среднеуглеродистая легированная сталь 42CrMo4 (1.7225 по DIN EN 10083-3: 2007-01), относящаяся к сталям, улучшаемым термической обработкой. Ввиду высокой прочности в закаленном состоянии, превышающей 1000 МПа, данный материал является перспективным к использованию в виде листов и полос. Однако традиционными методами, включающими непрерывную разливку слябов и последующую горячую прокатку, производство плоского продукта толщиной менее 10 мм из стали 42CrMo4 не ведется.

Для осуществления теоретического анализа использовалась двумерная конечно-элементная математическая модель процесса валковой разливки-прокатки, подробно рассмотренная и протестированная в работах [17, 19, 21]. Реализация конечно-элементной модели непрерывного формирования полосы из расплава выполнялось с помощью программы ANSYS™ v.13 с подключенным модулем FLOTRAN CFD и интегрированными пользовательскими APDL-субрутинами, призванными адаптировать коммерческий программный продукт для расчетов процессов кристаллизации и деформации между вращающимися водоохлаждаемыми изнутри бандажированными валками.

Температурная часть теоретического описания базируется на решении дифференциального уравнения теплопроводности со свободным членом, представляющим собой мощность внутренних источников тепла и позволяющим, таким образом, учитывать энтальпию фазового перехода и тепло от работы деформации. Перемещение материала в межвалковом пространстве рассматривается как течение вязко-пластической среды с переменным значением вязкости, изменяемой в соответствии с моделью Бингама. Такой подход позволяет описывать поведение металла в расплавленном состоянии по аналогии с ньютоновской жидкостью, а после кристаллизации течение материала подчиняется законам, подобным применяемым при рассмотрении формоизменения твердого тела. В частности, по аналогии с методом гидродинамических приближений, значение переменной вязкости на каждом конечном элементе принимается как отношение напряжения текучести к интенсивности скорости сдвиговой деформации. Более подробно использование модели Бингама для теоретического анализа процессов, проходящих в двухвалковом кристаллизаторе, рассмотрено в работе [21].

Математическое моделирование проводилось для двух вариантов исполнения конструкции установок валковой разливки-прокатки – лабораторного и промышленного среднегабаритного. Следует отметить, что экспериментальная машина со схожими конструктивными параметрами была спроектирована и изготовлена в рамках совместной научно-исследовательской работы между кафедрой обработки металлов давлением НМетАУ и Институтом материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница на базе немецкого научного центра [3]. Появление же среднегабаритной установки валковой разливки-прокатки видится автору наиболее вероятным в условиях украинских металлургических предприятий. Для осуществления анализа основным отличием указанных конструктивных подходов является учет разницы между диаметрами валков, который составил для лабораторного стана 370 мм, а для промышленного – 680 мм, а также диапазонами абсолютных значений протяженностей зоны кристаллизации-деформации, которые принимались равными от 70 мм до 130 мм и от 150 до 210 мм соответственно. Длина бочки валков-кристаллизаторов лабораторной и промышленной установок в данном случае не оказывает существенного влияния на результаты теоретического анализа, поскольку при построении модели тепломассоперенос по ширине листа в ходе валковой разливки-прокатки принимался пренебрежимо малым.

Толщина стенки водоохлаждаемых изнутри бандажей составных валков принята равной 40 мм. Традиционно бандаж валков-кристаллизаторов, используемых для разливки стали, изготавливаются из меди, дополнительно легированной хромом и цирконием. За счет этого сплав CuCr1Zr (по DIN EN 12163) обладает теплопроводностью, сравнимой с технической чистой медью, при шестикратном превышении значения предела текучести последней. Теплофизические свойства материала определялись в виде функций температуры на основании аппроксимации данных работы [22], приведенных для чистой меди. Температура охлаждающей жидкости принималась равной 20 °С, а объем замкнутой водоохлаждающей системы и расход воды считался достаточным для того, чтобы не учитывать ее разогрев. Коэффициенту теплопередачи на контакте внутренней поверхности бандаж-вода присваивалось значение 3000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для описания свойств жидкого металла приняты следующие физические константы: плотность – 6900 кг/м<sup>3</sup>; удельная теплоемкость – 766 Дж/(кг·К); теплопроводность – 35 Вт/(м·К); температуропроводность – 6,62·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с. Температура ликвидус стали 42CrMo4 составляет 1494 °С.

Заданное распределение плотности теплового потока вдоль линии контакта металла с валком аппроксимировано по результатам экспериментальных данных [23] следующей формулой:

$$q = 4,75 - 2,5 \cdot t, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока в МВт/м<sup>2</sup>;

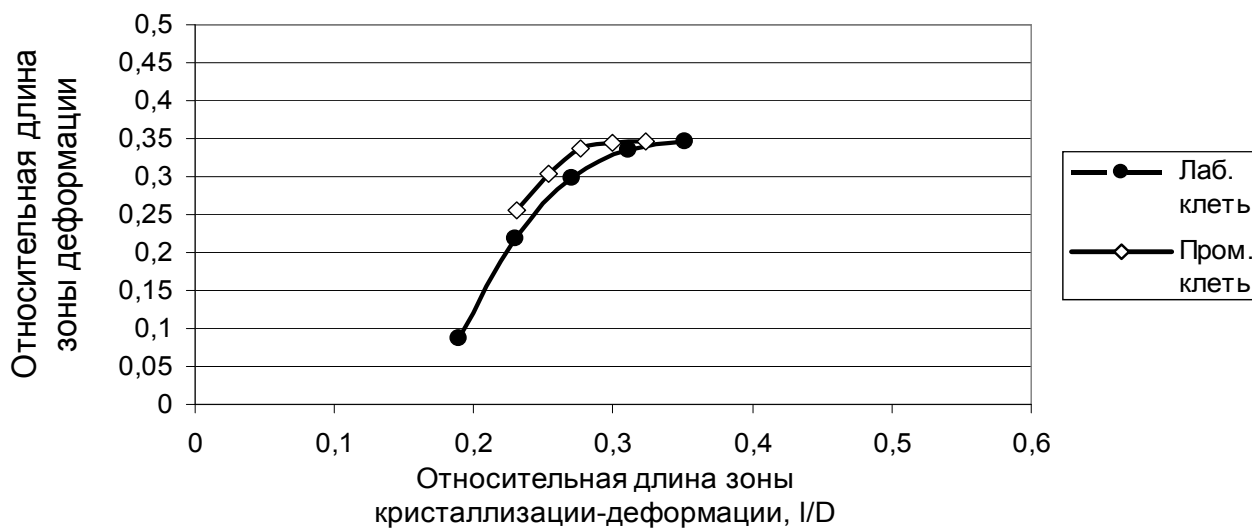
$t$  – время в секундах.

Для независимого рассмотрения влияния различных параметров валковой разливки-прокатки на протяженность зоны деформации при формировании полосы из расплава базовые значения технологических факторов, таких как температура и скорость вращения валков, были приняты равными 1550 °С и 7 об/мин соответственно. Базовые значения общей протяженности области кристаллизации-деформации устанавливались на уровне 100 мм для лабораторной установки и 180 мм для среднегабаритной промышленной машины. Величина межвалкового зазора в сечении выхода металла из валков, соответствующая конечной толщине полосы, варьировалась в пределах от 1,5 до 5 мм. Базовое значение данного геометрического показателя при анализе влияния на валковую разливку-прокатку других перечисленных факторов было выбрано равным 3 мм. Каждый из расчетов выполнялся до полного осуществления пятого оборота валков-кристаллизаторов, и изучение полученных температурных полей проводилось для последнего шага по времени. Как было ранее определено в работе [17], после пятого оборота валков температурное поле бандажей практически не изменяется – процесс входит в установившуюся стадию.

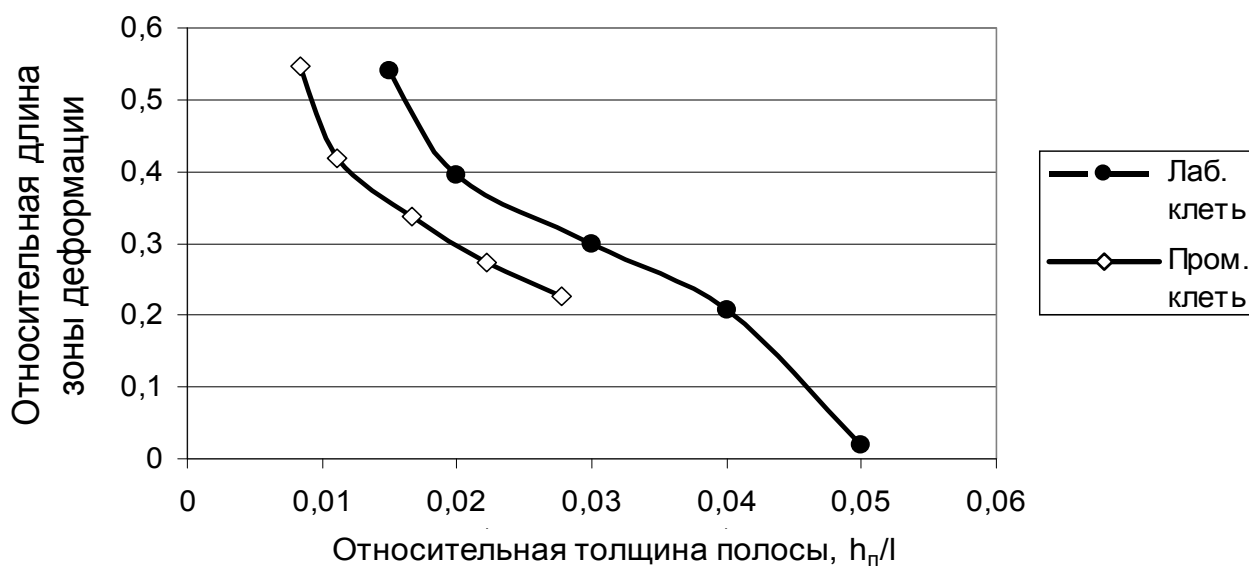
Обобщенные результаты анализа данных о распределении температур и связанного с ними расположения фронта кристаллизации между валками, полученных в ходе конечно-элементного математического моделирования, представлены в виде графиков зависимостей длины зоны деформации от общей протяженности зоны кристаллизации-деформации и от толщины полосы на рис. 2, а и 2, б соответственно. Для корректного сопоставления данных и удобства их последующего использования в теоретических описаниях процесса валковой разливки-прокатки геометрические параметры были приведены к обезразмеренному виду путем отношения длины зоны деформации к общей длине зоны кристаллизации-деформации  $l$ , длины зоны кристаллизации деформации  $l$  к диаметру валка-кристаллизатора  $D$  и толщины сформированной полосы  $h_n$  к общей длине зоны кристаллизации-деформации  $l$ .

Анализ положения кривых полученных графиков показывает, что характер изменения относительной длины зоны деформации не зависит от варианта конструктивного исполнения клетки машины валковой разливки-прокатки. Увеличение общей протяженности зоны кристаллизации-деформации приводит к росту длины области кристаллизации в абсолютных величинах. Однако относительная длина участка затвердевания при этом уменьшается, что иллюстрируется ростом относительной протяженности зоны деформации, интенсивность

которого с увеличением уровня ванны расплава снижается. Данная зависимость носит характер, близкий к параболической функции. Уменьшение толщины полосы, напротив, приводит к увеличению длины области деформации, причем интенсивность роста значений данной величины в диапазоне малых и больших толщин выше, чем в средней части варьируемого интервала межвалковых зазоров.



а



б

Рис. 2. Графики зависимости относительной длины зоны деформации от общей длины зоны кристаллизации-деформации (а) и от толщины формируемой полосы (б)

## ВЫВОДЫ

В ходе теоретического анализа валковой разливки-прокатки путем конечно-элементного математического моделирования в среде ANSYS с использованием оригинальных пользовательских модулей исследовано влияние геометрических параметров зоны кристаллизации-деформации на закономерности формирования полосы из расплава улучшаемой стали 42CrMo4 в двухвалковом кристаллизаторе. Новые результаты в сочетании с полученными ранее данными о влиянии на процесс температурно-скоростных факторов разливки позволяют создавать оптимальные технологические условия получения в подобных установках качественных стальных листов и полос.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *New strip casting process for magnesium alloys* / Bach Fr.-W., Hepke M., Rosberg A. Hepke M. // *Proceeding of International Conference on Continuous Casting of Non-Ferrous Metals*. – Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2006. – P. 81–86.
2. Коновалов Ю. В. *Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов* / Ю. В. Коновалов // *Производство проката*. – 2009. – № 9. – С. 37–43.
3. *Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос* / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, В. Н. Данченко, Фр.-В. Бах // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 5. – С. 46–51.
4. Mucciardi F. *A waterless caster for matte/slag granulation* / F. Mucciardi, E. Palumbo, N. Jin // *Proceeding of 4<sup>th</sup> International Conference Copper 99-Cobre 99*. – 1999. – Vol. 4. – P. 153–169.
5. Georgi-Maschler T. *Maßnahmen zur Produktivitätssteigerung an einer Aluminium-Bandgießanlage* / T. Georgi-Maschler // *Proceeding of 28. Aachner Stahlkolloquium*. – Aachen, 2013. – P. 187–196.
6. *Herstellung innovativer Stahlkonzepte über das Bandgießverfahren* / W. Klos, C. Höcklung, J.-U. Becker, L. Ernenputsch // *Proceeding of 28. Aachner Stahlkolloquium*. – Aachen, 2013. – P. 217–227.
7. Гридин А. Ю. *Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой* / А. Ю. Гридин, М. Шапер, В. Н. Данченко // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – С. 184–194.
8. Бровман М. Я. *Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке* / М. Я. Бровман, В. А. Николаев, В. П. Полухин // *Металлы*. – 2007. – № 1. – С. 44–49.
9. Ferry M. *Direct strip casting of metals and alloys* / M. Ferry. – Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2006. – 292 p.
10. Bercovici S. J. *Optimisation of 3C roll caster by automatic control* / S. J. Bercovici // *Proc. of conference "Light Metals"*, TMS, New York, 1985. – P. 1285–1299.
11. Гридин А. Ю. *Экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке* / А. Ю. Гридин // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»* : зб. наук. пр. : Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 42. – С. 48–58.
12. Рудой Л. С. *Двухвалковая установка непрерывной разливки стали (ДВ УНПС)* / Л. С. Рудой // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С. 244–246.
13. Бровман М. Я. *Непрерывная разливка металлов* / М. Я. Бровман. – М. : Экомет, 2007. – 484 с.
14. Зиновьев А. В. *Моделирование процесса непрерывного литья тонких полос в валковом кристаллизаторе* / А. В. Зиновьев, В. С. Савченко, А. А. Бондаренко // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів*. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2005. – С. 32–36.
15. Daamen M. *Bandgießen und Weiterverarbeitung profilierter Bänder und hochmanganhaltiger Stähle* / M. Daamen, G. Vidoni, G. Hirt // *Proceeding of 28. Aachner Stahlkolloquium*. – Aachen, 2013. – P. 207–216.
16. Park C. *Thermal analysis of the roll in the strip casting process* / C. M. Park, W. S. Kim, G. J. Park // *Mechanics Research Communication*. – 2003. – № 30. – P. 297–310.
17. Гридин А. Ю. *Математическое моделирование температурного поля металла и валков в процессе валковой разливки-прокатки* / А. Ю. Гридин // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 75–83.
18. *Modelling of the micro-segregation of twin-roll thin strip casting* / X. M. Zhang, Z. Y. Jiang, X. H. Liu, G. D. Wang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – № 162–163. – P. 591–595.
19. Гридин О. Ю. *Математичне моделювання процесу валкової розливки-прокатки за допомогою програми ANSYS* / О. Ю. Гридин, В. М. Данченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 5. – С. 90–94.
20. Гридин А. Ю. *Влияние температурно-скоростных параметров процесса непрерывной валковой разливки на тепловое состояние металла* / А. Ю. Гридин // *Теория и практика металлургии*. – 2009. – № 3. – С. 71–75.
21. Grydin O. *Mathematische Modellierung des Gießens von dünnen Blechen nach dem Zwei-Rollen-Verfahren* / O. Grydin, E. Batoryshina, Fr.-W. Bach // *Proceeding of ANSYS Conference, 27th CADFEM Users' Meeting*. – Leipzig, 2009. – 2.11.15. – P. 1–9.
22. Volkova O. *Mathematische Modellierung und experimentelle Untersuchung der Schnellerstarrung von Stählen*: Freiberg, Technische Universitaet Bergakademie Freiberg, Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie. Diss., 2002. – 138 s.
23. *Measurements, simulations, and analyses of instantaneous heat fluxes from solidifying steels to the surfaces of twin roll casters and of aluminum to plasma-coated metal substrates* / R. I. L. Guthrie, M. Isac, J. S. Kim, R. P. Tavares // *Metallurgical and Materials Transactions. B. Process Metallurgy and Materials Processing Science*. – 2000. – Vol. 31 (№5). – P. 1031–1047.

Гридин А. Ю. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: grydin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.03.2013 г.