

УДК 621.771.23:669.71

Столбченко М. Ю.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ РАЗЛИВКИ НА ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ ПОЛОС ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Высококачественные полуфабрикаты и изделия из сложнoleгированных сплавов, обладающие заданными высокими механическими свойствами, находят все более широкое применение в различных отраслях машиностроения. Для получения тонкого плоского продукта одной из самых современных и перспективных технологий является валковая разливка-прокатка. Этот процесс заключается в совмещении операций литья и прокатки металла в одном агрегате – двухвалковом кристаллизаторе. Благодаря сокращению операций горячего передела по сравнению с традиционной технологией получения полос, на таких установках достигается существенная экономия энергоресурсов, что в наше время является весьма актуальным. Одновременно снижаются капитальные затраты при строительстве, занимаемые производственные площади и количество обслуживающего персонала. Современные установки валковой разливки-прокатки ведут свою историю от патента сэра Г. Бессемера 1865 г. [1]. Строительство промышленных установок началось в середине XX века, а к началу нового столетия в мире насчитывалось уже несколько сотен агрегатов для разливки различных сплавов цветных металлов и стали. Высокая скорость кристаллизации металла между валками обеспечивает однородный состав готовой полосы, что делает эту технологию незаменимой при производстве полос из высоколегированных сплавов, содержащих элементы с различными температурами плавления. Однако, широкое распространение данной технологии на протяжении нескольких десятилетий сдерживала ее низкая производительность, ограниченная с одной стороны временем, необходимым для полной кристаллизации металла, а с другой стороны необходимой степенью деформации в валковом кристаллизаторе, его прочностью и износостойкостью [2]. Определению оптимальных режимов ведения процесса валковой разливки-прокатки, при которых можно получать полосы заданных размеров и заданного качества при максимальной производительности оборудования, посвящено немало работ. Проводимые экспериментальные исследования имеют ограничения, связанные с геометрическими размерами, техническими характеристиками экспериментальных установок и сортаментом разливаемых на них сплавов. При этом прямое наблюдение процессов, происходящих в зоне кристаллизации-деформации, ввиду ее закрытости остается практически невозможным для исследователя. Поэтому одновременно с развитием экспериментальных исследований, остро стал вопрос о создании математических и физических моделей, описывающих процесс валковой разливки-прокатки. Физические модели зачастую создаются для решения конкретной проблемы либо определения влияния лишь нескольких факторов, и не рассматривают весь процесс в комплексе. Известны модели для определения коэффициента теплоотдачи от разливаемого металла к кристаллизатору [3, 4], а также для исследования течения жидкого металла в зоне кристаллизации [5].

Первой математической моделью, описывающей течение и кристаллизацию металла в валковом кристаллизаторе, стала одномерная модель Миязавы и Щекели [6]. Она позволяла получить распределение скоростей, температур и напряжений по длине зоны кристаллизации-деформации. В дальнейшем она была расширена до двух измерений Саито [7], который также использовал в своем решении метод конечных разностей, имеющий недостатком неточное описание криволинейной формы зоны кристаллизации-деформации. Аналогичный недостаток имеет и модель Сантоса [8], достоверно описывающая поле скоростей и температур в металле. Дальнейшее развитие моделирования течения металла в валковом кристаллизаторе связано с применением метода конечных элементов. В работах Гутри и Тавареса [9, 10] показана возможность применения CFD-систем для моделирования течения жидкости в зоне кристаллизации-деформации и при помощи созданной трехмерной модели исследовано влияние на него конфигурации питателя. Однако в данной модели не учитывается

изменение свойств металла в ходе кристаллизации. Чангом [11] предложен оригинальный метод определения положения линий ликвидус и солидус путем многократного перестроения конечно-элементной сетки, что требует значительных ресурсов и видится сравнительно сложным. Также можно отметить модель расчета кристаллизации металла в двухвалковом кристаллизаторе, предложенную А. В. Зиновьевым, В. С. Савченко и А. А. Бондаренко [12] для сплава Ti-Zn и стали 20X3BMФ. Созданные математические модели используют либо собственные решатели, разработанные авторами, либо же применяется разработанное ранее узкоспециализированное коммерческое программное обеспечение [13–14]. Первый подход является более трудоемким, а второй – менее универсальным. Альтернативным решением при выборе базы для математической модели является использование комплексных программных пакетов конечно-элементного моделирования, одним из которых является пакет ANSYS американской компании Ansys inc. Преимуществом данного программного обеспечения является наличие гидрогазодинамического модуля Flotran, позволяющего рассчитывать поток жидкости, имеющей переменную вязкость, совместно с температурной задачей. При этом широкие возможности сопряженного решения в ANSYS значительно увеличивают спектр данных, которые возможно получить при моделировании процесса валковой разливки-прокатки. Также отличительной особенностью модуля Flotran является возможность рассмотрения металла как неньютоновской жидкости, при помощи которой пользователем могут быть связаны между собой температура, условная вязкость и скорость сдвиговой деформации в металле [15]. Использование данного модуля для моделирования течения металла в валковом кристаллизаторе освещено в работах [16–17], где разливаемым материалом является магниевый сплав. В работах А. Ю. Гридина [18–19] применяются пользовательские макросы UPF в ANSYS для совместного решения тепловой и гидрогазодинамической задачи течения металла между валками-кристаллизаторами. Такая модель позволяет получать поля температур и скоростей в зоне кристаллизации-деформации, а также температурное поле бандажа валка. Однако использование данного подхода затруднено в связи с прекращением поддержки компанией ANSYS технологии UPF в новых версиях. Все вышеперечисленные модели не рассматривают систему валок-металл как единое целое, а позволяют получить лишь частное решение, которое не учитывает многих факторов процесса валковой разливки-прокатки, и вследствие этого не всегда является применимым на практике. На процесс валковой разливки-прокатки зачастую влияет множество факторов, которые тесно взаимосвязаны между собой и изменение одного из них может существенно повлиять на качество продукции и производительность агрегата [20]. Для комплексного рассмотрения системы металл-валок при валковой разливке-прокатке на кафедре ОМД была создана математическая модель этого процесса с использованием модуля ANSYS Flotran [21].

Целью данной работы является дальнейшее усовершенствование разработанной модели для повышения ее точности и получение зависимостей деформационных параметров от температуры и скорости разливки металла при валковой разливке-прокатке полос из высокопрочных алюминиевых сплавов.

Модуль ANSYS Flotran позволяет представить металл как жидкость с переменной вязкостью. Такое допущение при больших градиентах температуры и деформации, имеющих место в зоне кристаллизации-деформации, является достаточно обоснованным. Это позволяет учесть разницу в скоростях движения металла, что при решении совместной гидродинамической и тепловой задачи оказывает существенное влияние на распределение температуры и положение линий ликвидус и солидус. В области твердого металла значение условной вязкости на несколько порядков выше, чем в области расплава. Основные уравнения, которые используются модулем ANSYS Flotran для решения тепловых и гидродинамических задач приведены в работе [21]. Совместное решение системы металл-валок позволяет учитывать при моделировании большое количество технологических и конструктивных параметров процесса валковой разливки-прокатки. К первым относятся начальная температура разливаемого металла, скорость вращения валков, коэффициент теплоотдачи от металла к бандажу валка и от него к охлаждающей жидкости, расход охлаждающей жидкости. Ко второй группе относятся общая протяженность зоны кристаллизации-деформации, межвалковый зазор и диаметр валков-кристаллизаторов. Часть этих параметров поддается оперативному регулированию в процессе разливки-прокатки, а часть ограничивается возможностями

установки, заложенными при ее проектировании. Большое влияние также оказывает химический состав разливаемого сплава и его физические свойства. Отличительной особенностью модели является возможность задания значения коэффициента теплоотдачи от металла к валку как постоянным, так и переменным по координате и температуре, что позволяет использовать данные физического моделирования, проводившегося другими авторами [3, 4]. При разработке математической модели приняты следующие допущения: тепловой поток по длине бочки валка-кристаллизатора не учитывается и решается двухмерная задача, бандаж валков являются недеформируемыми, а течение металла принимается ламинарным и не учитывает возмущения потока, вызываемые питателем.

Для обеспечения возможности проверки адекватности модели и оценки точности результатов основные исходные данные для моделирования были приняты наиболее близкими к параметрам проведения экспериментальных исследований на установке валковой разливки-прокатки в Институте материаловедения Университета им. Лейбница г. Ганновер [22]. Данная установка состоит из двух бандажированных валков-кристаллизаторов с длиной бочки 200 мм и предназначена для получения полос толщиной 1...5 мм из алюминиевых сплавов, стали и биметаллов. В качестве разливаемого сплава для моделирования был выбран сплав системы Al-Mg-Si EN AW-6082, который относится к термически упрочняемым деформируемым сплавам средней прочности. Физические свойства разливаемого сплава приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства сплава EN AW-6082

Характеристика	Область жидкого металла	Область твердого металла
Плотность, кг/м ³	2300	2700
Теплоемкость, кДж/кгК	1180	871
Теплопроводность, Вт/мК	75...80	209...260
Условная вязкость, Па/с	0,012	100
Температура плавления, °С	640 (ликвидус)	610 (солидус)

Заданы следующие граничные условия: температура металла на входе в зону кристаллизации принимается постоянной, скорость течения металла на границе бандаж равна скорости вращения валков, охлаждение бандажей на воздухе задано свободной конвекцией. Приложенные граничные условия и общий вид геометрии модели представлены на рис. 1.

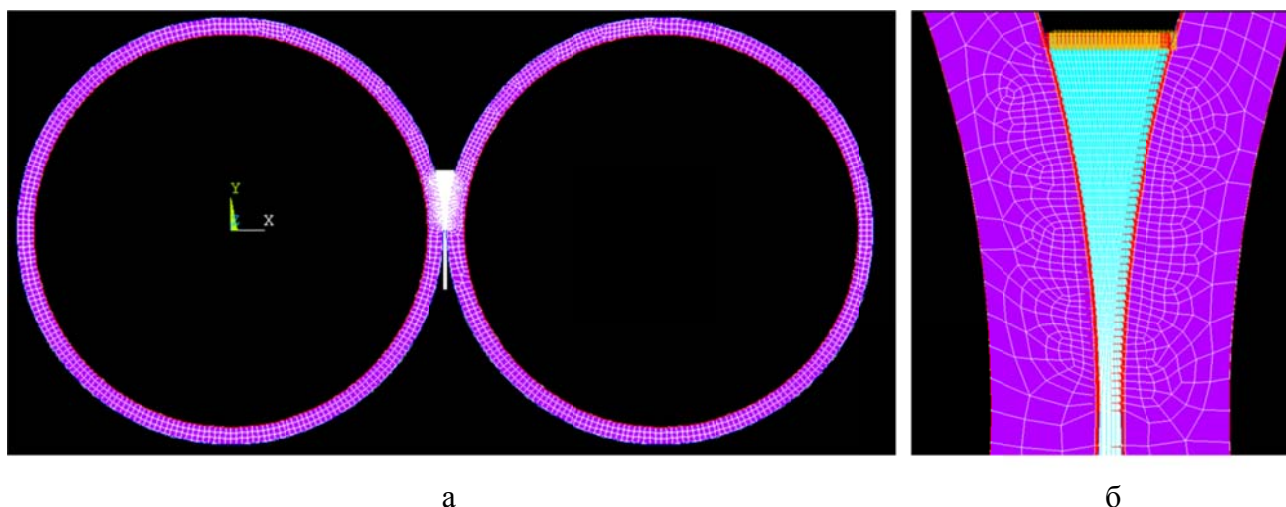


Рис. 1. Общий вид геометрии модели и приложенные граничные условия:
а – общий вид бандажей и комиль-зоны; б – конечно-элементная сетка и граничные условия в комиль-зоне

Коэффициент теплоотдачи от металла к бандажу принимался постоянным на уровне $12000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, а от внутренней поверхности бандажка к охлаждающей жидкости температурой $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $5000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, что соответствует охлаждению водой с принудительной конвекцией. Материал валка – сталь с теплопроводностью $50 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, теплоемкостью 462 Дж/кгК и плотностью 7800 кг/м^3 . Геометрические размеры кристаллизатора: диаметр валков 370 мм , толщина бандажей 15 мм . В качестве варьируемых параметров, характеризующих режимы валковой разливки-прокатки, были выбраны температура расплавленного металла, зафиксированная значениями $670 \text{ }^\circ\text{C}$, $690 \text{ }^\circ\text{C}$, $700 \text{ }^\circ\text{C}$, $720 \text{ }^\circ\text{C}$, и скорость вращения валков, которая менялась от $2,6$ до $3,6$ об/мин, что соответствует скорости разливки от 3 до $4,2$ м/мин.

В результате проведенных расчетов получены температурное поле в зоне кристаллизации-деформации и бандажках валков (рис. 2, а) и поле скоростей в разливаемом металле в абсолютных значениях и векторном виде (рис. 2, б).

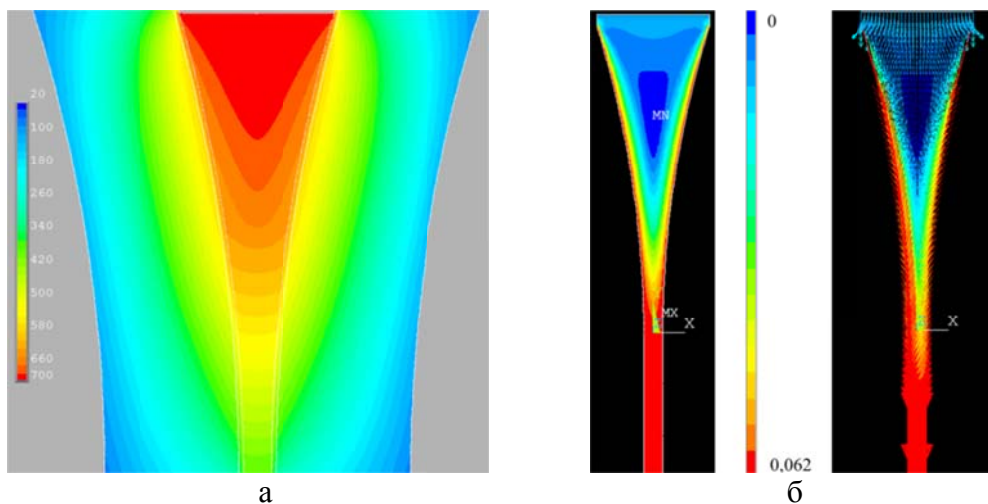


Рис. 2. Результаты моделирования:
а – температурное поле в металле, $^\circ\text{C}$; б – поле скоростей в металле, м/с

Как видно из рисунков, распределение скоростей в металле адекватно существующим представлениям о течении металла в кристаллизаторе. Начиная от момента образования слоя закристаллизовавшегося металла, рост корок носит параболический характер вплоть до момента их соединения, который обозначает начало зоны деформации. Далее вплоть до прохождения линии центров валков происходит пластическая деформация металла. Положение линий ликвидус и солидус помогает понять рис. 3, где приведено распределение условной вязкости в металле.

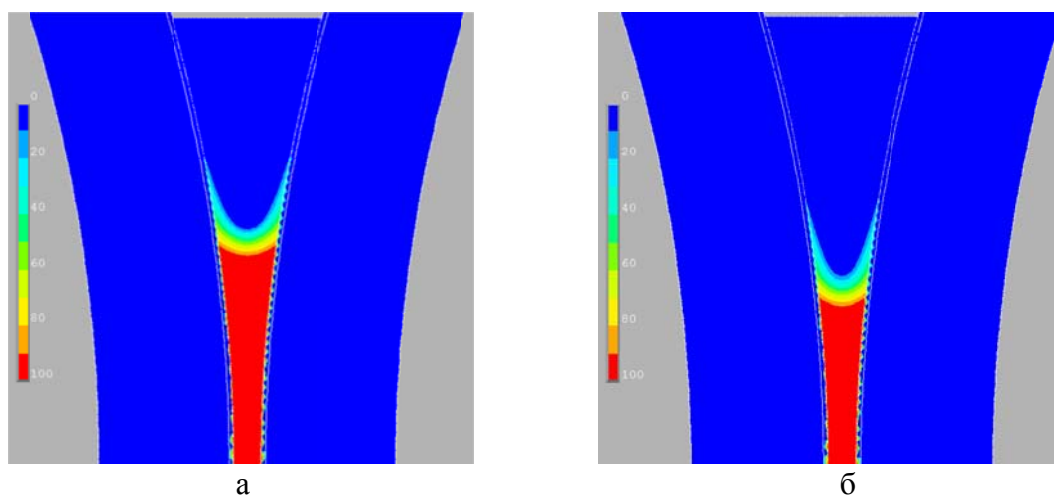


Рис. 3. Распределение вязкости в зоне кристаллизации-деформации:
а – для скорости разливки 3 м/мин ; б – для скорости разливки 4 м/мин

Здесь можно наблюдать зону жидкого металла, смешанную зону в промежутке между температурами ликвидус и солидус и область полностью закристаллизовавшегося металла, в которой происходит пластическая деформация. При увеличении скорости разливки или при повышении начальной температуры расплава линия солидус смещается ниже и соответственно протяженность зоны деформации при неизменной общей длине зоны кристаллизации-деформации уменьшается.

По данным серии расчетов получены зависимости протяженности зоны деформации от начальной температуры расплава и скорости разливки-прокатки для полосы толщиной 3 мм из сплава EN AW-6082 при общей протяженности зоны кристаллизации-деформации 50 мм. На рис. 4 приведены значения отношения длины зоны деформации к общей длине зоны кристаллизации-деформации и его зависимости от температурно-скоростных параметров процесса валковой разливки-прокатки.

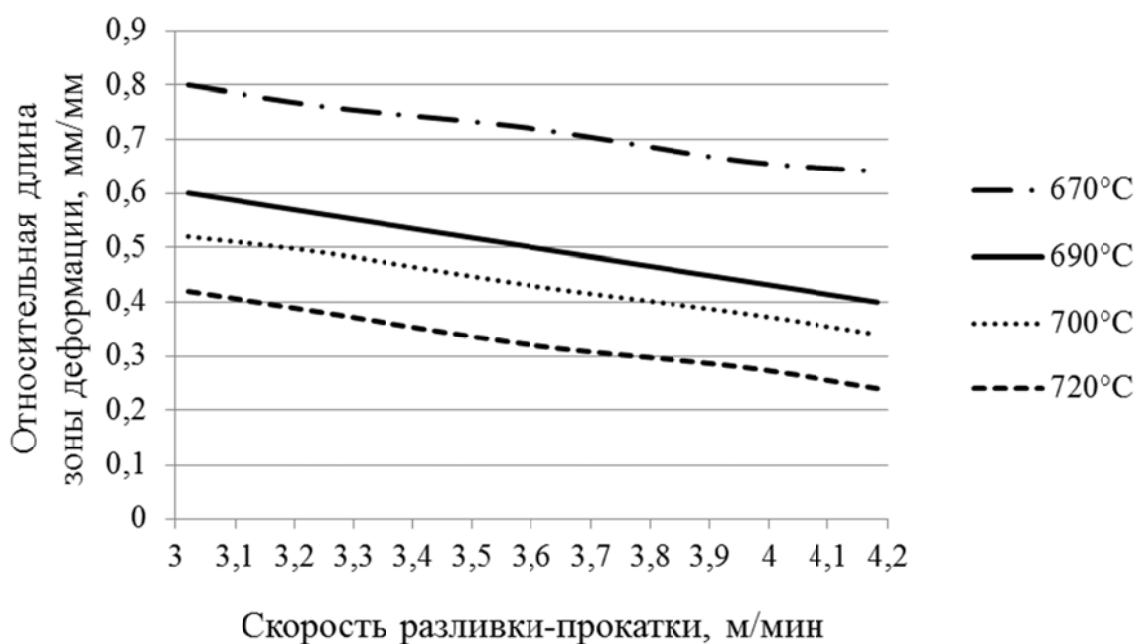


Рис. 4. Зависимость относительной длины зоны деформации от температурно-скоростных параметров процесса валковой разливки-прокатки

Полученные результаты показывают, что характер зависимостей протяженности зоны деформации при валковой разливке-прокатке от скорости разливки для разных температур носит подобный линейный характер. Это объясняется совместным влиянием на формирование полосы времени контакта металла с валками и температуры бандажа, которые синхронно увеличиваются при уменьшении скорости разливки. Повышение температуры разливки приводит к нелинейному уменьшению протяженности зоны деформации, причем, чем выше температура, тем меньше уменьшается протяженность зоны деформации. Это объясняется увеличением теплового потока от металла к бандажам при повышении его температуры в зоне кристаллизации и соответственно менее значительным ее удлинением. Для проверки точности математического моделирования было проведено сравнение данных моделирования со значениями длины зоны деформации, полученными экспериментально по методу останова валков с получением клиновых образцов, описанному А. Ю. Гридиным в работе [23]. Относительное отклонение величин длины зоны деформации находилось в пределах 1,6 %, что показывает высокую точность модели и соответствие данных моделирования экспериментальным.

Одним из основных факторов, влияющих на микроструктуру, прочностные свойства и качество получаемой полосы, является степень деформации, получаемая металлом в валковом кристаллизаторе. В связи с этим для оценки данного фактора были построены зависимости степени относительной деформации полосы по толщине от температурно-скоростных параметров разливки-прокатки, приведенные на рис. 5.

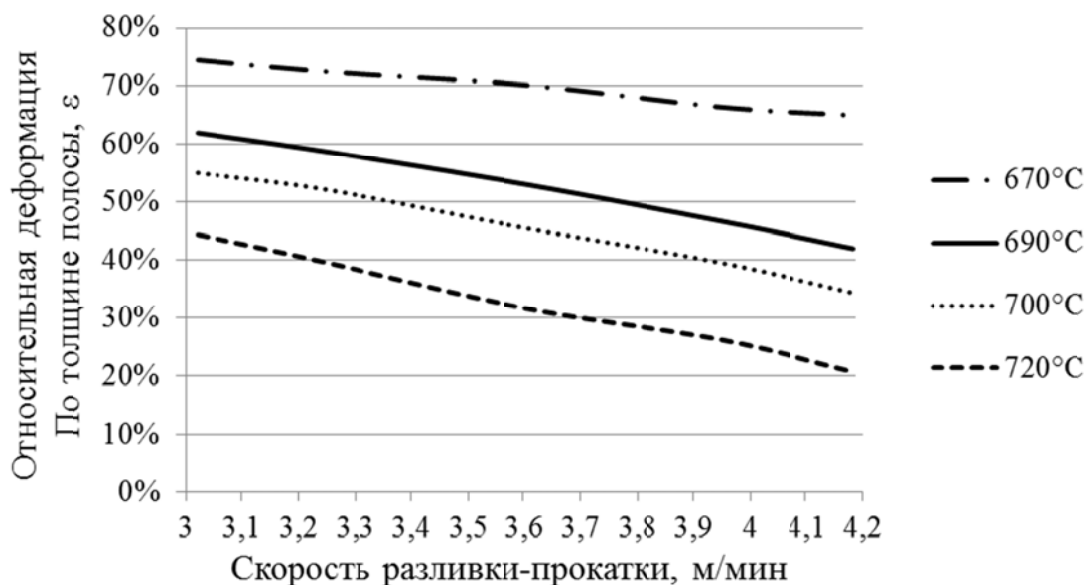


Рис. 5. Зависимость степени относительной деформации металла в валковом кристаллизаторе от температурно-скоростных параметров процесса разливки-прокатки

Как видно на рис. 5, кривые имеют схожих характер с кривыми, приведенными на рис. 4, за исключением того, что линейная зависимость от скорости сменилась криволинейной, степень искривления которой зависит от диаметра валков-кристаллизаторов. Известно, что для алюминиевых сплавов минимально необходимой степенью деформации в валковом кристаллизаторе является 20...30 % [24]. С другой стороны, большие степени деформации нежелательны ввиду ограниченного запаса прочности, обусловленного конструкцией бандажированных полых валков-кристаллизаторов, что особенно актуально при получении полос из высокопрочных сплавов. Как видно из графика на рис. 5, все исследованные режимы разливки-прокатки, кроме разливки на низких скоростях при температурах менее 690 °С удовлетворяют данным требованиям, однако дальнейшее увеличение скорости разливки делает необходимым снижение температуры. Нижнее значение температуры разливки ограничено возможностями питательной системы. Экспериментально определено, что для исключения возможности кристаллизации металла в промежуточном ковше, питателе или сопле, начальная температура разливки должна превышать температуру ликвидус не менее чем на 15...20 °С. Таким образом, путем подбора оптимальных параметров с учетом особенностей конкретного валкового кристаллизатора можно получать высококачественную продукцию с максимально возможной для данного оборудования производительностью.

ВЫВОДЫ

При помощи модуля ANSYS Flotran создана математическая модель процесса валковой разливки-прокатки, использующая жидкость переменной вязкости для описания течения металла в валковом кристаллизаторе. Модель адаптирована для расчета процесса получения полос из алюминиевых сплавов. По результатам математического моделирования на примере сплава EN AW-6082 получены зависимости протяженности зоны деформации и величины относительной деформации в валковом кристаллизаторе от температурно-скоростных параметров ведения процесса. При сравнении данных моделирования с экспериментальными относительная погрешность составила 1,6 %. Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы при определении оптимальных параметров ведения процесса с максимальной производительностью, а также при проектировании и введении в эксплуатацию новых либо модернизации существующих агрегатов валковой разливки-прокатки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение физических свойств разливаемых сплавов и учета большего количества технологических и конструктивных параметров процесса валковой разливки-прокатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patent US № 49053. *Improvement in the manufacture iron and steel / Bessemer H.* – July 25, 1865. – 4 p.
2. 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.
3. *Interfacial heat transfer coefficients and solidification of an aluminum alloy in a rotary continuous caster / Noé Cheung, Newton S. Santos, José M. V. Quaresma, George S. Dulikravich, Amauri Garcia.* // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2009. – Vol. 52, № 1. – P. 451–459.
4. *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.
5. *Laser-optical measurements and CFD simulation of a twin-roll strip caster water model with a roll width of 150 mm / Ohler C., Odenthal H.-J., Pfeifer H., Badowski M., Kopp R.* // *Proc. of 4th European Continuous Casting Conference.* – 2002. – S. 945–955.
6. Miyazava K. *A mathematical model of the splat cooling process using the twin-roll technique / K. Miyazava, A. Szekely* // *Metallurgical and Materials Transaction. A. Physical Metallurgy and Material Science.* – 1981. – № 12(6). – P. 1047–1057.
7. *Two-dimensional model for twin-roll continuous casting / Saitoh T. et al.* // *Metallurgical and Materials Transaction. B. Process Metallurgy and Materials Processing Science.* – 1989. – № 20(3). – P. 381–390.
8. Santos C. A. *Modeling of solidification in twin-roll strip casting / C. A. Santos, J. A. Spim Jr., A. Garcia* // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2000. – № 102. – P. 33–39.
9. Guthrie R. I. L. *Mathematical and physical modelling of steel flow and solidification in twin roll (horizontal belt thin strip casting machines) / R. I. L. Guthrie, R. P. Tavares* // *Inter Conf on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation. CSIRO.* – 1997. – P. 41–54.
10. Tavares R. P. *Computational fluid dynamics applied to twin-roll casting / Tavares R.P., Guthrie R.I.L.* // *Canadian Metallurgical Quarterly,* 1998. – № 37(3–4). – P. 241–250.
11. Chang J. G. *Numerical modelling of twin-roll casting by the coupled fluid flow and heat transfer model / J. G. Chang, C.-I. Weng* // *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* – 1997. – Vol. 40. – P. 493–509.
12. 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.
13. Lin H.-J. *Modelling of flow and heat transfer in metal feeding system used in twin roll casting / H.-J. Lin* // *Modelling and Simulation in Materials science and Engineering.* – 2004. – Vol. 12. – S. 255–272.
14. Sarioglu K. *Simulation of solidification process used in twin roll casting / K. Sarioglu, P. Thevoz* // *Light metals Warrendale Proceedings.* – Warrendale : TMS, 2003. – P. 747–752.
15. Cruchaga M. A. *Modelling of twin-roll strip casting processes / M. A. Cruchaga, D. J. Celentano, R. W. Lewis* // *Commun. Numer. Meth. Engng.* – 2003. – № 19. – P. 623–635.
16. Hu X.-D. *Simulation of Inelastic Deformation and Thermal Mechanical Stresses in Twin-roll Casting Process of Mg Alloy / X.-D. Hu, D.-Y. Ju.* // *Key engineering materials.* – 2007. – № 340-341. – P. 877–882.
17. *Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B.* // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2009. – Vol. 209. – S. 2321–2328.
18. Гридин О. Ю. Математичне моделювання процесу валкової розливки-прокатки за допомогою програми ANSYS / О. Ю. Гридин, В. М. Данченко // *Металургическая и горнорудная промышленность.* – 2008. – № 5. – С. 90–94.
19. 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.*
20. *An Experimental Investigation of the Effect of Strip Thickness, Metallostatic Head and Tip Setback on the Productivity of a Twin-Roll Caster / Yun, et al., CastMetals.* – 1991. – Vol. IV. – No. 2.
21. Столбченко М. Ю. Применение модуля ANSYS Flotran для моделирования процесса валковой разливки-прокатки полос / М. Ю. Столбченко, А. Ю. Гридин // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – С. 41–44.*
22. Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, В. Н. Данченко, Фр.-В. Бах // *Металургическая и горнорудная промышленность.* – 2010. – № 5. – С. 46–51.
23. Гридин А. Ю. Экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке / А. Ю. Гридин // *Вісник НТУ «ХПІ» : зб. наук. пр. Тематич. вип. «Нові рішення в сучасних технологіях».* – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 42. – С. 48–58.
24. Ferry M. *Direct strip casting of metals and alloys / M. Ferry.* – Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2006. – 292 p.

Столбченко М. Ю. – аспирант НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: stolbchenkom@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.03.2013 г.