

С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Ю. Столбченко, М. Шапер\*

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

\*Институт материаловедения, Ганноверский университет им. Лейбница (Германия)

## Определение коэффициента теплоотдачи в системе металл-валок при валковой разливке-прокатке алюминиевых сплавов

Приведены экспериментальные данные по тепловым режимам работы валков и кристаллизации тонких полос из алюминиевого сплава EN AW-6082 при валковой разливке-прокатке. Проведено сравнительное математическое моделирование процесса с помощью конечно-элементной модели в среде ANSYS Flotran. Путем инверсного анализа определены коэффициенты теплоотдачи на границе металл-валок при валковой разливке-прокатке полос различной толщины.

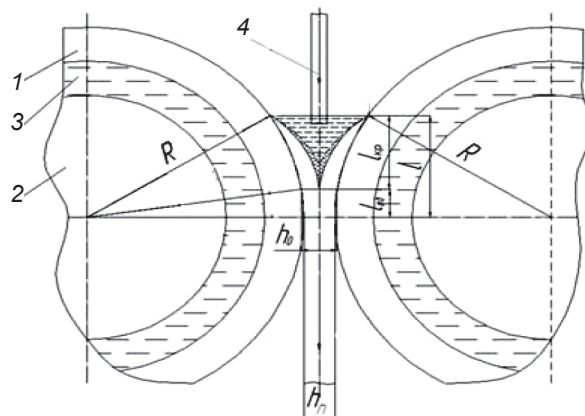
**Ключевые слова:** валковая разливка-прокатка, экспериментальная установка, термографические исследования, конечно-элементный анализ, коэффициент теплоотдачи

Валковая разливка-прокатка берет свое начало в середине XIX в. с запатентованного предложения Генри Бессемера получать в двухвалковом кристаллизаторе тонкую полосу непосредственно из расплава. Однако, в первое время эта технология не вызвала большого интереса и получила толчок к развитию лишь во второй половине XX в. Это было вызвано ростом в современном мире требований к экологичности и экономичности металлургических процессов, а валковая разливка-прокатка показала себя, прежде всего, как один из самых экономичных способов производства тонких полос из легких металлов и сплавов, а также стали. Для определения оптимальных значений показателей технологического процесса валковой разливки-прокатки и исследования поведения расплава после попадания в межвалковое пространство широко используют различные лабораторные агрегаты. Одной из таких установок является машина валковой разливки-прокатки, разработанная совместными усилиями кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины и Институтом материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница (Германия) [1].

В связи с необходимостью прогнозирования сложных процессов, протекающих при валковой разливке-прокатке металла, от гидродинамических эффектов, связанных с заполнением межвалкового пространства расплавом, до условий формирования микроструктуры полосы на выходе из двухвалкового кристаллизатора, наряду с экспериментальными исследованиями широкое распространение получили различные математические модели валковой разливки-прокатки. Для повышения точности расчетов проводят работы в направлении усовершенствования самих моделей, а также уточнения теплофизических характеристик процесса. Одной из таких характеристик, которая существенно влияет на результаты математического моделирования процесса валковой разливки-прокатки, но недоста-

точно освещена в научно-технической литературе, является коэффициент теплоотдачи на контакте разливаемого металла и валков-кристаллизаторов. На рис. 1 приведена схема процесса валковой разливки-прокатки: жидкий металл через сопло 4 попадает в пространство между бандажированными водоохлаждаемыми валками 1, где сначала кристаллизуется, а затем подвергается горячей деформации по аналогии с процессом прокатки. Очевидно, схема с одновременным наличием в рабочей зоне жидкого материала и его твердой фазы, которая пластически деформируется, затрудняет экспериментальный сбор данных по температурному и напряженно-деформированному состоянию металла. Именно по этой причине широкое применение при исследовании процесса валковой разливки-прокатки получили методы математического моделирования.

Анализ научно-технической литературы, посвященной моделированию процесса валковой разливки-прокатки, демонстрирует преимущества подхода с



**Рис. 1.** Схема процесса валковой разливки-прокатки: 1 – бандаж вала; 2 – ось вала; 3 – охлаждающая жидкость; 4 – сопло для подачи расплава; R – радиус вала; l – высота ванны металла;  $l_{кр}$  – высота зоны кристаллизации;  $l_{од}$  – высота зоны деформации;  $h_0$  – толщина полосы в начале зоны деформации;  $h_n$  – толщина полосы на выходе из валков

использованием граничных условий третьего рода, при котором теплообмен на границе металл-валок характеризуется постоянным значением коэффициента теплоотдачи. Так, например, в работе K. Sarioglu и P. Thevoz [2] рассмотрено влияние величины коэффициента теплоотдачи на процесс кристаллизации металла между валками. Авторы этой работы осуществили численный анализ процесса валковой разливки-прокатки с использованием коэффициентов теплоотдачи, равных 5000 и 7500 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Однако результаты моделирования не сравнили с другими литературными или собственными экспериментальными данными, что не дает возможности проверить адекватность выбранных параметров теплообмена и расчетных данных. В другой работе (С. А. Santos, J. А. Spim и А. Garcia [3]), посвященной моделированию кристаллизации металла в процессе валковой разливки-прокатки, использован коэффициент теплоотдачи, равный 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Расчеты проводили для стали, что является основным ограничением использования этих результатов. Адекватность модели авторы проверяли, сравнивая результаты серии пробных моделирований валковой разливки-прокатки сплава олова со свинцом с известными литературными данными, принимая коэффициенты теплоотдачи равными 2000, 3000, 4000 и 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Еще в одной работе (статья М. А. Cruchaga, D. J. Celentano и R. W. Lewis [4]) проанализировано влияние коэффициента теплоотдачи на формирование стальной полосы в процессе валковой разливки-прокатки. Для моделирования процесса выбрали три разных значения коэффициента теплоотдачи: 4000, 5000 и 6000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). А работа X.-D. Hu и D.-Yu. Ju [5] (Сайтамский институт технологий) посвящена моделированию неупругих деформаций и тепловых механических усилий при валковой разливке магниевого сплава AZ31. Для своей модели китайские ученые выбрали величину коэффициента теплоотдачи, равную 10000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Специалисты J. Zeng и R. Koitzsch (г. Аахен, ФРГ) из Высшей технической школы вместе с соавторами для моделирования валковой разливки-прокатки полос толщиной 3 и 4 мм из аналогичного магниевого сплава впервые предложили использовать различные коэффициенты теплоотдачи [6]. Так, для полосы толщиной 3 мм выбрали значение 4000 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а для 4 мм – 3300. Результаты этой работы сравнили с собственными экспериментальными данными, которые доказали достаточно высокую точность численного решения.

Еще одной интересной работой, с точки зрения описания граничных условий на границе металл-валок, является работа сотрудников Института исследования промышленных наук и технологий (Республика Корея) [7]. В ней авторы проводили исследование по определению влияния различных параметров процесса, таких как скорость прокатки, диаметр бандажей, их материал и конструкция и другие на тепловое состояние работы валков-кристаллизаторов с использованием граничных условий второго рода. Здесь же приведено значение теплового потока, собственно определенное при разливке стали на пилотной промышленной установке фирмы

POSCO, равное 7,55 мВт/м<sup>2</sup>. В работе А. Saxena и Y. Sahai [8], посвященной моделированию течения и теплового состояния жидкого металла при валковой разливке прокатке алюминиевых сплавов Al-4,5%Cu и Al-1,1%Mg, коэффициент теплоотдачи изменялся в диапазоне от 1000 до 15000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Было проиллюстрировано существенное влияние на результаты численного решения данной характеристики, но выводы по адекватной ее величине в приведенной публикации отсутствуют.

L. Strezov, J. Herbertson [9], а также L. Strezov, J. Herbertson при участии G. R. Belton [10] проводили исследования по определению зависимости характеристик теплообмена от профиля микрорельефа поверхности валков-кристаллизаторов. На рис. 2 приведены изменения теплового потока от высоты профиля микрорельефа медного бандаж в ходе кристаллизации на нем низкоуглеродистой стали. Форма кривых демонстрирует преимущество более гладкого микрорельефа на начальной стадии кристаллизации, что выражается в увеличении значений теплового потока в течение начальных 15 мс. После формирования на поверхности субстрата сплошного слоя обрабатываемого металла, условия теплообмена на контакте металл-кристаллизатор выравниваются.

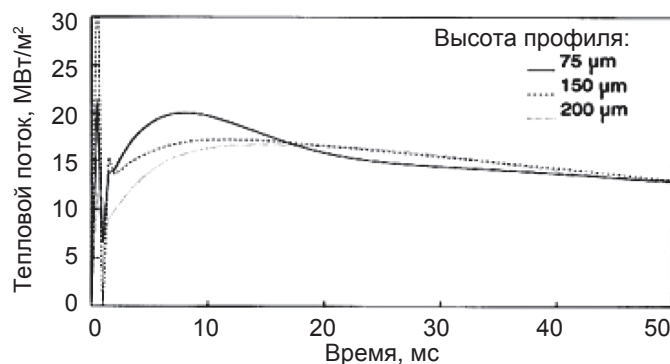


Рис. 2. Изменение величины теплового потока от высоты профиля микрорельефа поверхности бандажей

Всесторонний анализ приведенных литературных данных дает возможность утверждать, что описание граничных условий при математическом моделировании валковой разливки-прокатки в большинстве случаев базируется на необоснованных значениях коэффициента теплоотдачи на контакте металл-валок. В частности, при теоретических исследованиях формирования в двухвалковых кристаллизаторах полос из алюминиевых сплавов диапазон коэффициентов теплоотдачи варьируется от 1000 до 15000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Между тем, выбор величины данной характеристики оказывает существенное влияние на точность результатов численного анализа. Таким образом, цель данной работы – исследование экспериментальным и теоретическим путем теплового состояния системы металл-валок при валковой разливке-прокатке высокопрочного алюминиевого сплава системы Al-Mg-Si и определение с помощью инверсного анализа на основе численного моделирования обоснованных значений коэффициентов теплоотдачи при формировании полос различной толщины.

Для получения экспериментальных данных по тепловому состоянию системы металл-валок при валковой разливке-прокатке провели эксперименты по получению полос из сплава EN AW-6082 на лабораторном двухвалковом кристаллизаторе. Основными конструктивными параметрами экспериментальной установки являются: внешний диаметр стальных бандажированных валков – 370 мм; толщина стенки бандажей – 15 мм; длина рабочего участка валка – 200 мм; максимальное расстояние между валками – 10 мм; максимальный объем подачи охлаждающей жидкости – 112 л/мин.

Подробное описание лабораторной машины валковой разливки-прокатки выполнено в работе [1]. Фотография подготовленной к проведению эксперимента установки приведена на рис. 3.

В ходе проведения экспериментов расплав металла подавали в межвалковое пространство через литейную систему, которая состоит из керамического двухкамерного промковша с шлакоулавливателем и плоского сопла. Так как алюминиевый сплав EN AW-6082 имеет относительно низкую склонность к налипанию, покрытие валков смазочными материалами перед и во время разливки не осуществляли. Измерение температуры поверхности бандажа выполняли на правом валке-кристаллизаторе с помощью термографической камеры FLIR-SC7600 (рис. 3). Частота фиксации данных составляла 50 Гц. Информация об основных исходных технологических и измеренных температурных параметрах при проведении экспериментов приведена в таблице.

На рис. 4, а показан вид валка через термографическую камеру.

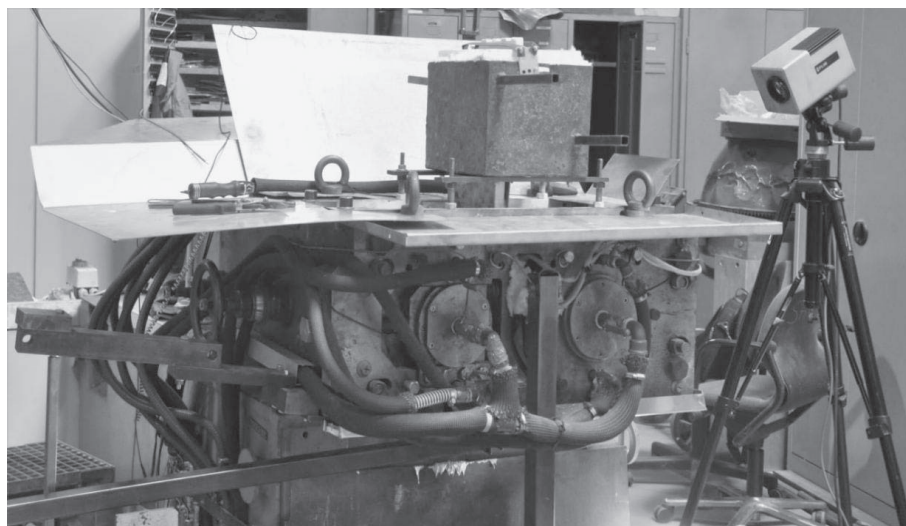


Рис. 3. Лабораторная машина валковой разливки-прокатки с установленной термографической камерой перед проведением эксперимента

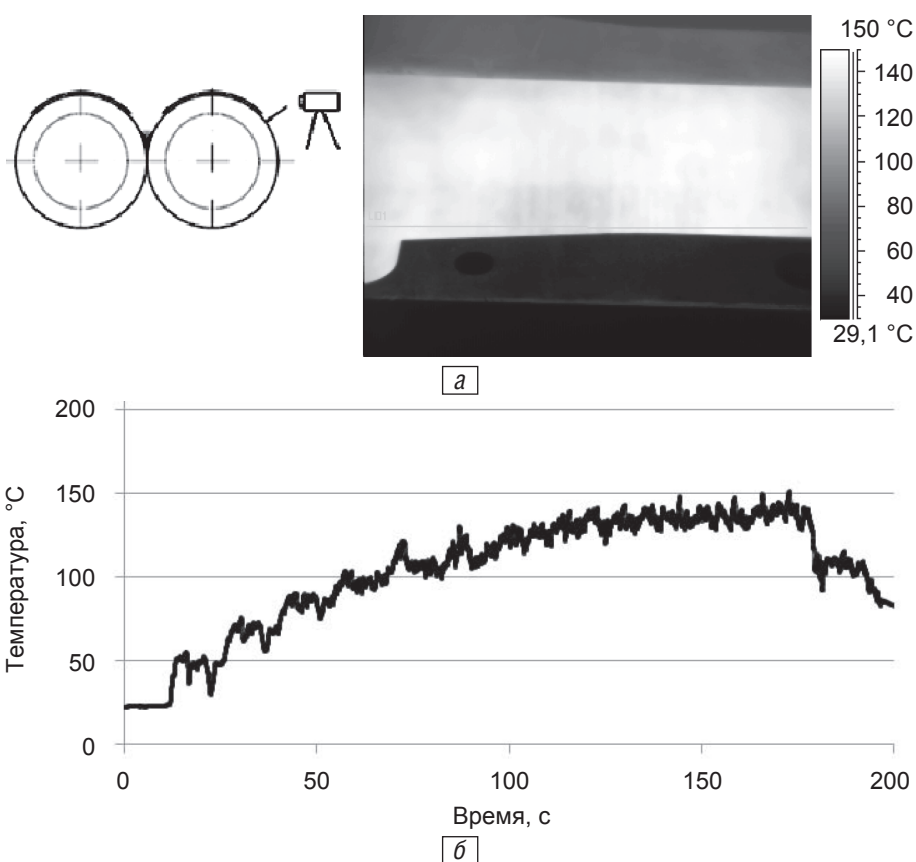


Рис. 4. Вид поверхности валка через термографическую камеру (а) и изменение температуры поверхности валка во время валковой разливки-прокатки на примере полосы толщиной 2 мм (б)

#### Основные технологические и температурные параметры экспериментов по валковой разливке-прокатке

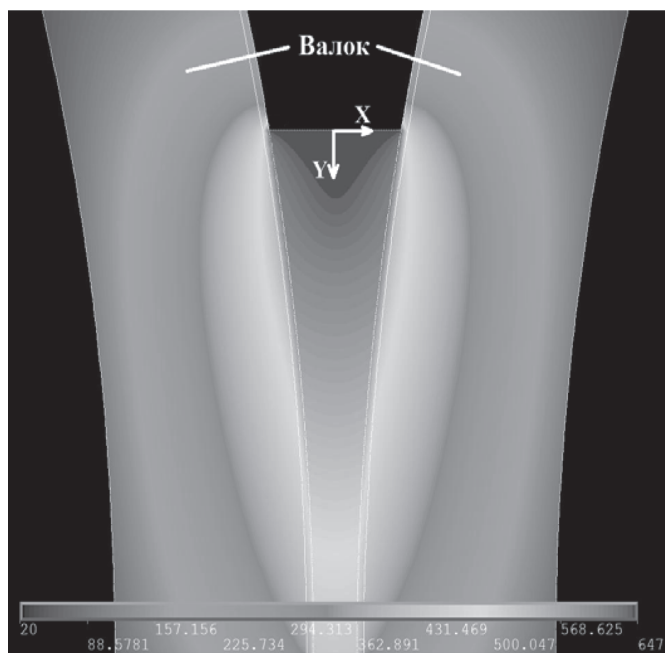
Параметры	Толщина полос, мм		
	2	3	4
Общая высота зоны кристаллизации-деформации металла, мм	30	35	50
Скорость валковой разливки-прокатки, м/мин	5,21	4,07	4,18
Температура начала разливки-прокатки, °C	720	690	690
Максимальная температура расплава в зоне кристаллизации, °C	645	647	642
Объем подачи охлаждающей жидкости, л/мин	112	112	112
Температура охлаждающей жидкости: на входе в валки-кристаллизаторы, °C на выходе из валков-кристаллизаторов, °C	14,7	16,1	16,5
	21,5	24,0	24,5

Фиксация и расчет средней температуры по длине бочки валка осуществляли вдоль линии LO1. График изменения температуры банджа в области наблюдения во время разливки-прокатки приведен на рис. 4, б. При прокатке полос толщиной 3 и 4 мм картина изменения температуры банджа валков схожа с приведенной зависимостью. В начале температура банджа повышалась ступенчато, этот процесс продолжался до момента выхода кристаллизаторов на рабочую температуру, а это требовало уже от 5 до 7 полных оборотов валков.

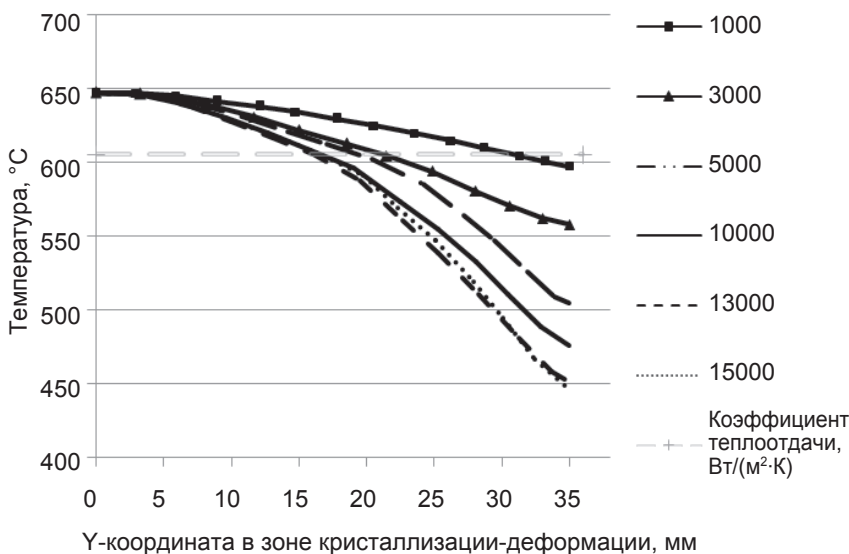
Таким образом, в результате термографических исследований установили, что средняя температура банджа валка в месте измерений, рассчитанная по линии LO1 (см. рис. 4, а), после достижения стационарных тепловых условий его работы составляет: при разливке-прокатке полосы толщиной 2 мм –

135 °С; 3 мм – 125 °С; 4 мм – 117 °С. Замер изменения температуры по высоте зоны кристаллизации-деформации выполняли путем погружения термоэлемента диаметром 0,5 мм и длиной 1500 мм в расплав в межвалковое пространство после выхода банджа на рабочую температуру. В результате погружения термоэлемент увлекался закристаллизовавшимся металлом и выходил из экспериментальной установки валковой разливки-прокатки вместе с полосой в ее срединной части. Полученные с помощью указанного экспериментального способа данные приведены ниже в сравнении с результатами численного анализа (рис. 7). Параллельно с экспериментами выполнили математическое моделирование валковой разливки-прокатки с помощью разработанной ранее на кафедре обработки металлов давлением HMetAY модели в конечно-элементной среде Ansys Flotran [11]. Принятые для теоретического анализа исходные технологические и конструктивные параметры процесса соответствуют приведенным выше условиям проведения экспериментов. На рис. 5 проиллюстрирован пример одного из результатов моделирования формирования алюминиевой полосы толщиной 3 мм. Моделирование проводили для следующих условий: скорость валковой разливки-прокатки – 4,07 м/мин; высота зоны кристаллизации-деформации – 35 мм; максимальная температура расплава в зоне кристаллизации-деформации – 647 °С; коэффициент теплоотдачи – 15000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для серийного моделирования использовали следующие значения коэффициента теплоотдачи: 1000, 3000, 5000, 10000, 13000, 15000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Полученные графические результаты в виде зависимостей изменения температуры вдоль срединной линии зоны кристаллизации-деформации от коэффициента теплоотдачи приведены на рис. 6, из которых видно, что варьирование коэффициента теплоотдачи в области меньших его значений, при принятых условиях, значительно влияет на скорость кристаллизации охлаждения металла. Напротив, его повышение от 13000 до 15000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) оказывает лишь незначительное влияние на температуру выхода полосы валков.

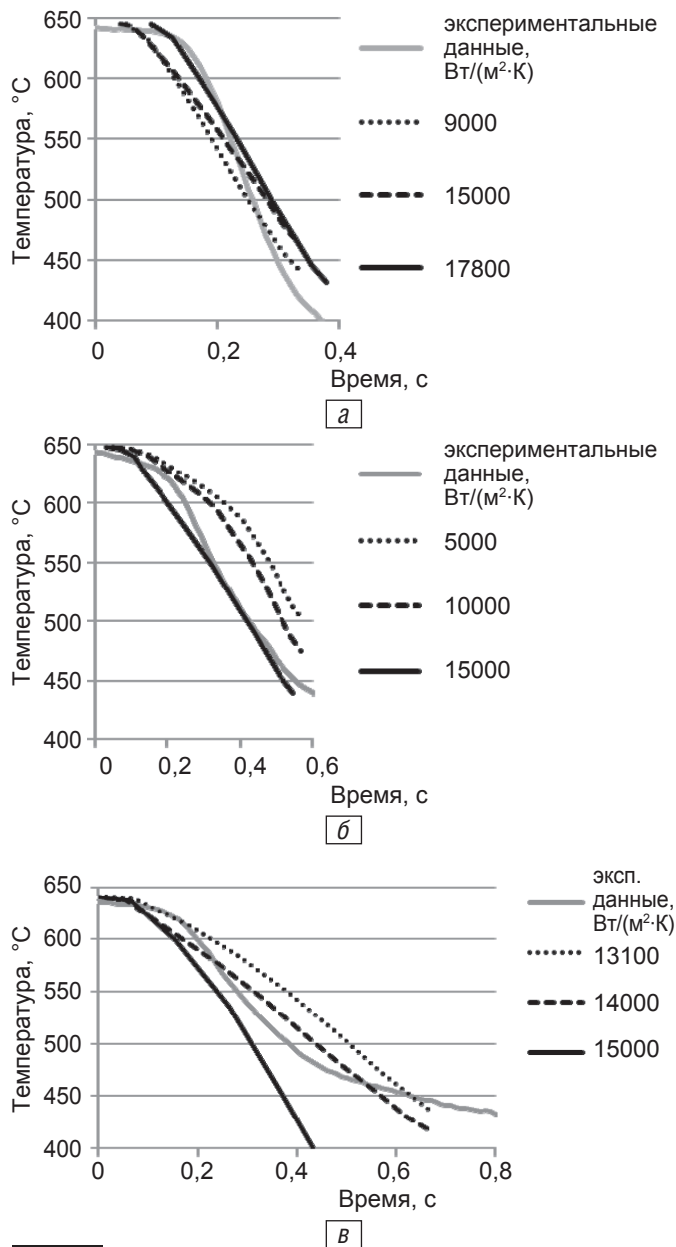


**Рис. 5.** Распределение температуры (°С) в зоне кристаллизации-деформации и валках-кристаллизаторах, полученное в результате моделирования



**Рис. 6.** Характер изменения температуры металла вдоль срединной линии зоны кристаллизации-деформации в зависимости от коэффициента теплоотдачи при валковой разливке-прокатке полос толщиной 3 мм из сплава EN AW-6082

Следующий численный анализ провели с целью определения значений коэффициентов теплоотдачи, которые лучше всего отвечают экспериментальным данным по изменению температуры в зоне кристаллизации-деформации при валковой разливке-прокатке полос различной толщины из сплава EN AW-6082. Входные данные для моделирования были аналогичны экспериментальным условиям, приведенным выше в таблице. Сравнение некоторых результатов моделирования и температурных кривых, полученных экспериментальным путем, приведены на рис. 7.



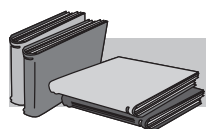
**Рис. 7.** Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных для полос толщиной 2 мм (а); 3 мм (б); 4 мм (в) из алюминиевого сплава EN AW-6082

Сопоставление графиков проводили по двум критериям: температуре полосы на выходе из валков-кристаллизаторов и скорости ее изменения. Имеющееся в некоторых случаях расхождение экс-

периментальных и теоретических кривых вызвано, скорее всего, переменным (в реальности), а не постоянным значением коэффициента теплоотдачи вдоль зоны контакта материала и кристаллизатора, что иллюстрирует, например, рис. 2. Анализ полученных данных показывает, что лучшие совпадения результатов экспериментов и математического моделирования обеспечивают коэффициенты теплоотдачи для полосы толщиной 2 мм – 17800 Вт/(м²·К), для 3 мм – 15000 и для 4 мм – 13100. Относительная погрешность прогнозирования температуры выхода полосы, при сравнении экспериментальных и расчетных значений для приведенных выше уточненных коэффициентов теплоотдачи, составляет: для полосы толщиной 2 мм – 5,3 %; 3 мм – 1,4 %; 4 мм – 0,7 %. Полученные уточненные величины коэффициентов теплоотдачи соответствуют верхнему диапазону данных из литературных источников и в некоторых случаях превышают их. Это можно объяснить тем, что в ходе выполнения экспериментов не совершили распространенное на практике покрытие поверхности бандажей валков графитовой эмульсией (на поверхности бандажей валков нанесен микрорельеф), а их конструкция предполагает контакт бандажей с охлаждающей жидкостью по всей его внутренней поверхности. Совокупность указанных факторов приводит к интенсификации теплообмена между металлом и валками-кристаллизаторами в ходе валковой разливки-прокатки.

В результате проведенных экспериментов по описанию теплового состояния системы металл-валок при валковой разливке-прокатке в сочетании с инверсным анализом с использованием конечно-элементного моделирования определили коэффициенты теплоотдачи при производстве тонких полос из алюминиевого сплава EN AW-6082 в установке с двухвалковыми кристаллизаторами.

Уточненные значения коэффициентов теплоотдачи составили: для полос толщиной 2 мм – 17800 Вт/(м²·К); 3 мм – 15000; 4 мм – 13100. Уточненная информация по описанию граничных условий при моделировании валковой разливки-прокатки приведет к более качественному прогнозированию условий формирования полос при валковой разливке-прокатке и более полному пониманию процессов, протекающих в межвалковом пространстве.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, В. Н. Данченко, Фр.-В. Бах // *Металлургическая и горнорудная пром.-сть.* – 2010. – № 5. – С. 46-51.
2. *Saraioglu K., Thevoz P.* Simulation of solidification process used in twin roll casting // *Light metals. Proceedings.* – Warrendale: TMS, 2003. – P. 747-751.
3. *Santos C. A., Spim Jr. J. A., Garcia A.* Modeling of solidification in twin-roll strip casting // *Journal of materials processing technology* – 2000. – № 102. – P. 33-39.
4. *Cruchaga M. A., Celentano D. J., Lewis R. W.* Modelling of twin-roll strip casting processes // *Communications in numerical methods in engineering.* – 2003. – № 19. – P. 623-635.
5. *Hu X.-D., Ju D.-Y.* Simulation of Inelastic Deformation and Thermal Mechanical Stresses in Twin-roll Casting Process of Mg Alloy // *Key Engineering Materials.* – 2007. – № 340-341. – P. 877-882.

6. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip / J. Zeng, R. Koitzsch, H. Pfeifer, B. Friedrich // Journal of materials processing technology. – 2009. – № 209. – P. 2321-2328.
7. Park C. M., Kim W. S., Park G. J. Thermal analysis of the roll in the strip casting process // Mechanics Research Communications. – 2003 – № 30. – P. 297-310.
8. Saxena A., Sahai Y. Modeling of fluid flow and heat transfer in twin-roll casting of aluminum alloys // Materials transactions. – 2002. – № 2. – P. 206-213.
9. Strezov L., Herbertson J. Experiments studies of interfacial heat transfer and initial solidification pertinent to strip casting // ISIJ International. – 1998. – № 9. – P. 595-966.
10. Strezov L., Herbertson J., Belton G. R. Mechanisms of Initial Melt / Substrate heat transfer pertinent to strip casting // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2000. – № 31 B (5). – P. 1023-1030.
11. Столбченко М. Ю., Гридин А. Ю. Применение модуля Ansys Flotran для моделирования процесса валковой разливки-прокатки полос // Обработка материалов давлением. – 2011. – № 3 (28). – С. 41-44.

### Анотація

*Бондаренко С. В., Гридин О. Ю., Столбченко М. Ю., Шапер М.*  
**Визначення коефіцієнта тепловіддачі у системі метал-валок при валковій розливці-прокатці алюмінієвих сплавів**

*Наведено експериментальні дані щодо теплових режимів роботи валків та кристалізації тонких штаб із алюмінієвого сплаву EN AW-6082 при валковій розливці-прокатці. Проведено порівняльне математичне моделювання процесу за допомогою кінцево-елементної моделі в середовищі ANSYS Flotran. Шляхом інверсного аналізу визначено коефіцієнти тепловіддачі на межі метал-валок при валковій розливці-прокатці штаб різної товщини.*

### Ключові слова

*валкова розливка-прокатка, експериментальна установка, термографічні дослідження, кінцево-елементний аналіз, коефіцієнт тепловіддачі*

### Summary

*Bondarenko S. V., Grydin O. Yu., Stolbchenko M. Yu., Schaper M.*  
**Determination of the heat transfer coefficient in the metal-roll system at twin-roll casting of aluminum alloys**

*In the paper experimental data about the thermal states of the rolls and the solidification of thin strips of the aluminum alloy EN AW-6082 at twin-roll casting are presented. A comparative mathematical simulation using the finite element model in the ANSYS Flotran program is conducted. By means of inverse analysis the heat transfer coefficientson the metal-roll interfaceat twin-roll casting of strips different thicknesses are determined.*

### Keywords

*twin-roll casting, experimental twin-roll casting machine, thermographic investigations, finite-element analysis, heat transfer coefficient*

Поступила 03.06.13

### ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В редакцию журнала **«Металл и литье Украины»** принимаются рукописи на русском языке и при наличии номера УДК.

Статьи обязательно должны содержать на **3-х языках** (русском, украинском и английском) фамилии, имена, отчества авторов, название статьи, аннотации, ключевые слова.