

УДК 621.771.23:669.71

Хвист В. А.
Столбченко М. Ю.
Гридин А. Ю.
Самсоненко А. А.
Головко А. Н.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВО-СТАЛЬНЫХ ПОЛОС В ДВУХВАЛКОВОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Энерго- и ресурсоэффективность процесса валковой разливки прокатки обуславливает его развитие и все более широкое применение при производстве тонких полос из различных металлов и сплавов. Известно большое количество работ, посвященных получению этим способом полос из различных мономатериалов. На первом этапе развития валковой разливки-прокаткой получали полосы только из алюминия и сплавов на его основе, затем появились технологии получения полос из сталей различных марок, магниевых сплавов и других металлов. Японскими учеными из Института технологии г. Осака впервые с использованием валковой разливки-прокатки были получены биметаллические изделия из различных алюминиевых сплавов. Получение подобных двух- и трехслойных плоских композитов описано в работах [1–3], причем речь идет о биметаллических полосах из сплавов 3xxx-, 4xxx-, 5xxx-, 6xxx- и 8xxx-серий. На сегодняшний день в технической литературе отсутствуют сведения о производстве валковой разливкой-прокаткой биметаллических полос из таких разнородных материалов, как алюминий и сталь, хотя распространение данной энергосберегающей технологии на новые группы материалов представляется перспективной и актуальной задачей.

Проведение физических экспериментов по определению влияния технологических параметров валковой разливки-прокатки на качество получаемых биметаллических полос и, в частности, диффузионного соединения на контакте алюминий-сталь, является трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому было принято решение использовать математическое моделирование на базе метода конечных элементов. Анализ литературных источников показал его широкую применимость для изучения процесса валковой разливки-прокатки мономатериалов [4, 5]. На основе проведенного анализа выбрана программная среда ANSYS. За основу разрабатываемой была взята модель, описанная в работе [6].

Целью данной работы является экспериментальное определение изменения температуры металла в зоне кристаллизации-деформации, а также теоретический анализ влияния температуры подачи алюминиевого расплава в межвалковое пространство и скорости валковой разливки-прокатки на степень деформации материала в двухвалковом кристаллизаторе при получении биметаллических полос алюминий-сталь.

Несмотря на имеющийся базовый вариант математической модели, необходимо было провести ряд корректировок и дополнений. После настройки модели корректность её работы проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных о температуре металла в зоне кристаллизации-деформации. Для проведения экспериментальных замеров была использована машина валковой разливки-прокатки, разработанная и сконструированная совместными усилиями сотрудников кафедры обработки металлов давлением Национальной металлургической академии Украины и Института материаловедения Ганноверского университета им. Лейбница (Германия) [7].

Проверку работы модели проводили по двум температурным кривым, полученным с различных участков контакта. Первая кривая представляет температуру на контакте стальной полосы и алюминия, вторая – на контакте стальной полосы с водоохлаждаемым бандажом.

Для осуществления замеров температуры перед началом процесса разливки-прокатки термоэлементы были закреплены на стальной полосе (см. рис. 1) на расстоянии 4 м от начала

зоны кристаллизации-деформации. Это обусловлено тем, что в начальный момент разливки-прокатки процесс не является установившимся, т. е. происходит постепенный выход валков на рабочую температуру и стабилизация температурных полей.

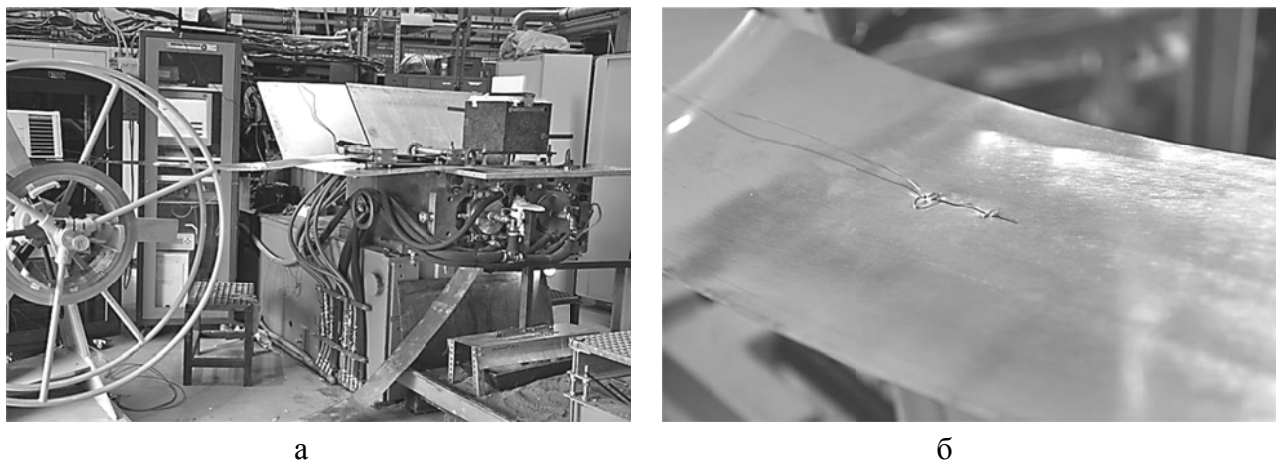


Рис. 1. Фотография машины валковой разливки-прокатки, подготовленной к процессу получения биметаллической полосы (а), и термоэлемента, зафиксированного на стальной полосе (б)

Однако, вследствие инертности работы термоэлемента и малого количества времени, в течение которого он находится в контакте с жидким алюминием, невозможно точно определить температуру алюминия на входе в зону кристаллизации-деформации. Для этого был использован дополнительный термоэлемент, который погружался в ванну жидкого алюминия на поверхности зоны кристаллизации-деформации непосредственно в момент прохождения её термоэлементом, зафиксированным на стальной полосе. Такая схема осуществления измерения позволяет термоэлементу более длительное время находиться в контакте с жидким алюминием и, как следствие, получать достоверные данные о его температуре на входе в зону кристаллизации-деформации. Получение данных об изменении температуры по длине зоны кристаллизации-деформации на контакте стальной полосы и водоохлаждаемого вала производилось аналогичным образом, с той разницей, что термоэлемент крепился с нижней (внешней) стороне стальной полосы. Фиксирование значений температуры осуществлялось с частотой 100 Гц при помощи компьютера.

На основании полученных экспериментальных данных построены графики изменения температур на контакте стальной полосы с алюминием и с водоохлаждаемым валком (см. рис. 2). Впоследствии, после проведения математического моделирования процесса при идентичных технологических параметрах, было проведено сравнение расчетные и экспериментальные данные. Результат сравнения показал, что ошибка теоретического определения изменения температуры в зоне кристаллизации-деформации на соответствующих контактных поверхностях не превысила 10 %. На основании этого работа модели была признана корректной. В дальнейшем модель использовалась для осуществления расчетов с целью определения независимого влияния технологических параметров процесса получения биметаллической полосы непосредственно из расплава на условия формирования плоского двухслойного композита.

Исходные данные, которые в ходе математического моделирования не подвергались варьированию, представлены в табл. 1. В качестве переменных параметров процесса были приняты скорость валковой разливки-прокатки и температура алюминиевого расплава на входе в зону кристаллизации-деформации. Скорость вращения валков варьировалась в пределах от 2 до 10 оборотов валков в минуту, что соответствует скорости разливки от 2,4 до 11,5 м/мин. Температура алюминиевого расплава варьировалась от 675 до 725 °С.

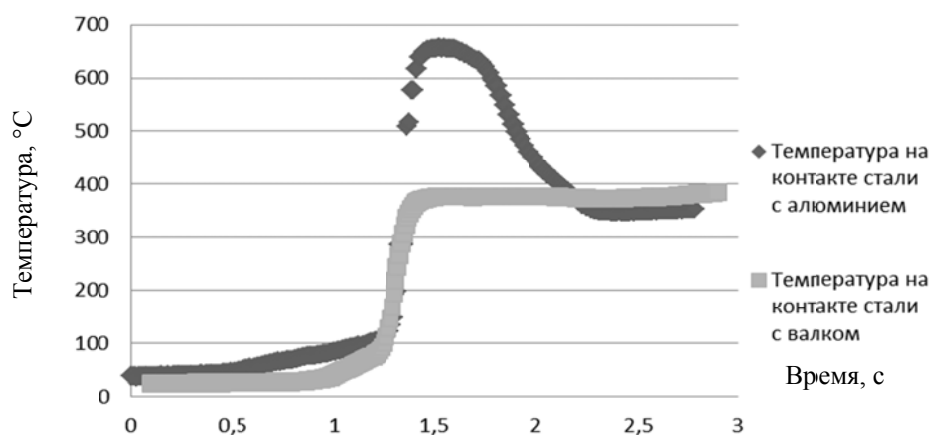


Рис. 2. Графики изменения температуры на контакте стальной полосы с алюминием и с водоохлаждаемым валком

Таблица 1

Постоянные параметры валковой разливки-прокатки,
принятые для осуществления математического моделирования

Температура охлаждающей жидкости, °C	14
Температура стальной полосы на входе в зону кристаллизации-деформации, °C	20
Высота зоны кристаллизации-деформации, мм	30
Толщина алюминиевого слоя на выходе, мм	2
Толщина стальной полосы, мм	0,5
Наружный диаметр водоохлаждаемых бандажей, мм	370
Толщина водоохлаждаемых бандажей, мм	15

На рис. 3 изображено температурное поле в зоне кристаллизации-деформации и в бандажах валков около нее. Минимально отображаемая температура уставлена на уровне 100 °C. Это позволяет лучше продемонстрировать несимметричность температурного поля как валков-кристаллизаторов, так и металла в зоне кристаллизации-деформации. Область высоких температур смещена в сторону правого валка, который находится в непосредственном контакте с расплавленным материалом. Также следует обратить внимание на то, что, несмотря на более высокий коэффициент теплоотдачи со стороны водоохлаждаемого валка, охлаждение алюминия и рост закристаллизовавшейся структуры происходит более активно со стороны стальной полосы. Высокая температура в области контакта алюминия со стальной полосой способствует, в свою очередь, формированию и росту диффузионного слоя между металлами, протекающего с образованием интерметаллических фаз системы Fe_xAl_y .

Одним из ключевых факторов, определяющих качество полос, получаемых валковой разливкой-прокаткой, является степень пластической деформации материала, которой он подвергается непосредственно после кристаллизации. По данным работы [8] величина относительной деформации по толщине полосы в валковом кристаллизаторе при обработке алюминиевых сплавов должна составлять не менее 30 %. Проанализируем данные об изменении степени деформации алюминиевого слоя в зависимости от скорости вращения водоохлаждаемых валков и исходной температуры расплава, полученные в результате математического моделирования и представленные в виде графиков на рис. 4. Из графиков видно, что степень деформации алюминиевого слоя в двухвалковом кристаллизаторе при увеличении скорости разливки уменьшается, а данная зависимость носит характер, близкий к линейному. Интенсивность изменения пластического обжатия с ростом скорости вращения валков также зависит от температуры расплава и возрастает с ее увеличением. Помимо этого, повышение температуры расплава существенно снижает степень деформации алюминиевого слоя, а температура выхода полосы при этом заметно возрастает. Анализ литературных

данных [9] свидетельствует о протекании диффузионных процессов и росте толщины зоны интерметаллических фаз при температурах выше 350 °С. В соответствии с данными работы [10], для получения прочного и качественного соединения алюминия со сталью толщина диффузионного слоя не должна превышать 5 мкм. Таким образом, температура выхода биметаллической полосы из валков должна быть достаточной для протекания диффузионных процессов, однако не слишком высокой для предотвращения чрезмерного роста слоя хрупких интерметаллических фаз.

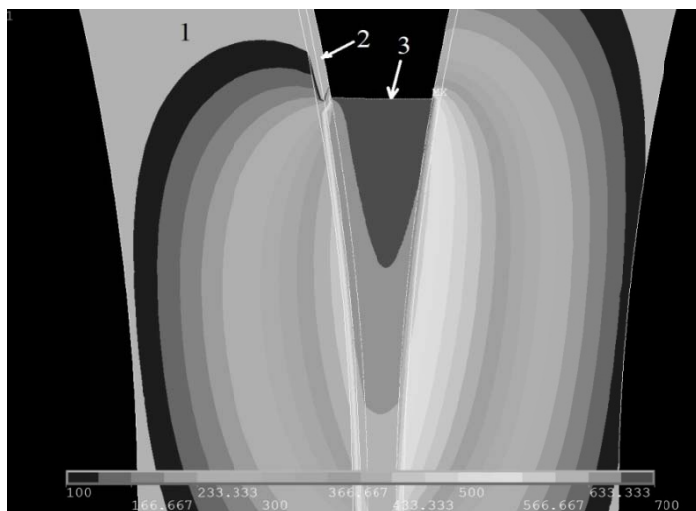


Рис. 3. Распределение температуры в зоне кристаллизации-деформации (начальная температура алюминия 700 °С, скорости прокатки 6 об/мин):

1 – бандаж водоохлаждаемого валка; 2 – стальная полоса; 3 – зона кристаллизации-деформации

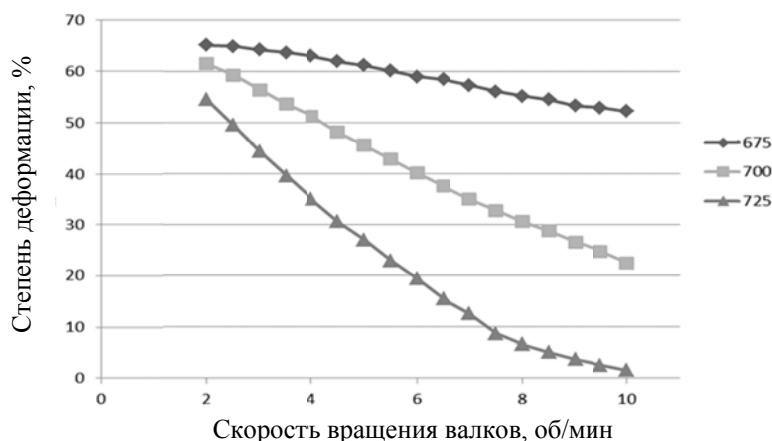


Рис. 4. Зависимость степени деформации алюминиевого слоя от температуры разлива и скорости вращения валков

Обобщенные данные об изменении температуры материала в межвалковом пространстве при его перемещении от сечению входа к сечению выхода из зоны кристаллизации-деформации для температуры разлива 725 °С представлены на рис. 5. Из графиков видно, что температура выхода полосы при различных скоростях разлива сохраняется достаточно высокой. Это обеспечивает снижение деформирующей силы, действующей на валки, однако может привести к чрезмерному росту слоя интерметаллических фаз. Также необходимо отметить резкое снижение интенсивности влияния скорости разлива на температуру выхода металла при скорости вращения валков более 6 об/мин. Подобная зависимость влияния скорости разлива на температуру выхода полосы прослеживается и при других значениях температуры подачи расплавленного алюминия в межвалковое пространство.

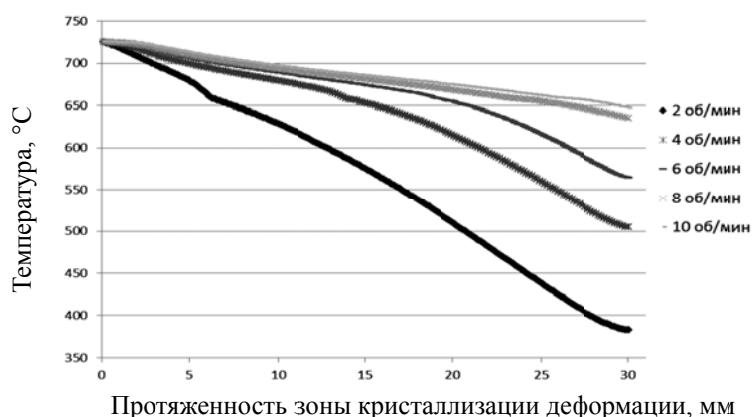


Рис. 5. Изменение температуры на контакте алюминия со сталью вдоль зоны кристаллизации-деформации (температура подачи алюминиевого расплава 725 °С)

ВЫВОДЫ

Повышение температуры расплава алюминия на входе в зону кристаллизации-деформации до 725 °С и увеличение скорости разливки-прокатки более 6 об/мин приводит к значительному уменьшению степени деформации алюминиевого слоя и может привести к чрезмерному росту интерметаллической фазы на контакте алюминий-сталь. При увеличении скорости разливки более 6 об/мин ее влияние на температуру выхода полосы снижается.

Сравнение результатов моделирования теплового состояния системы металл-валок с экспериментальными данными подтвердило возможность использования рассматриваемой конечно-элементной модели для анализа валковой разливки-прокатки биметаллических полос. Разница между расчетными и экспериментальными значениями температуры на контакте алюминий-сталь в зоне кристаллизации-деформации составила менее 10 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haga T. A twin-roll caster to cast clad strip / T. Haga, S. Suzuki // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 138. – P. 366–371.
2. Clad strip casting by a twin roll caster / Haga T., Nakamura R., Kumai S., Watari H. // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2009. – Vol. 37. – P. 117–124.
3. Roll caster for the three-layer clad-strip / Nakamura R., Yamabayashi T., Haga T., Kumai S., Watari H. // *Materials Science and Engineering*. – 2010. – Vol. 41. – P. 112–120.
4. 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. – P. 2321–2328.
5. Numerical simulation of molten pool and control strategy of kiss point in a twin-roll strip casting process / Cao G. M., Li C. G., Liu Z. Y., Wu D., Wang G. D., Liu X. H. // *Acta Metallurgica Sinica (English Letter)*. – 2008. – Vol. 21. – P. 459–468.
6. 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.*
7. Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос / Гридин А. Ю., Огинский И. К., Данченко В. Н., Фр.-В. Бах // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 5. – С. 46–51.
8. Ferry M. *Direct strip casting of metals and alloys* / M. Ferry. – Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2006. – 292 p.
9. Effect of heat treatment on bond characteristics of aluminium clad steel : *Production and characteristics of vacuum roll bonded clad materials* / Mukae S., Nishio K., Kato M., Inoue T. & Sumitomo K. // *Welding International*. – 1995. – Vol. 9. – P. 384–389.
10. *Сварка разнородных металлов и сплавов* / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочка, Л. Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984. – 239 с.

Хвист В. А. – аспирант НМетАУ;
 Столбченко М. Ю. – аспирант НМетАУ;
 Гридин А. Ю. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;
 Самсоненко А. А. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;
 Головки А. Н. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: Khvist@gmail.com

Статья поступила в редакцию 09.09.2013 г.