

Н. И. Тарасевич, И. В. Корниец, А. И. Рыбицкий, И. Н. Тарасевич

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

Затвердевание стальной полосы в установке двухвалковой разливки

Технология валковой разливки стали является одним из самых перспективных и малоизученных способов производства листового металлопроката. В работе исследованы особенности формирования полосы различной толщины в зависимости от интенсивности теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор.

Ключевые слова: валковая разливка, кристаллизатор, теплопередача, математическое моделирование, температурное поле, отливка

Экологичность, качество, энергосбережение – именно этими словами можно охарактеризовать развитие металлургической промышленности, сложившееся за последние десятилетия. Указанным трём требованиям удовлетворяет технология производства листа непосредственно из расплава методом валковой разливки-прокатки. Описание данного процесса и основные особенности, необходимые для его успешной реализации, были впервые сформулированы в 1865 г. сэром Г. Бессемером [1]. Из-за технической сложности организации процесса валковой разливки его промышленная реализация отстала от идеи почти на сто лет и была осуществлена в 50-ых годах прошлого столетия. Технология впервые была опробована на чистом алюминии американской фирмой Hunter Engineering (ныне FATA Hunter) [2], а также в СССР при производстве кровельных листов из чугуна [3]. В последнем случае пластическая деформация металла в валковом кристаллизаторе условиями ведения процесса исключалась.

В настоящий момент уровень развития металлургического оборудования и технологий – в первую очередь за счёт применения компьютерных технологий, современной техники измерений, управления и регулирования, систем заливки и защиты металла – позволил распространить указанный способ производства тонких листов на углеродистые, нержавеющие и электротехнические стали [4, 5 и др.], а также на деформируемые магниевые сплавы [6, 7].

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 [8]. 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 Кореи. Еще один агрегат строится фирмой Bao Steel в КНР [9]. Примерно 90 % от всех эксплуатирующихся в мире установок прямого

литья тонких полос являются машинами с двухвалковым кристаллизатором [8].

Технология прямой отливки полосы обладает рядом преимуществ: она исключает такие операции, как отливка и зачистка сляба; повторный нагрев и горячую прокатку; сокращает потери металла в окалину; повышает производительность труда; снижает выбросы парниковых газов при существенном уменьшении затрат на капитальное строительство.

В современных установках кристаллизатор состоит из двух водоохлаждаемых валков, вращающихся в противоположных направлениях, расположенных непосредственно под промежуточным ковшом. Жидкая сталь поступает в пространство между валками и при контакте с поверхностью валков кристаллизуется, образуя корочки, которые двигаются вместе с поверхностью и выходят из валков в форме полосы (ленты, листа), толщина которой определяется расстоянием между валками, а ширина – боковыми стенками кристаллизатора (рис.1). При этом очень важно эффективно организовать отвод тепла из зоны кристаллизации. Скорость охлаждения в этой зоне составляет более 1000 °C/с.

При формировании полосы должны быть обеспечены такие условия, которые бы исключили прорыв металла при выходе из валков. Исходя из этого,

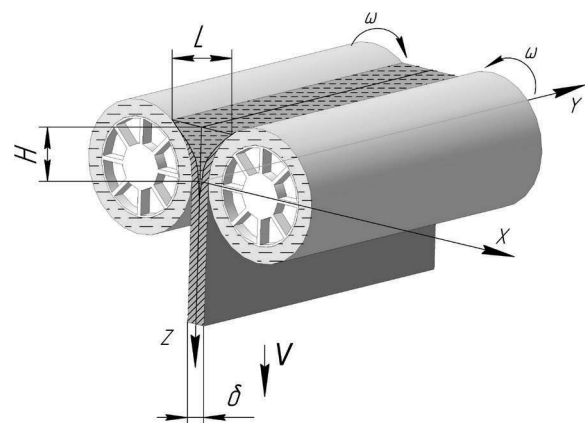


Рис. 1. Валковый кристаллизатор и основные параметры разливки

после выхода из валка металл должен быть либо полностью затвердевшим, либо толщина корки должна быть такой, чтобы не допустить её разрыва после выхода из валков. Таким условиям может удовлетворять наличие в объёме не затвердевшего металла не более 20 % жидкой фазы, т. е. не затвердевшая часть металла находится в двухфазном состоянии.

В настоящей работе проведён анализ параметров формирования тонкой полосы различной толщины в условиях непрерывной валковой разливки.

Объектом исследования являлся процесс получения полосы толщиной 3÷6 мм из среднеуглеродистой стали (таблица).

Теплофизические характеристики стали, используемые в расчётах

Характеристики	Среднеуглеродистая сталь
Плотность, кг/м ³	6900
Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°С)	766
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	35
Теплота фазового перехода, кДж/кг	275
Температура ликвидус, °С	1494
Температура солидус, °С	1465
Начальная температура жидкой стали, °С	1550

При проведении вычислительного эксперимента в качестве исходных данных для моделирования приняты следующие параметры: радиус валка (R) – 250 мм; интенсивность теплоотвода на границе металл-валок (α) – 1000 ± 20000 Вт/(м²·°С); скорость разливки (V) – 0,85 м/с; угол мениска – 30°, уровень металла в кристаллизаторе – 12,5 см; толщина ванны – 3,5 см.

Предполагалось, что уровень ванны расплава поддерживается постоянным за счёт синхронизации объёма подаваемого металла и скорости вращения валков; теплоперенос в направлении перпендикулярном плоскости поперечного сечения зоны кристаллизации-деформации пренебрежимо мал; деформированное состояние в области пластического обжатия полностью закристаллизованного металла – плоское. Указанные допущения позволяют рассматривать задачу теплопереноса и течения металла при непрерывной разливке как двумерную. В силу симметрии относительно вертикальной полости между валками, при моделировании рассматривали 1/2 часть объёма металла. Считаем, что в начальный момент времени (на выходе из промежуточного ковша) температура распределена равномерно – начальная температура соответствует температуре металла в промежуточном ковше.

На рис. 2 показано положение изотерм ликвидус (кривая 1) и солидус (кривая 2) при различной интенсивности теплоотвода от жидкого и затвердевающего металла.

При интенсивности теплоотвода на границе «металл-валок» 18750 Вт/(м²·°С) (рис. 2, а) перегрев снят на расстоянии 2,25 см от линии, соответствующей минимальному расстоянию между валками. Положение изотерм солидус и ликвидус показывают, что на выходе из валков температура поверхности ленты

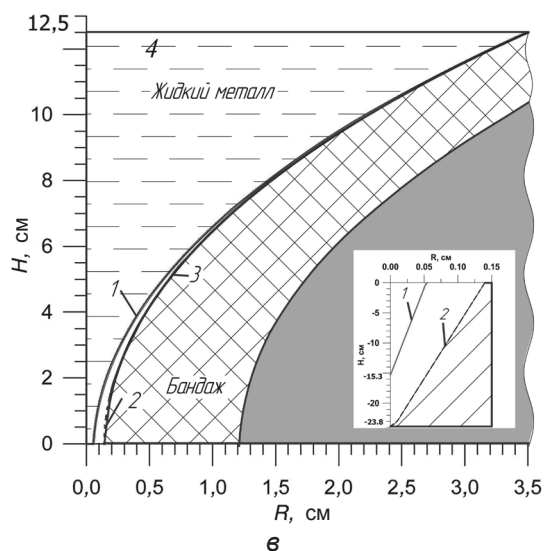
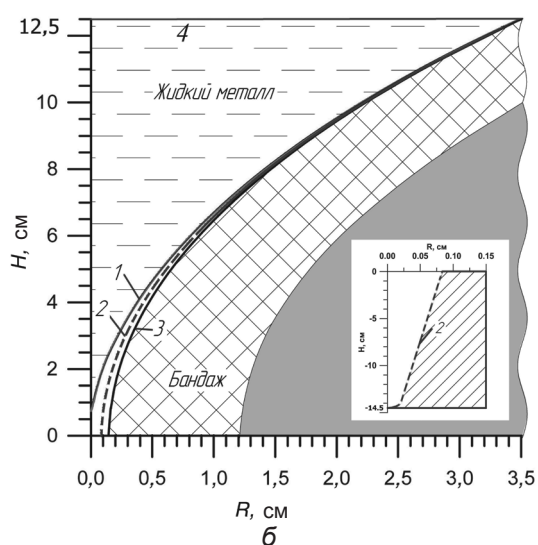
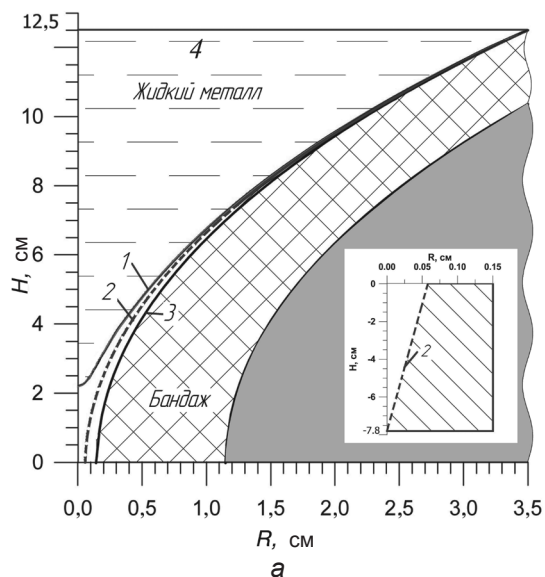


Рис. 2. Положение изотерм ликвидус (1) и солидус (2) при получении полосы толщиной 3 мм; 3 – граница «металл-валок»; 4 – зеркало металлической ванны; интенсивность теплоотвода на границе «металл-валок» Вт/(м²·°С): 18750 (а), 11500 (б), 7200 (в).

ниже температуры солидус, а толщина затвердевшей корочки составляет около 0,09 см. Температурный напор по центру формируемой полосы на фронте

затвердевания составляет $5,6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$, а область двухфазной зоны после выхода из валков имеет протяжённость $7,8 \text{ см}$. Температура наружной поверхности полосы после выхода из валков около $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3).

Снижение интенсивности теплоотвода до $11500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ (рис. 2, б) приводит к увеличению глубины жидкой металлической ванны до $11,3 \text{ см}$. Снятие перегрева жидкого металла происходит при толщине затвердевшей корки $0,06 \text{ см}$ и при температурном напоре по центру полосы на фронте затвердевания $4,4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$. При этом область двухфазного состояния по центру полосы возрастает до 15 см . Толщина затвердевшей корки при выходе полосы из валка составляет $0,085 \text{ см}$, а температура поверхности – $1280 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3) Указанные выше характеристики по величине больше, чем полученные значения в предыдущем варианте. Протяжённость области, в центре которой металл находится в твёрдожидком состоянии, составляет $14,5 \text{ см}$.

Дальнейшее снижение интенсивности теплоотвода (до $7200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$) приводит к образованию твёрдой корки у теплоотводящей поверхности валка, которая в дальнейшем, за счёт подвода тепла от центральных областей, подплавляется и после частичного снятия перегрева металла наблюдаем повторное её образование и дальнейший стабильный рост (рис 2, в). Снятие перегрева происходит после выхода полосы из зоны охлаждения (ниже линии выхода из валков на $15,3 \text{ см}$) при толщине затвердевшей корочки около $0,03 \text{ мм}$. Протяжённость зоны жидкого металла по центру полосы достигает 28 см , причём после выхода металла из валков она составляет более 15 см . Следует также обратить внимание на высокие температуры наружной поверхности ленты, которая попадает в зону воздушного охлаждения (рис. 3). При низком теплоотводе на границе «металл-валок» ($7200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$) она достигает $1390 \text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 3). С ростом интенсивности теплоотвода температура падает, так при $\alpha = 11500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ она составляет $1280 \text{ }^\circ\text{C}$, а при $\alpha = 18750 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ – $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, низкая интенсивность теплоотвода приводит к увеличению времени стабильного роста твёрдой корки, что может привести к тому, что при выходе из зоны охлаждения, за счёт большого теплосодержания зоны двухфазного состояния, она будет подвержена вторичному разогреву, вплоть до нарушения её сплошности.

На рис. 4 показано изменение температуры поверхности полосы на границе контакта с водоохлаждаемым валком и в её центре. Видно, что при низком теплоотводе (кривая 3) в водоохлаждаемый кристаллизатор температура наружной поверхности полосы очень большая и вероятность её разогрева и потери сплошности очень велики.

Далее для полос различной толщины ($3\text{-}6 \text{ мм}$) было проведено исследование изменения параметров затвердевания от интенсивности теплоотвода на границе металл-валок.

Для оценки были выбраны следующие временные параметры: снятие теплоты перегрева, наличие не более 20% жидкой фазы (после снятия перегрева жидкого металла), достижение температуры в объ-

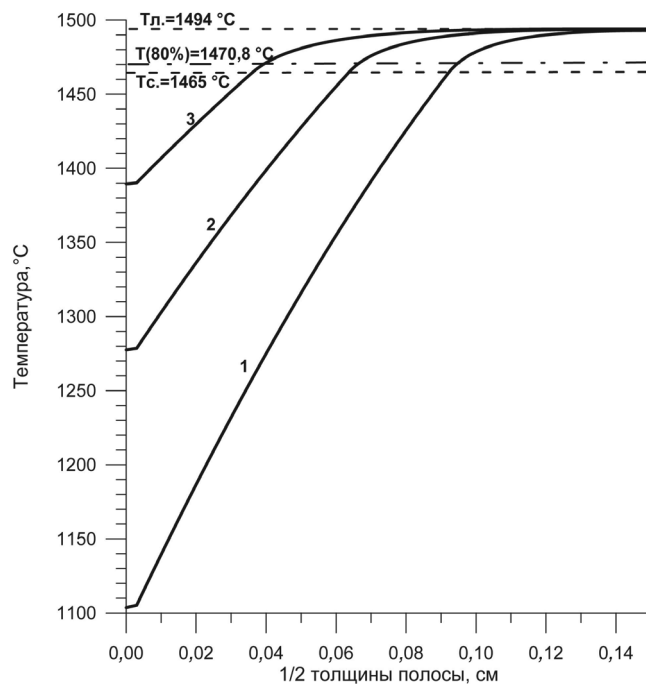


Рис. 3. Распределение температуры в горизонтальном сечении на уровне выхода из валков ($H = 0 \text{ мм}$) при различной интенсивности теплоотвода на границе металл-валок ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$): 1 – 18750; 2 – 11500; 3 – 7200

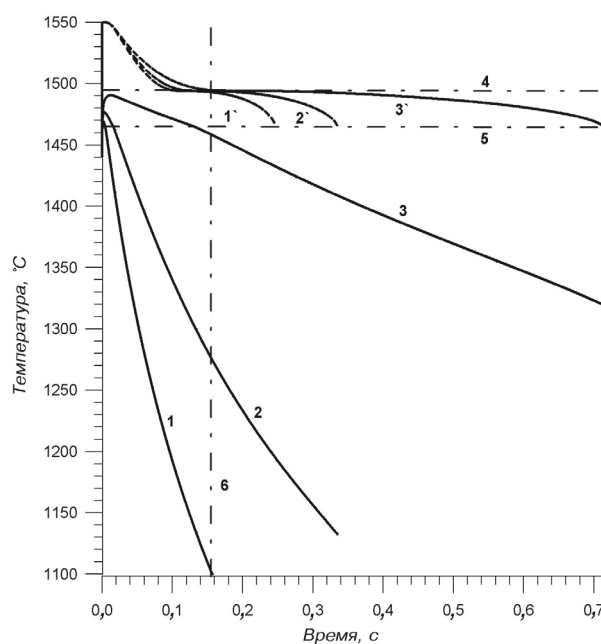


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности полосы на границе контакта с водоохлаждаемым валком (кривые 1-3) и в её центре (1'-3') при формировании в валковом кристаллизаторе от времени; 4 – температура ликвидус; 5 – температура солидус; 6 – время выхода полосы из уровня валков; интенсивность теплоотвода на границе «металл-валок» $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$: 1 – 18750; 2 – 11500; 3 – 7200

ёме полосы ниже солидус. Перечисленные выше параметры оценивали при изменении интенсивности теплоотвода от 1000 до $20000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

На рис. 5 показано изменение времени достижения каждого из параметров для полос разной толщины. Как видно, толщина полосы не меняет

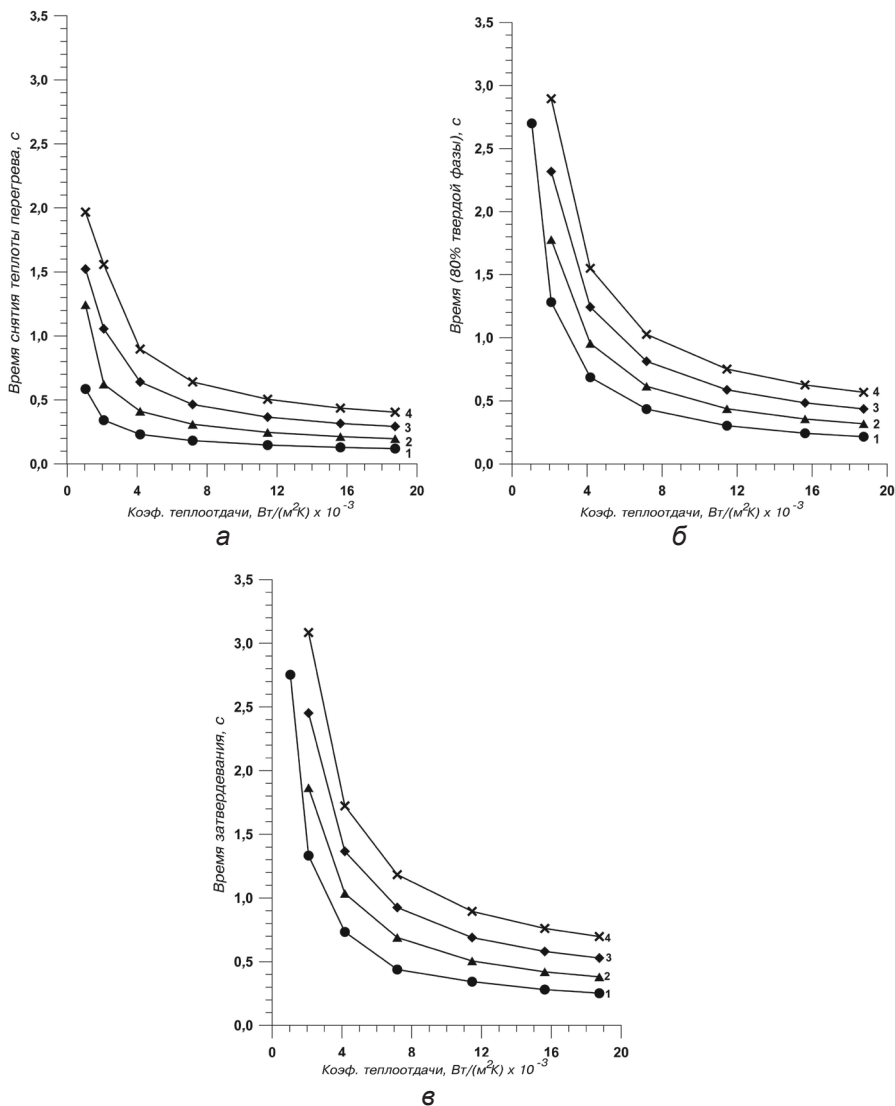
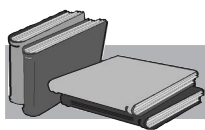


Рис. 5. Зависимость времени снятия теплоты перегрева (а), времени достижения 80 % твёрдой фазы (б) и времени затвердевания (в) от интенсивности теплоотвода на границе «металл-валок» при формировании полосы различной толщины. Толщина полосы, мм: 1 – 3, 2 – 4, 3 – 5, 4 – 6

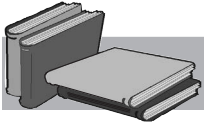
характер изменения рассматриваемых параметров от величины интенсивности теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор. При возрастании коэффициента теплоотдачи до $7100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ наблюдаем резкое снижение величин временных параметров. Увеличение интенсивности теплоотвода в диапазоне $7100\text{-}13500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ приводит к менее значительному снижению временных показателей. Для полосы толщиной 3 мм наблюдаем снижение рассматриваемых параметров на 40-45 %; для полосы толщиной 4 мм этот показатель составляет 30-35 %; для полосы 5 и 6 мм – время снятия перегрева и достижение 80% твёрдой фазы на 20-25 %, а продолжительность полного затвердевания на 40 %. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для полос толщиной более 4 мм зависимость рассматриваемых временных параметров от интенсивности теплоотвода практически идентична.

Итак, исходя из проведённого анализа следует, что рациональным диапазоном величины интенсивности теплоотвода в водоохлаждаемый кристаллизатор при получении полосы до 6 мм является $11600\text{-}13700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.



ЛИТЕРАТУРА

1. Bessemer H. Improvement in the manufacture iron and steel / H. Bessemer // US Patent № 49053, July 25, 1865. – 4 p.
2. Ferry M. Direct strip casting of metals and alloys / M. Ferry. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006. – 276 p.
3. Степанов А. Н. Производство листа из расплава / А. Н. Степанов, Ю. В. Зильберг, А. А. Неуструев. – М. : Metallurgiya, 1978. – 160 с.
4. Данченко В. Н. Непрерывная валковая разливка-прокатка стальных полос / В. Н. Данченко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : «Системні технології», 2002. – С. 63-72.
5. Коновалов Ю. В. Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов. Литейно-прокатные агрегаты с валковыми кристаллизаторами. Сообщение 4 / В. Н. Данченко // Производство проката. – 2010. – № 1. – С. 21-38.
6. New technology for the production of magnesium strips and sheets / R. Kawalla, M. Oswald, C. Schmidt, M. Ullmann, H.-P. N. Vogt, D. Cuong // Metalurgija. – 2008. – Vol. 47 (no 3). – P. 195-198.
7. Basson Fr., Letzig D. Aluminium twin roll casting transfers benefits to magnesium // Aluminium International Today. – 2010. – December (12). – P. 19-21.
8. Georgi-Maschler T. Maßnahmen zur Produktivitätssteigerung an einer Aluminium-Bandgießanlage / T. Georgi-Maschler // Proceeding of 28. Aachner Stahlkolloquium. – Aachen, 2013. – P. 187-196.
9. 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.



REFERENCES

1. Bessemer H. *Improvement in the manufacture iron and steel*. US Patent, no 49053, 1865. [in English]
2. Ferry M. (2006). *Direct strip casting of metals and alloys*. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press,– 276 p. [in English]
3. Stepanov A. N., Zilberg Yu. V., Neustruev A. A. (1978). *Proizvodstvo lista iz rasplava*. – M. : Metallurgiya, 160 [in Russian].
4. Danchenko V. N. (2002). *Nepreryvnaya valkovaya razlivka-prokatka stalnyh polos. Suchasni problemy metalurhiyi. Naukovi visti. Plastychna deformatsiya metaliv*. – Dnipropetrovs'k: Systemni tekhnolohiyi, vols 5, 63-72. [in Ukrain].
5. Konovalov Yu. V. (2010). *Nastoyaschee i buduschee liteyno-ppokatnyh agepatov. Liteyno-ppokatnye agepaty s valkovymi kpistallizatopami. Soobschenie 4*. – Proizvodstvo prokata, no 1, pp. 21-38. [in Russian].
6. Kawalla R., Oswald M., Schmidt C. et al. 2008. *New technology for the production of magnesium strips and sheets*. – Metalurgija, Vol. 47, no 3, pp. 195-198. [in English].
7. Basson Fr., Letzig D. (2010). *Aluminium twin roll casting transfers benefits to magnesium*. – Aluminium International Today, no 12, pp. 19-21. [in English].
8. Georgi-Maschler T. 2013. *Maßnahmen zur Produktivitätssteigerung an einer Aluminium*. – Proceeding of 28. Aachner Stahlkolloquium, Aachen, pp. 187-196. [in English].
9. Klos W., Höcklung C., Becker J.-U., Ernenputsch L. (2013). *Herstellung innovativer Stahlkonzepte über das Bandgießverfahren*. – Proceeding of 28. Aachner Stahlkolloquium, Aachen, pp. 217-227. [in English].

Анотація

Тарасевич М. І., Корнієць І. В., Рибіцький О. І., Тарасевич І. М.
Твердження сталевої стрічки в установці двохвалкового розливання

Технологія валкового розливання сталі є одним з найбільш перспективних та маловивчених способів виробництва листового металопрокату. У роботі досліджено особливості формування стрічки різної товщини залежно від інтенсивності тепловідводу у водоохолоджуваний кристалізатор.

Ключові слова

валкове розливання, кристалізатор, теплопередача, математичне моделювання, температурне поле, виливок

Summary

Tarasevich N., Korniets I., Rybitskii A., Tarasevich I.
Steel strip solidification in twin-roll casting unit

Twin-roll steel casting technology is one of the most promising and understudied methods of steel sheet production. The work investigates the peculiarities of different thickness strips formation dependently on heat transfer to water-cooling crystallizer intensity.

Keywords

twin-roll casting, crystallizer, heat transfer, mathematical modeling, temperature field, casting

Поступила 10.02.2016