

## ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА, ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ

Ноговицын А. В. /д. т. н./, Баранов И. Р.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

*Досліджено вплив умов розливання (радіус валків, товщина одержуваного листа, рівень і температура розплаву в міжвалковому зазорі) на фізико-технологічні параметри процесу. Розраховані максимально допустимі швидкісні режими отримання металевих смуг різної товщини в валках-кристалізаторах різного діаметру. Виконано фізичне і обчислювальне дослідження гідродинаміки розплаву в міжвалковому зазорі. Отримано залежності межі плинності для вуглецевих і легованих сталей в малодослідженому інтервалі температур – вище температури солідус.*

**Ключові слова:** двовалкове лиття, міжвалковий зазор, валок-кристалізатор, розплав, математична модель, механічні властивості.

*The effect of casting conditions (rolls radius, the thickness of the obtained sheet, the level and the melt temperature in the roller gap) on the physico-technological process parameters has been studied. Maximum allowable speed limits for the production of metal strips of dissimilar thickness in rolls-molds different diameters have been calculated. Physical and computational studies of hydrodynamics liquid-alloy in the roller gap. Flow limits dependence for carbon and high-hardness steel in under investigated temperature interval – above the solidus temperature have been obtained.*

**Key words:** two-roll casting, roll gap, roll-crystallizer, melt, mathematical model, mechanical properties.

*Исследовано влияние условий разлики (радиус валков, толщина получаемого листа, уровень и температура расплава в межвалковом зазоре) на физико-технологические параметры процесса. Рассчитаны максимально допустимые скоростные режимы получения металлических полос различной толщины в валках-кристаллизаторах разного диаметра. Выполнены физическое и вычислительное исследования гидродинамики расплава в межвалковом зазоре. Получены зависимости предела текучести для углеродистых и легированных сталей в малоисследованном интервале температур – выше температуры солидус.*

**Ключевые слова:** двухвалковое литье, межвалковый зазор, валок-кристаллизатор, расплав, математическая модель, механические свойства.

**Введение.** Валковая разливка-прокатка является одним из наиболее перспективных и эффективных процессов производства стального листа. К преимуществам этой технологии относятся компактность агрегата и экономия до 80...89% энергоресурсов за счет отсутствия промежуточного подогрева материала и минимизации числа технологических операций. Однако, несмотря на попытки внедрения в производство технологии двухвалковой разливки на сегодня не удается в полной мере решить задачи устойчивого промышленного процесса получения качественного стального листа. Это связано с недостаточной изученностью закономерностей формирования непрерывно литой полосы, сложностью управления гидродинамическими, температурными, кинематическими параметрами процесса литья-прокатки.

**Цель работы.** Изучить закономерности процессов теплопереноса, затвердевания и деформации металлической ленты при литье-прокатке, которые позволят выбирать оптимальные технологические режимы.

**Актуальный уровень техники и исследований.** Интенсивные работы по развитию процесса производства тонкой стальной полосы на двухвалковых литейно-прокатных агрегатах проводятся в Великобритании (British Steel, Corus), Японии (Nippon Steel Corp., Kawasaki Works, Nippon Metals, Pacific Metals, Sumimoto Metals), Канаде (Project Bessemer), Китае

(завод Baosteel), Корее (Posco)). Наибольшая промышленная эффективность валковой разливки достигнута в США на агрегатах Castrip фирмы Nucor [1]. Исследования валковой разливки металлов проводились и в Украине. Одесским НИИСЛ в 1955 г. были разработаны способ и установка для непрерывного литья тонких листов из чугуна в двухвалковые кристаллизаторы с подводом металла сверху [2]. В Физико-технологическом институте металлов и сплавов (ФТИМС) НАН Украины была предложена и опробована конструкция агрегата для литья ленты [3]. В совместных работах Национальной металлургической академии Украины и Ганновского Университета им. Лейбница описаны особенности конструкции и основные технические характеристики экспериментальной машины валковой разливки-прокатки собственной разработки [4].

**Постановка задачи.** В работе решались следующие научные задачи: провести экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики расплава в межвалковом зазоре (МВЗ) при различных его параметрах; исследовать процесс образования затвердевшей корочки на валках-кристаллизаторах; изучить реологические свойства затвердевающего металла (стали) в диапазоне температур "солидус-ликвидус"; исследовать влияние конструктивных (диаметр валков) и технологических параметров валковой разливки (высота ванны жидкого металла, температура металла, степень

обжатия и др.) на протяженность зон кристаллизации и деформации, на скорость разливки стальных полос различной толщины; оценить влияние способа подачи расплава в валки на распределение температуры и затвердевание полосы по ее ширине на выходе из валков.

**Экспериментальное исследование течения модельной среды**

Физическое моделирование проводилось на двухвалковой лабораторной установке. Для устойчивой фиксации жидкости в межвалковом пространстве использовалась прозрачная призма, изготовленная из оргстекла (рис. 1). Стенки призмы повторяли геометрию окружности бочки валков. В качестве моделирующей жидкости использовалась вода. Визуализацию потоков осуществляли при помощи добавления в воду полистироловых шариков (трассеров) диаметром 0,8...1,0 мм, имеющих нулевую плавучесть. Направление и скорости потоков фиксировали с помощью веб-камеры. Запись гидродинамической картины велась на компьютер. Область наблюдения в межвалковом пространстве модели прозрачного бункера получали обтюрируемым пучком света.

товленная из оргстекла (рис. 1). Стенки призмы повторяли геометрию окружности бочки валков. В качестве моделирующей жидкости использовалась вода. Визуализацию потоков осуществляли при помощи добавления в воду полистироловых шариков (трассеров) диаметром 0,8...1,0 мм, имеющих нулевую плавучесть. Направление и скорости потоков фиксировали с помощью веб-камеры. Запись гидродинамической картины велась на компьютер. Область наблюдения в межвалковом пространстве модели прозрачного бункера получали обтюрируемым пучком света.

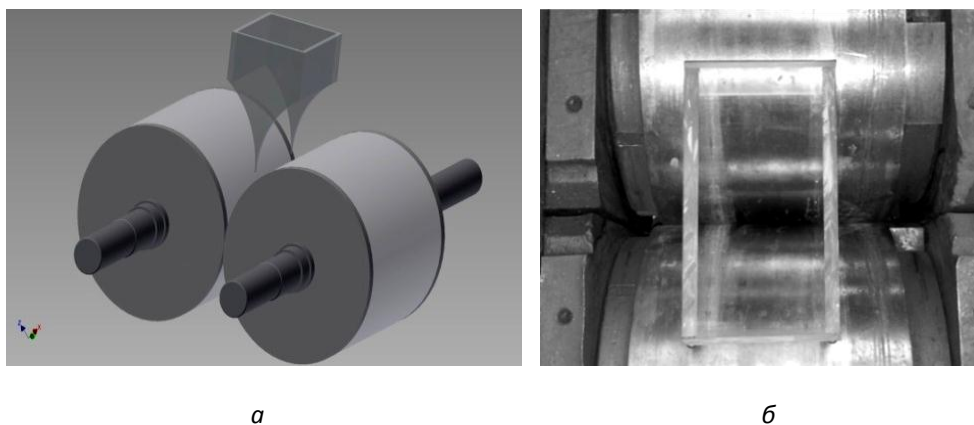


Рис. 1. Призма моделирующая устойчивое удержание жидкости в межвалковом зазоре (а) вид сверху (б) аксонометрическая модель

Количественные значения скоростей потоков жидкости определяли посредством расчета отношения измеренных на экране монитора длин треков ко времени экспозиции с учетом коэффициента масштабирования. В процессе выполнения исследований было проведено несколько

экспериментов с использованием воды с различной концентрацией трассеров. Наилучший результат дало использование жидкости с плотностью шариков 200 шт./литр. После получения изображения треков, было построено поле движения трассеров (рис. 2).

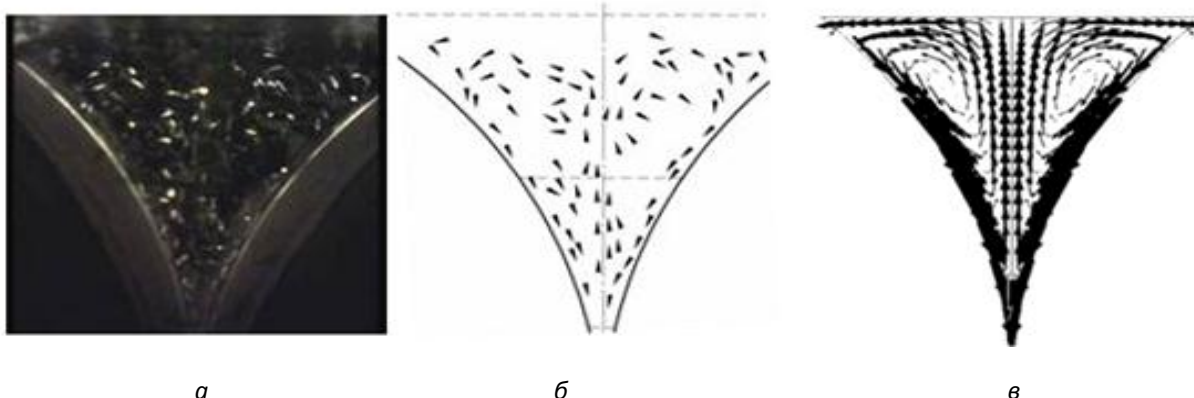


Рис. 2. а – фотоснимок треков частичек; б – полученное поле движения; в – компьютерная модель

На основе зафиксированных параметров движения трассеров в физической модели, построено векторное поле скоростей, на котором можно четко проследить образование двух зон циркуляции. Наибольшая скорость движения потока жидкости находится вблизи поверхности валков, которые нагнетают жидкость в межвалковый зазор. Обратный поток, возникающий в точке встречи поверхностных потоков и проходящий вдоль центральной оси межвалкового пространства, имеет значительно меньшую скорость.

Результаты физического моделирования сопоставляли с результатами компьютерного моделирования поля скоростей жидкости в межвалковом зазоре двухвалкового кристаллизатора, выполненных совместно с учеными Института электродинамики НАН Украины с использованием пакета программ Comsol [5, 6]. Результаты численного расчета и эксперимента хорошо согласуются между собой, что дало возможность создания надежного математического аппарата для исследования течения металла в процессе валковой

разливки и более глубокого понимания процессов, протекающих в межвалковом пространстве.

**Компьютерное исследование течения расплав.** Для моделирования турбулентного течения жидкости в активной зоне установки в качестве основной модели используется  $k-\varepsilon$  модель турбулентности. Другой упрощенный расчет турбулентного течения проводится путем задания постоянного во всей области эффективного значения турбулентной вязкости, вычисляемого с помощью формулы Прандтля. Показано, что эффективная вязкость жидкости должна превышать молекулярную вязкость (равную для воды  $10^{-3}$  Па·с) более, чем в 100 раз [6].

**Оценка влияния геометрических параметров зоны разлива на параметры течения.** Проведены расчеты для трех вариантов разлива в валки-кристаллизаторы диаметром 500 мм – при высоте налива расплавленного металла  $l = 45, 90, 135$  мм (угол мениска  $10, 20, 30^\circ$ ) [5]. Анализ расчетных данных (рис. 3) показывает на значительную неравномерность распределения скоростей течения в поперечных сечениях межвалкового зазора.

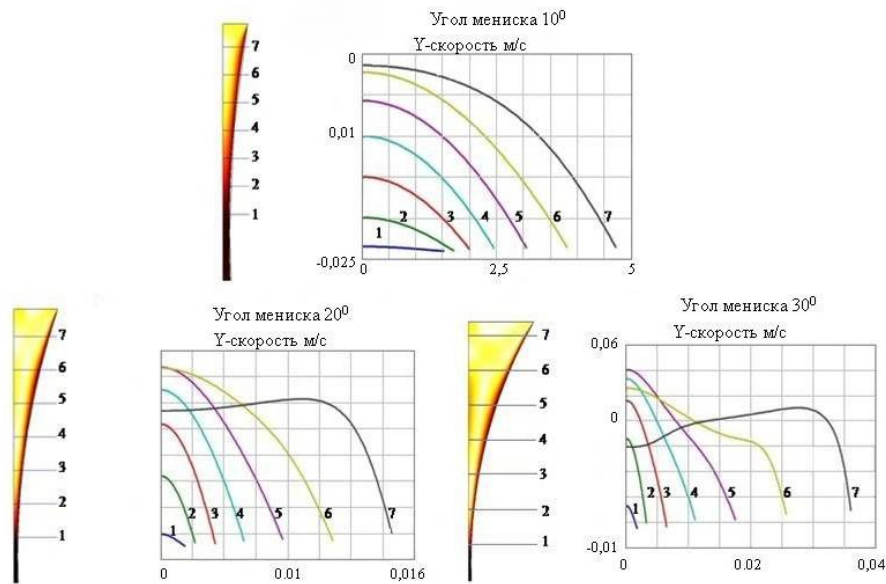


Рис. 3. Изменение  $y$ -составляющей скорости вдоль семи показанных слева поперечных сечений 1/2 межвалкового канала для трех вариантов высоты мениска

В слоях металла, прилегающих к валку, наблюдаются значительные градиенты продольной скорости течения. Металл центральной части верхней половины МВЗ отстает от окружной скорости валка и находится в состоянии, близком к застойному. С увеличением высоты налива до 90 мм (угла  $\alpha$  свыше  $20^\circ$ ) на поверхности мениска появляется тенденция к попятному движению металла из межвалкового зазора, что может вызывать бурление металла. При высоте налива 135 мм ( $\alpha=30^\circ$ ) скорость попятного движения металла имеет величину, соответствующую 20% скорости вращения валка-кристаллизатора, т. е.

170 мм/с. С увеличением диаметра валков-кристаллизаторов (1500 мм) скорости попятного течения существенно возрастают и могут достигать весьма больших значений (до 520 мм/сек). Такое интенсивное обратное течение расплава на поверхности мениска МВЗ может вызывать выбросы расплава из межвалкового зазора.

**Затвердевание металла.** Решающей характеристикой процесса формирования полосы в валковом кристаллизаторе является положение точки смыкания затвердевших корочек относительно плоскости оси валков (точки "S") (рис.4).

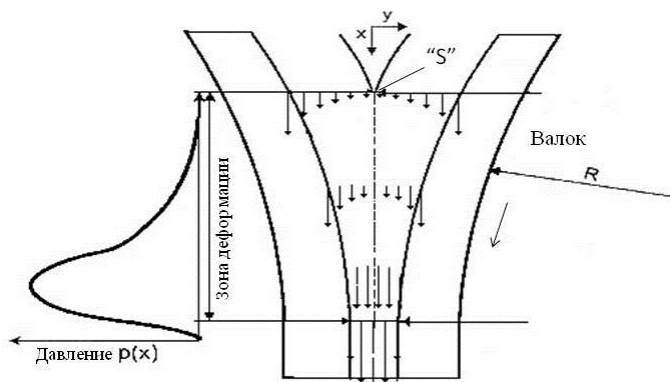


Рис. 4. Схема смыкания затвердевших корочек металла в МВЗ

Если точка "S" значительно выше линии осей валков ("бесслитковая прокатка"), то в результате деформации затвердевшего металла усилие на валки возрастает. С одной стороны это вызывает необходимость увеличивать мощность привода и прочность конструкции кристаллизатора, с другой, может привести к появлению трещин вследствие эффекта прокатки. Наоборот, если точка смыкания фронтов кристаллизации находится ниже линии осей валков ("жидкая прокатка"), то из валков выходит полоса с жидкой сердцевиной.

14

Сложность экспериментального установления границы между двумя характерными областями зоны кристаллизации-деформации заставляет обращаться к математическому моделированию. Толщину корочки в работе определяли двумя методами: по формуле "квадратного корня" и путем расчета положения линии солидуса на рассчитанном поле температур металла в межвалковом зазоре.

Для расчета толщины методом "квадратного корня" необходимо знать значения коэффициента кристаллизации для разливаемого металла. В литературе они, как правило, приводятся для случая затвердевания металлов в слитках, когда между затвердевшей корочкой и охлаждающей стенкой образуется газовый (воздушный) слой, задерживающий теплопередачу. Опубликованных работ по экспериментальному исследованию параметров процесса затвердевания расплавов при валковой разливке крайне мало. Нам известны лишь две, и то они касаются разливки технически чистого алюминия [7].

Для определения коэффициента скорости кристаллизации  $k$  при валковой разливке-прокатке стальной полосы воспользовались результатами исследований Т. Мизогучи и К. Миязава [8]. Суть их экспериментов заключалась в исследовании структурообразования стальной полосы из нержавеющей стали в зависимости от времени контакта металла с металлической подложкой. Мы установили, что расчеты наиболее точно приближены к экспериментальным значениям толщины затвердевшей корочки при  $k = 4,2 \text{ мм/с}^{0,5}$ .

В основу второго способа расчета затвердевшей корочки положено решение уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных разностей [9]. В результате расчета распределения температуры расплава определяется положение изотерм "ликвидус" ( $T_L$ ) и "солидус" ( $T_S$ ). За толщину корочки принимают расстояние от образующей валка до линии солидус. Однако достоверность таких расчетов существенно зависит от значений многих констант, входящих в уравнения теплопроводности (коэффициенты теплопроводности металла в жидком и твердом состоянии, коэффициент теплопередачи от металла к валку, теплота фазового превращения). Кроме того, значения температур "ликвидус" и "солидус" зависят от интенсивности теплоотвода от затвердевающего металла [10].

**Реология стали при температурах валковой разливки.** Данные о свойствах стали при температурах вблизи температуры солидуса и выше (в двухфазной твердо-жидкой зоне) исследованы крайне мало. В ФТИМС НАН Украины исследованы механические свойства низкоуглеродистых, углеродистых, низколегированных, среднелегированных и высоколегированных сталей при высоких температурах, приближенных до температуры плавления [11]. Для построения зависимости предела текучести ( $\sigma_T$ ) стали в интервале температур  $T_S \leq T \leq T_L$  была введена безразмерная температура  $\bar{T} = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}$ , которая принимает значения от 1 до 0. По известной гипотезе [12] значение  $\bar{T}$  соответствует доле твердой фазы в стали при заданной температуре металла. Анализ экспериментальных данных показал (рис. 5), что в качестве зависимости предела текучести от  $\bar{T}$  можно применить степенную функцию:  $\sigma'_T = \sigma(T_S) \cdot \bar{T}^n$ , где  $\sigma(T_S)$  – сопротивление деформации при температуре "солидус",  $n=4$ . Абсолютная погрешность формулы составляет  $1,09 \text{ Н/мм}^2$ .

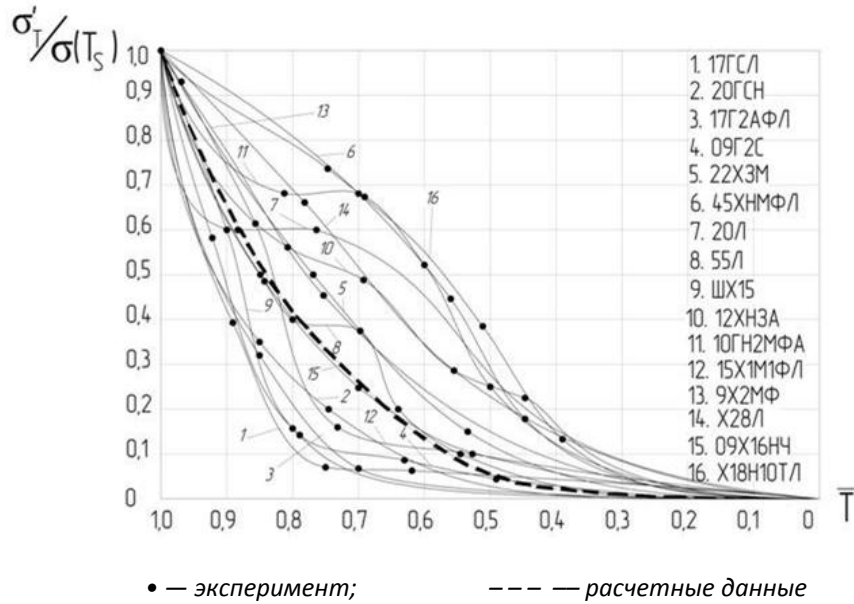


Рис. 5. Зависимость значения  $\sigma'_T/\sigma(m_s)$  от температуры  $\bar{T}$

**Влияние толщины и обжатия полосы, диаметра валков-кристаллизаторов, уровня наполнения расплава на скорость разливки.** Ключевым фактором для достоверного расчета скорости разливки является правильное определение положения смыкания затвердевших на валках-кристаллизаторах корочек разливаемого металла. Применение не достоверных методик приводит к ошибкам при проектировании оборудования. Нами рассчитаны скорости разливки стальных полос толщиной от 1 до 5 мм с обжатием (15%) и без обжатия в валках различного диаметра.

Из расчетов следует, что осуществление валковой разливки полосы с обжатием приводит к заметному снижению скорости розливки-прокатки. Например, для стальной полосы толщиной 2 мм при обжатии 15% скорость разливки снижается в 3 раза (с 164 до 52 м/мин.) по сравнению с разливкой без обжатия.

На рис. 6 приведены скорости разливки стальных полос различной толщины ( $h_n$ ) в валках-кристаллизаторах радиусом  $R=500$  мм при изменении уровня наливки (угла контакта металла с валком  $\alpha=10, 20$  и  $30^\circ$ ) без деформации и с деформацией 15%.

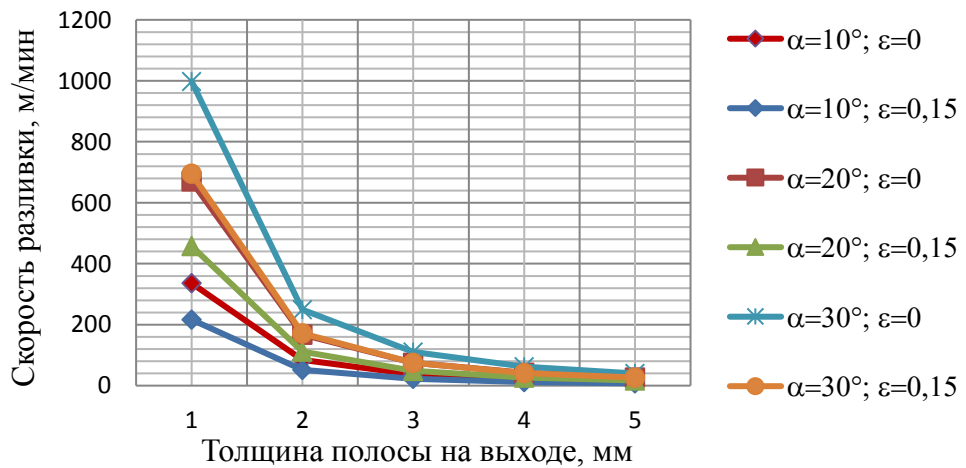


Рис. 6. Зависимость расчетной максимальной скорости разливки-прокатки стальных полос от толщины ( $h_n$ ), угла зоны кристаллизации-деформации  $\alpha$ , степени деформации  $\epsilon$  (радиус валков-кристаллизаторов 500 мм)

Из данных рис. 6 следует, что увеличение угла контакта металла с валком (уровня заливки металла) приводит к существенному росту скорости разливки. Так, для полосы толщиной 1 мм увеличение угла кристаллизации-деформации на  $10^\circ$  приводит к росту скорости разливки в два раза. Полученные результаты расчетных скоростей разливки для стальных полос количественно близки к показателям существующей коммерческой установки Castrip компании Nucor. Сопоставив применяемую на данной установке при разливке полосы 1,6 мм в валках диаметром 500 мм рабочую скорость 80 м/мин., можно сделать вывод, что разливка-прокатка полосы осуществляется с обжатием 15%.

Расчеты показывают, что для обеспечения постоянного положения точки S (точки смыкания корочек затвердевшего металла) скорость разливки должна регулироваться пропорционально изменению высоты налива. Увеличение высоты налива при постоянной (нерегулируемой) скорости приводит к увеличению степени деформации, которая может достигать критической величины, приводящей к появлению в полосе трещин. Важным фактором стабильной технологии валковой разливки является обеспечение постоянной температуры металла, подаваемого в валки-кристаллизаторы. Показано, что изменение температуры металла на  $10^\circ\text{C}$  приводит к изменению толщины корочки стали на 0,05 мм, что приводит к изменению обжатия на 3% (абс.) при постоянной скорости разливки, что в свою очередь может приводить к продольной разнотолщинности полосы, а также может содействовать появлению трещин.

Немаловажную роль в валковой разливке играет способ подачи расплава в валки-кристаллизаторы. Проведенное исследование [13] показало, что увеличение длины щелевого питателя от 25 до 100%

длины валка-кристаллизатора обеспечивает более равномерное распределение температуры в межвалковом канале, а перепад температур по ширине полосы на выходе из валков уменьшается с  $80^\circ\text{C}$  до  $10^\circ\text{C}$ .

Таким образом, установленные закономерности показали, что необходимыми условиями для стабильного процесса валковой разливки являются постоянство температуры и расхода подаваемого в валки-кристаллизаторы металла, равномерное его распределение по длине межвалкового зазора.

Решение этой задачи возможно путем применения МГД-оборудования. В ФТИМС НАН Украины разработана концепция и принципиальная схема процесса валковой разливки стали, главным признаком которой является использование магнитодинамического промежуточного ковша (МД-ПК), созданного на базе магнитодинамического миксера-дозатора жидкой стали [14]. Применительно к процессам валковой разливки, электромагнитные поля и соответствующие устройства следует использовать на следующих стадиях процесса: 1) в промежуточном ковше – для нагрева расплава непосредственно перед разливкой; 2) на выходе из промежуточного ковша – для управления гидродинамическим режимом поступления расплава в валковый кристаллизатор; 3) в самом валковом кристаллизаторе – для его бокового "запирания" и недопущения вытекания расплава. Применение нагрева в промежуточном ковше позволит стабилизировать режим непрерывной разливки, т. к. постоянство температуры расплава обуславливает постоянство его физико-химических свойств и соответственно – стабильность гидродинамического режима разливки и теплофизических условий формирования заготовки.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Шалимов Ал. Г. Двухвалковые литейно-прокатные агрегаты для производства тонких горячекатаных стальных полос. Ч.II // Электротехнология, -№2. - 2014. - С.12-16
2. Степанов А.Н., Ю. В. Зильберг Ю.В., Неуструев А.А. Производство листа из расплава. : Учебник.– М. : Металлургия, 1978. – 160 с.
3. Найдек В.Л., Осіпов В.П., Узієнко Б.О., Перелома В.О., Дубровін Е.В., Казачков Є.О., Майко О.І. Спосіб виготовлення металевих стрічки.: Патент 45433 Україна, МПК7 B22B 11/06, B220 11/11 // Бюл. "Промислова власність", 2002, №4.
4. Гридин А. Ю. Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой / А. Ю. Гридин, М. Шапер, В. Н. Данченко // Обработка металлов давлением. – 2011. – № 3 (28). – С. 184–194.
5. Ноговицын А.В. Компьютерное моделирование течения расплава в двухвалковом кристаллизаторе/ А.В.Ноговицын, А.Д. Подольцев, И.Н.Кучерявая, А.Н.Ломко//Процессы литья. – 2014. - №6. – С.11-17.
6. Ноговицын А.В., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Численное моделирование турбулентного течения расплава в двухвалковом кристаллизаторе с щелевым питателем/ А.В.Ноговицын, А.Д. Подольцев, И.Н.Кучерявая// Процессы литья. – 2015. - №2. – С.33-39.
7. Berkovici S.J. Optimization of 3C roll caster by automatic control // Proc. of Conference "Light Metals". – TMS, New York. – 1985. – P. 1285–1299.
8. Mizoguchi T., Miyazawa K. Formation of solidification structure in a twin-roll rapid solidification process // Advanced Materials and Process. – 1990. –Vol. 1. – P. 93–98.
9. Тарасевич Н.И. Затвердевание стальной полосы в установке двухвалковой разливки/ Н.И.Тарасевич, И.В.Корниец, А.И.Рыбицкий, И.Н.Тарасевич // Металл и литье Украины. – 2016, № 2. – С. 9-14.
10. Мартынов О.В. Тепловые и диффузионные процессы при разливке стали и способы их регулирования/ О.В.Мартынов, И.П.Дубовенко, А.Н.Семенов, А.А.Ежов, Д.А.Дюдкин- Сб.: Теплофизика стального слитка. Киев: ИПЛ АН УССР, 1980, с. 36-41.
11. Скок Ю.Я. Механические свойства стали при температурах вблизи солидуса / Препринт. – Киев: Ин-т проблем литья АН Украины. – 1983. – 66 с.
12. Ольшанский В.М., Коваль Н.П., Сью Т.Я. Математическое моделирование процесса затвердевания непрерывных заготовок // Металлургическая теплотехника. – 1999. – №2. – С. 188–191.
13. Ноговицын А.В., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Трехмерное моделирование гидродинамических процессов в двухвалковом кристаллизаторе при различных способах подачи металла. – Праці ІЕД НАНУ.-2015.- Вип. 40.-С.95-102.
14. Дубоделов В.И., Погорский В.К., Горюк М.С. Магнитодинамическое оборудование для перегрева и разливки чугуна и стали/ В.И. Дубоделов, В.К., Погорский, М.С. Горюк // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2013. – № 1. – С. 134-137.