

УДК 621.7.014

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОФИЛЯ ЛЕНТЫ ОТ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДВУХВАЛКОВОЙ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ-ПРОКАТКИ РАСПЛАВА

М. Н. ВЕРЕЩАГИН, Н. М. ЗАПУСКАЛОВ, И. В. АГУНОВИЧ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Прямое получение ленты и полос непосредственно из расплава методом двухвалковой быстрой закалки-прокатки резко сокращает энергетические и экономические затраты, расширяет растворимость твердых растворов, позволяет получать метастабильные фазы и более совершенную микроструктуру. Коммерческий успех данной технологии зависит от качества ее продуктов, и прежде всего, сформированного поперечного сечения ленты в процессе быстрой кристаллизации расплава и последующей прокатки намороженного металла.

Целью данной работы является исследование влияния некоторых технологических параметров на профиль ленты при двухвалковом методе быстрой закалки расплава.

Постановка задачи

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в развитии процесса двухвалковой быстрой закалки расплава [1]–[5], форма поперечного сечения получаемой ленты остается наиболее значимым критерием данного процесса, так как получаемый профиль должен отвечать стандартам, которым соответствуют изделия после горячей листовой прокатки металла. При этом характеристики формы ленты в отношении волнистости, коробоватости и серповидности являются основными показателями качества изделий. Температурное поле расплава и профиль валков могут оказывать существенное влияние на профиль и геометрическую стабильность быстро-закаленной ленты.

В межвалковом пространстве при заливке находится определенное количество расплава с изменяющимся по высоте содержанием твердой фазы, причем уровень ванны, имеющей клиновидную форму, определяется в основном литейными свойствами сплава, силами поверхностного натяжения, расходом жидкого металла и геометрическими размерами кристаллизаторов [6]. При этом процесс затвердевания расплава в значительной степени определяется условиями его теплообмена с валковым кристаллизатором, причем тепловые процессы в установившемся режиме работы установки являются квазистационарными [7]. Основные процессы формирования ленты происходят в ванне расплава, находящейся в межвалковом пространстве.

Геометрия сопла вероятно является одним из самых важных факторов, который влияет на распределение температуры в ванне расплава и, как следствие, влияет на тепловой профиль банджа валка. Экспериментально установлено, что увеличение расхода расплава металла через сопло увеличивает температуру ванны расплава и тем самым увеличивает тепловое расширение банджа валка (рис. 1).

Результаты исследований и их обсуждение

Для установившегося движения вязкой несжимаемой жидкости через сопло прямоугольной формы с определенным соотношением длины L и ширины h уравнение Навье-Стокса записывается в виде [8]:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) = \frac{dp}{dz}, \quad (1)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости расплава; p – давление; ϑ – компоненты скорости потока расплава; z – координата в направлении течения расплава.

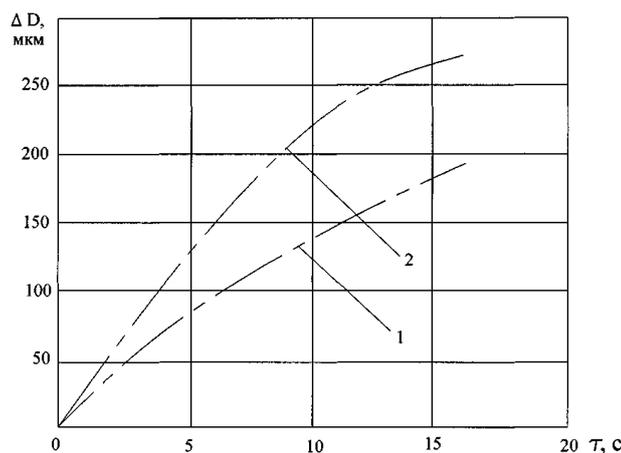


Рис. 1. Изменение диаметра вала в ходе процесса: 1 – у края вала; 2 – в середине

Из уравнения (1) следует, что при независимости координат друг от друга данное равенство достигается при постоянстве левой и правой частей. С учетом вышесказанного уравнение (1) сводится к линейному уравнению в частных производных второго порядка

$$\nabla^2 \vartheta = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = -\frac{\Delta p}{\mu l}, \quad (2)$$

где Δp – постоянное вдоль сопла падение давления на произвольно выбранном участке, и выражается через секундный расход расплава через сопло длиной l .

Решение уравнения (2) имеет вид [8]:

$$V = \frac{16\vartheta^2}{\pi^3} \frac{h^2 \Delta p}{\mu l} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \left[1 - \frac{ch\left(\frac{2n+1}{2} \frac{\pi}{\vartheta} \eta\right)}{ch\left(\frac{2n+1}{2} \frac{\pi}{\vartheta}\right)} \cos\left(\frac{2n+1}{2} \frac{\pi}{\vartheta} \xi\right) \right], \quad (3)$$

где $\xi = \frac{x}{h}$; $\eta = \frac{y}{h}$ – безразмерные переменные; $\vartheta = \frac{L}{h}$, $\vartheta > 1$.

Анализ выражения (3) показывает, что при истечении расплава из сопла, имеющего определенную вязкость, которая зависит от природы металла, его теплофизических свойств и температуры, при условии изотермического движения возникает неравномерность поля скоростей по длине щели раздаточного сопла и подчиняющегося параболе второго порядка. При этом секундный объемный расход расплава, отнесенный к единице длины щели сопла, определяется выражением [8]:

$$q = \int_{-n}^n V dy = \frac{\Delta p}{4\mu l} \vartheta h^4 f(\vartheta), \quad (4)$$

где $f(\vartheta) = \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5 \vartheta} \left(th \frac{\pi \vartheta}{2} + \frac{1}{27} th \frac{3\pi \vartheta}{2} + \dots \right)$.

Падение давления на произвольно выбранном участке соответственно равно

$$\Delta p = \lambda \frac{1}{2h} \rho \frac{V_{cp}^2}{2}, \quad (5)$$

где ρ – плотность расплава; V_{cp} – средняя по сечению сопла скорость истечения расплава; λ – коэффициент сопротивления щели сопла с прямоугольным сечением.

Коэффициент λ может быть найден через число Рейнольдса и функцию $f(\vartheta)$ [8]:

$$\lambda = \frac{128}{Re} \frac{1}{f(\vartheta)}; Re = \frac{V_{cp} 2h}{\nu}. \quad (6)$$

Здесь ν – кинематический коэффициент вязкости расплава.

На рис. 2 и 3 представлены результаты численных расчетов при исследовании влияния числа Re на коэффициент сопротивления λ и распределение скорости потока расплава по длине и ширине сопла. Можно видеть, что при прочих равных условиях увеличение длины щели сопла ведет к росту коэффициента сопротивления λ (рис. 2). Это, в свою очередь, приводит к большей неоднородности струи и, как следствие, неравномерности теплового поля расплава, которое напрямую зависит от теплового профиля вала.

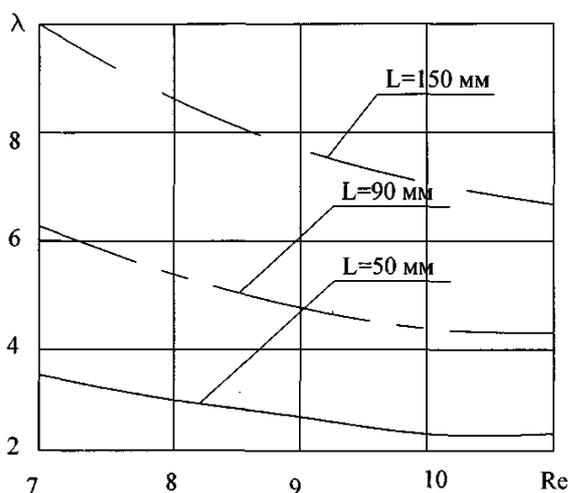


Рис. 2. Влияние числа Рейнольдса на коэффициент сопротивления

Тот же вывод можно сделать при анализе результатов, представленных на рис. 3. Распределение скорости потока расплава, подчиняющегося параболе второго порядка, также приводит к неоднородности распределения температуры в ванне расплава и неодинаковости теплового расширения бандажей валков.

Кроме того, расположение сопла на значительном расстоянии от поверхности ванны расплава ведет к неоднородности расхода по щели вследствие поверхностного трения и сжатия потока поверхностным натяжением расплава [9].

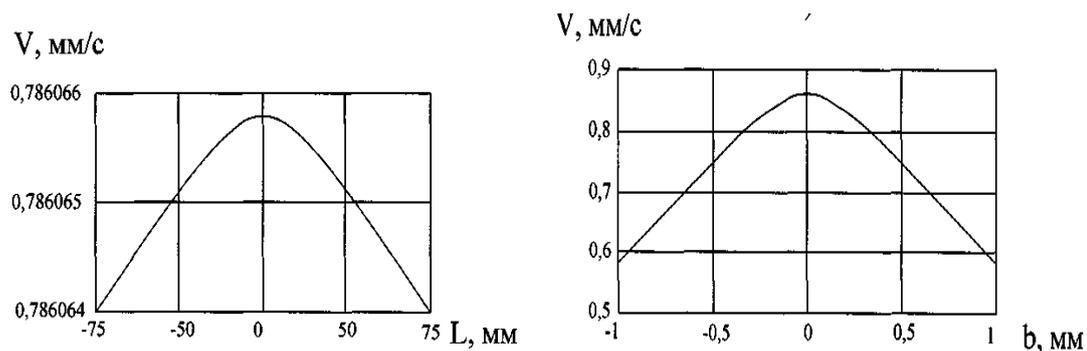


Рис. 3. Распределение скорости потока расплава по длине и по ширине сопла

Таким образом, из вышесказанного следует, что применение различных способов выравнивания неравномерности скоростей потока расплава в направлении координат сопла L и h позволит уменьшить неравномерность распределения температуры в ванне расплава и получить требуемый тепловой профиль валка. Это позволит получить ровную после закалки-прокатки ленту.

На рис. 4 и 5 представлена схема и общий вид устройства для подачи расплава при получении быстрозакаленных лент, позволяющего управлять скоростью подачи расплава и температурным режимом в сопле и бандаже валка-кристаллизатора [10].

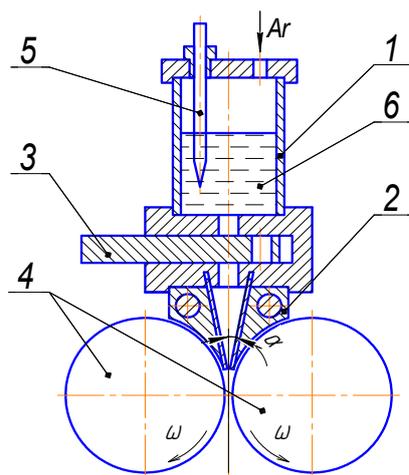


Рис. 4. Схема устройства для подачи расплава при получении быстрозакаленных лент:

- 1 – питатель для подачи расплава; 2 – насадка с керамическими направляющими;
- 3 – шиберный затворный механизм с отверстием для подачи расплава;
- 4 – валки кристаллизатора; 5 – термopара; 6 – расплав [10]

Устройство, разработанное в ГГТУ им. П. О. Сухого, содержит питатель для подачи расплава, выполненный в виде резервуара круглого или прямоугольного поперечного сечения, насадку с двумя продольными и боковыми керамическими стенками, шиберный затворный механизм с отверстием для подачи расплава в полость насадки, установленные с образованием в месте контакта их боковых поверхностей очага деформации вблизи сопла насадки. Продольные керамические стенки установлены в направляющие с возможностью независимого их перемещения. Насадка располагается на автономной раме, направляющие выполнены прямолинейными. Угол наклона направляющих к продольной оси насадки составляет 15–45°. Боковая поверхность продольных керамических стенок может быть изогнута в осевом направлении, при этом отношение длины проекции изогнутой боковой поверхности про-

дольной стенки на ось насадки к половине максимального ее прогиба составляет 16–24 (рис. 6). Такое соотношение L/ξ обеспечивает стабилизацию истечения расплава из сопла и однородность скорости движения расплава. Стенки насадки могут также быть изготовлены из материала с большим омическим сопротивлением.



Рис. 5. Общий вид устройства для получения быстрозакаленных лент [10]

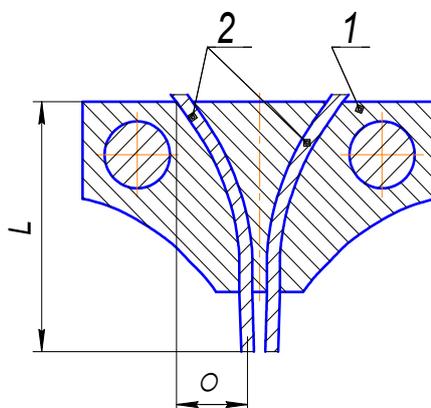


Рис. 6. Насадка с изогнутыми керамическими направляющими:
1 – насадка; 2 – керамические направляющие

Возможность независимого перемещения керамических стенок позволяет управлять скоростью подачи расплава и температурным режимом в сопле, устраняет неоднородность скорости перемещения расплава, а также колебания его потока внутри сопла. Сходящийся канал создает соответствующее давление у стенок и придает ускоренное движение потоку, которое ограничивает толщину пограничного слоя стекающего вниз металла. Это исключает или, по крайней мере, сводит к минимуму одну из причин неоднородности скорости потока металла, т. е. влияние поверхности стенок на поток расплава. Изменение размеров поперечного сечения сопла путем независимого перемещения керамических стенок расширяет технологические возможности процесса двухвалковой быстрой заковки расплава. Выполнение боковых стенок под углом обеспечивает максимальную глубину подачи расплава в очаг деформации, исключая возможность преждевременного замораживания расплава до момента начала

процесса быстрой закалки-прокатки, а также обеспечивает получение плоскостности струи расплава. Последнее обстоятельство устраняет причину образования поверхностных дефектов лент из-за возможной потери продольной устойчивости плоского потока расплава. Изогнутость в осевом направлении боковой поверхности керамических стенок позволяет стабилизировать истечение расплава из сопла путем исключения колебаний потока расплава внутри его и получения однородности скорости перемещения расплава за счет уменьшения сил трения о поверхность стенок. Подогрев стенок обеспечивает возможность поддерживать постоянную температуру расплава в сопле, устраняет неравномерность и позволяет управлять температурным режимом в последнем, расширяет технологические возможности процесса.

Как было сказано выше, тепловое поле расплава, который кристаллизуется в межвалковом пространстве, оказывает непосредственное влияние на тепловой профиль бандажа валка-кристаллизатора.

Математическая задача расчета температурного режима бандажа и его теплового профиля состоит в нахождении функции $T(\rho, \varphi, z, t)$, описывающей его температурное поле [11].

При этом уравнение теплопроводности валка-кристаллизатора в виде полого цилиндра конечной длины с толщиной стенки S , вращающегося с постоянной угловой скоростью w вокруг продольной оси, на который в момент времени $t_0 = 0$ оказывает действие распределенный в некоторой области S_0 тепловой источник Q , вращающийся вокруг той же оси с постоянной угловой скоростью, записывается в виде [11]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T + f(r, \varphi, z, t), \quad (7)$$

где $T(\rho, \varphi, z, t)$ – текущая температура валка-кристаллизатора; Δ – оператор Лапласа в цилиндрической системе координат; a^2 – коэффициент теплопроводности; f – функция, описывающая действие в области S_0 источника тепла; R_1, R_2 – внутренний и наружный радиусы бандажа.

Функция f задается следующим образом [11]:

$$f(r, \varphi, z, t) = \frac{QR_0}{C_p \rho S_0} \delta(r - R_0) [\theta(z - z_1) - \theta(z - z_2)] \times [\theta(\varphi - \varphi') - \theta(\varphi - \varphi' - 2\varphi_0)],$$

$$\varphi' = w \sum_{k=0}^{\infty} (t - t_k) [\theta(t - t_k) - \theta(t - t_{k+1})], \quad t_k = \frac{2\pi k}{w},$$

где $S_0 = 2\varphi_0 R_0 (z_2 - z_1)$ – площадь области, в которой действует источник тепла; C_p, ρ – удельная теплоемкость и плотность материала бандажа.

На рис. 7 показаны результаты численного расчета распределения температуры вращающегося бандажа валка-кристаллизатора в соответствии с уравнением (7). Из него следует, что с течением времени при увеличении толщины стенки бандажа амплитуда колебаний температуры внутри его увеличивается. При этом для определенного соотношения R_1 и R_2 оболочки температурное поле становится осесимметричным, а амплитуда колебаний увеличивается. Средняя температура бандажа при этом имеет вид плавно возрастающей кривой, вырождающуюся в прямую, причем уменьшение толщины S ведет к выравниванию средней температуры, а при $S \rightarrow 0$ – к установлению квазистационарного режима охлаждения. Увеличение длины раздаточного сопла при прочих равных условиях ведет к уменьшению средней температуры бандажа и более равномерному его нагреву по продольной координате (рис. 8).

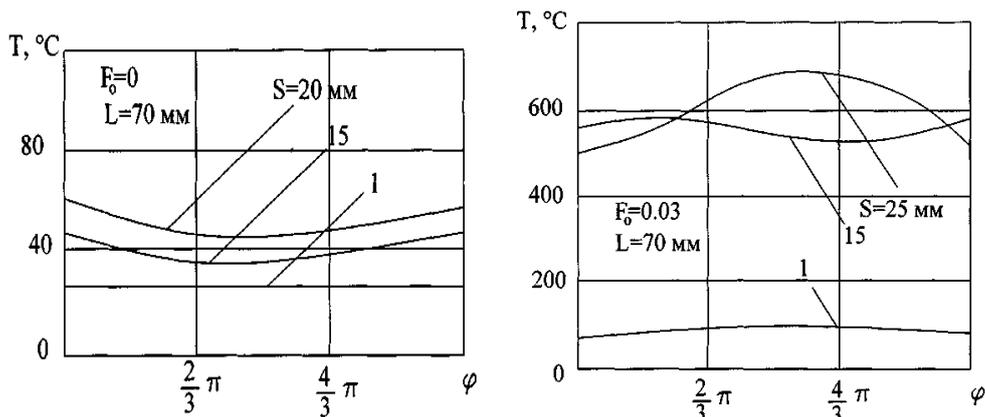


Рис. 7. Распределение температуры вращающегося банджа валка

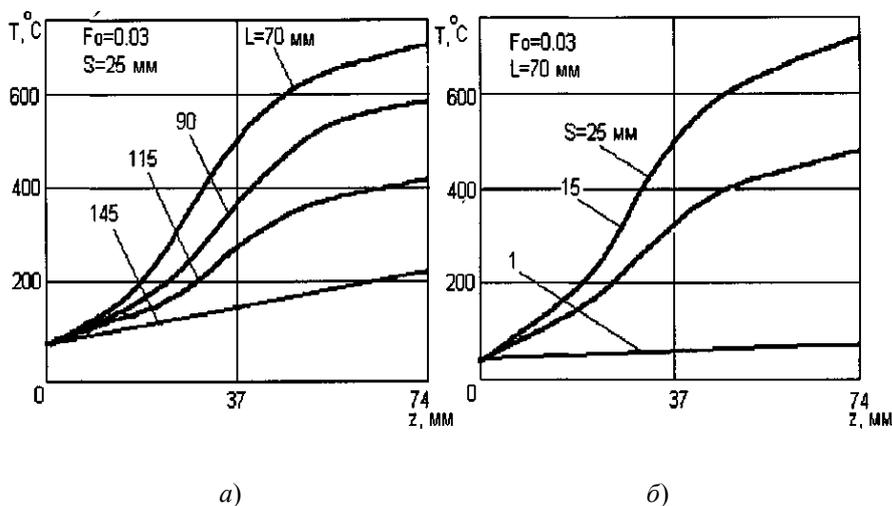


Рис. 8. Влияние длины щели сопла и толщины стенки банджа на распределение температуры

Зная распределение температуры в бандже валка-кристаллизатора, можно определить термоупругую деформацию для плоского напряженного состояния.

Уравнение термоупругости в цилиндрической системе координат имеет вид [11]:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2\psi}{d\varphi^2} = (1 + \nu_m)\alpha_m T, \tag{8}$$

где ν_m – коэффициент Пуассона; α_m – коэффициент теплового расширения металла; ψ – потенциал термоупругого перемещения.

На основании закона Гука тепловое напряжение, которое соответствует потенциалу перемещения ψ , определяется соотношением

$$\sigma_{r/r=R_2} = \frac{E}{1 + \nu_m} \frac{1}{R_2} \frac{d^2\psi}{d\varphi^2}, \tag{9}$$

при этом тепловая деформация банджа в соответствии с имеющимся распределением температуры находится следующим образом:

$$\delta_{th} = 2\sigma_r / Ek. \tag{10}$$

Здесь E – модуль упругости Юнга; k – модуль всестороннего сжатия.

На рис. 9 представлены результаты численного расчета теплового профиля по длине бандажа при различных значениях координат, что моделирует длину раздаточного сопла в соответствии с уравнением (10). Увеличение длины раздаточного сопла при прочих равных условиях способствует более равномерному набуханию бочки валка, что связано с получением более однородного температурного поля в бандаже (рис. 9, а). При уменьшении толщины последнего термоупругие деформации имеют место, но они весьма малы (рис. 9, б).

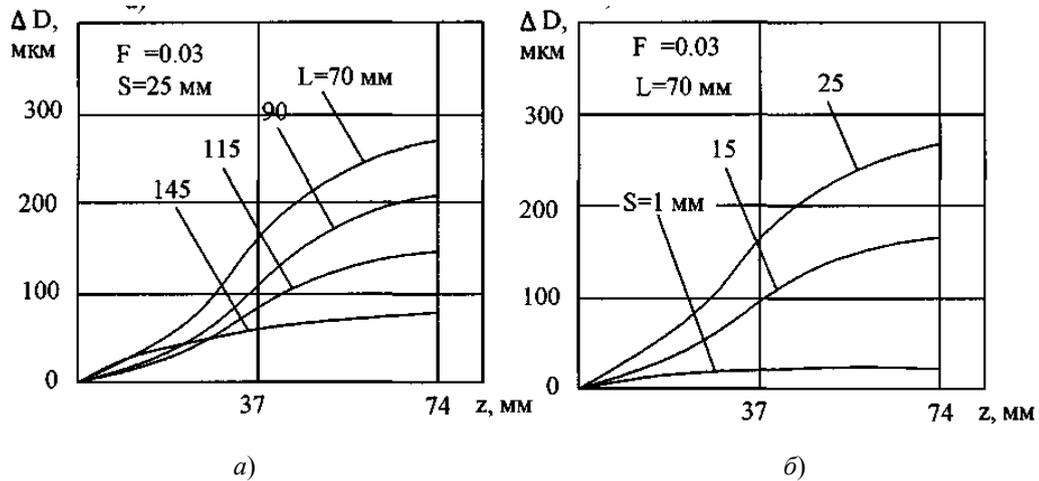


Рис. 9. Влияние длины щели сопла и толщины стенки бандажа на распределение теплового профиля по длине бочки валка

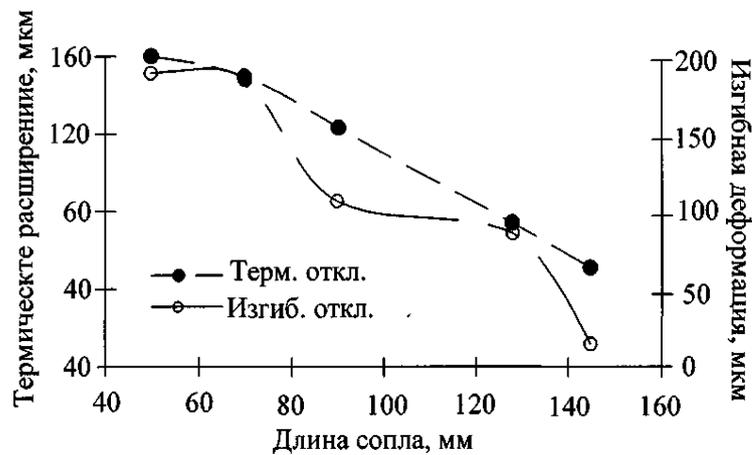


Рис. 10. Влияние длины сопла на термическое и изгибное отклонения

На рис. 10 и 11 представлены экспериментальные данные влияния длины сопла и толщины бандажа валка на термическое и изгибное отклонения профиля валка, которые хорошо иллюстрируют численные расчеты, представленные выше. Увеличение длины сопла при прочих равных условиях ведет к уменьшению неравномерности термического расширения валка и уменьшению изгибных деформаций профиля последнего. Это дает возможность получения более качественной с точки зрения плоскостности быстрозакаленной ленты. С другой стороны, увеличение толщины бандажа валка уменьшает изгибные деформации, однако увеличивает термическое набухание валка. Таким образом, при двухвалковой быстрой закалке расплава тепловой профиль бандажа определяет вогнутый профиль быстрозакаленной ленты, а изгибные деформации вследствие сжимающих сил и обеспечивающих устойчивость процесса прокат-

ки на мороженного металла и максимално возмозный отвод тепла – выпуклый профиль ленты. Это говорит о необходимости поиска оптимальной толщины бандажа, диаметра и длины валков, а также усилий их сжатия, что обеспечит возмозность управления профилем и геометрической стабильностью получаемой ленты.

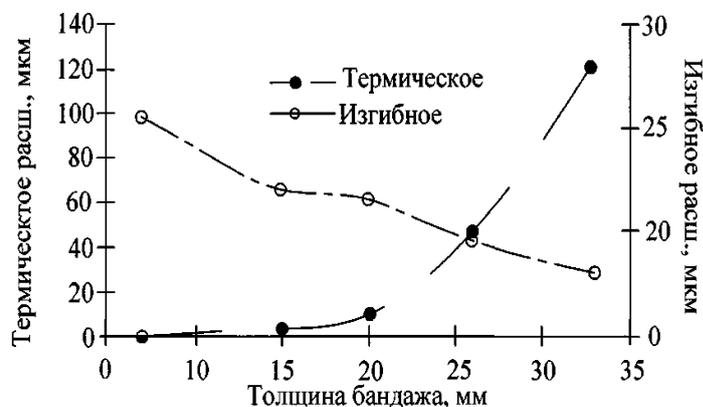


Рис. 11. Влияние толщины бандажа валка на термическое и изгибное отклонения профиля валка

Заключение

Показано, что геометрия сопла при двухвалковом методе быстрой заковки расплава является одним из самых важных факторов, который влияет на распределение температуры в ванне расплава и тепловой профиль бандажа валка.

Увеличение длины сопла и расхода расплава ведет к увеличению неоднородности потока и потере его продольной устойчивости.

Применение различных способов выравнивания неравномерности скоростей потока расплава из сопла уменьшает неравномерность распределения температуры в ванне, стабилизируя тепловой профиль бандажа валка и способствуя получению ровной ленты.

Показано, что увеличение длины раздаточного сопла уменьшает среднюю температуру бандажа и способствует более равномерному его нагреву по продольной координате.

Установлено, что оптимизация толщины бандажа, диаметра и длины валка обеспечивает получение правильного профиля поперечного сечения и плоскостности быстрозакаленной ленты.

Литература

1. Two-Dimensional Model for Twin-Roll Continuous Casting / T. Saiton [et al.] // Metallurgical Transactions. – 1989. – V. 20B. – P. 381–390.
2. Литье полосы в двухвалковых кристаллизаторах – современный уровень развития фирмы Тиссен шталь / Г. Литтершайдт [и др.] // Черные металлы. – 1991. – № 3. – С. 46–51.
3. Yukumoto M., Shibuya K., Kan T. et al. in S. Steeb and H. Warlimont (eds), Analysis of the Solidification process in the roller quenching method // Rapidly Quenched metals: North Holland, Amsterdam, 1985. – P. 91–94.
4. A consideration on the rapid solidification of steels -solidification of steel by twin-roll caster-V / A. Kasama [et al.] // Fifth international Iron and Steel Congress, Steelmarking proceedings, Washington, 1986, book 1, vol. 69. – P. 849–853.

5. Молотилов, Б. В. Структура и свойства быстрозакаленного Fe-Si сплава / Б. В. Молотилов, Н. М. Запускалов, А. Н. Сивин // *Металловедение и терм. обраб. металлов.* – 1992. – № 9. – С. 8–11.
6. Верещагин, Л. Н. Анализ процесса затвердевания металла или двухвалковой закатке расплава / Л. Н. Верещагин // *Вест. акад. наук Рэсп. Беларусь. Сер. физ.-техн. наук.* – 1994. – № 2. – С. 47–52.
7. Верещагин, Л. Н. Формирование геометрии ленты при двухваликовой закатке расплава / Л. Н. Верещагин, Н. М. Запускалов // *Вест. акад. наук Рэсп. Беларусь. Сер. физ.-техн. наук.* – 1995. – № 3. – С. 36–41.
8. Лойцянский, Л. Г. *Механика жидкостей и газа* / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1973. – 847 с.
9. T. Kozuka, T. Yuhara, I. Michi and S. Asai / *ISIJ Int.*, 29 (1989). – P. 1022.
10. М. Н. Верещагин, Г. А. Серебрянский, А. В. Холомеев / Патент Респ. Беларусь № 424 06.05.1995. SV1788658 A1.
11. Верещагин, Л. Н. Температурный режим валко-кристаллизатора или двухвалковой закатки расплава / Л. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко // *Изв. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук.* – 1993. – № 4. – С. 60–65.

Получено 19.12.2008 г.