



*The peculiarities of metal bend forming at casting by frosting on roll are described, the mathematical model of hardening and cooling of casting is presented.*

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, В. А. ПУМПУР, В. М. ИЛЮШЕНКО,  
ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ НА ВАЛКЕ

В середине прошлого века в США и Франции введены в промышленную эксплуатацию первые установки для получения полос из алюминия и его сплавов с малым интервалом кристаллизации методом бесслитковой прокатки в валковых кристаллизаторах [1]. Величина обжатия отливки в валках достигала 50%. Такие установки используются, главным образом, для получения полос толщиной свыше 5 мм из технически чистого алюминия и свинца. Полосы, полученные бесслитковой прокаткой, подвергают холодной прокатке для изготовления тонкого листа и фольги.

Данный способ литья полос наряду с такими способами, как литье между колесом и лентой, между двумя бесконечными лентами, непрерывное литье в кристаллизаторы гусеничного типа не позволяет получить тонкую ленту, требуя дальнейшей прокатки полученной заготовки [1–3].

При литье намораживанием одна поверхность отливки формируется без соприкосновения со стенкой литейной формы и представляет собой фронт кристаллизации металла. В таких условиях питание отливки является наиболее благоприятным и она затвердевает без усадочной пористости, неметаллических включений и химической неоднородности. Литьем намораживанием можно изготавливать тонкостенные отливки, к плотности которых предъявляются повышенные требования [4]. Методом намораживания на вращающемся валке-кристаллизаторе получили, в частности, тонкую свинцовую ленту (толщиной от 0,2 до 1,5 мм) и стальную полосу (толщиной свыше 6 мм).

Для получения непрерывной отливки необходимо обеспечить непрерывное извлечение из расплава затвердевшей на поверхности кристаллизатора корки. Отливка в процессе формирования и охлаждения на валке неподвижна относительно кристаллизатора и перемещается вместе с ним,

расплав в зоне намораживания неподвижен. При этом заполнение ванны расплавом, отвод теплоты перегрева, затвердевание отливки и ее частичное охлаждение, удаление отливки совершаются одновременно. Формирование отливки происходит при высокой интенсивности теплообмена между коркой и кристаллизатором, тепловом и гидродинамическом воздействии перегретого расплава на фронт кристаллизации, активном взаимодействии свободной поверхности жидкого металла с извлекаемой отливкой. В связи с этим процесс литья намораживанием на валке-кристаллизаторе имеет ряд особенностей.

Толщина отливки в традиционных способах литья определяется полостью, в которую заливают металл. При непрерывном намораживании толщина отливки является функцией параметров технологического процесса и существенно зависит не только от условий теплообмена, но и от поверхностного натяжения расплава, явления наноса при извлечении и ряда других факторов. Получение отливки постоянной толщины можно обеспечить, если в процессе литья неизменными будут длина зоны контакта расплава с кристаллизатором, скорость вращения валка, температура заливки, условия охлаждения валка. При этом различают два периода процесса литья.

Первый период соответствует началу процесса. Он характеризуется непрерывно изменяющимися условиями теплообмена при намораживании отливки по мере прогрева литниковой системы и кристаллизатора. Это приводит к намораживанию корки неодинаковой толщины. Второй период наступает после того, как тепловой режим работы валка стабилизируется. В течение данного периода формируется отливка одинаковой толщины.

Важное значение имеет место расположения ванны с расплавом относительно горизонтальной

оси валка. Для получения металлических (алюминиевых, цинковых, свинцовых) лент непрерывным намораживанием на валке предлагается к использованию схема процесса с боковой ванной, т.е. с расположением ванны выше горизонтальной оси валка (рис. 1). Так как прочность алюминия и цинка вблизи температуры кристаллизации незначительна [5], то отливка может легко разрушиться сразу после выхода из расплава под действием собственной массы и центробежных сил при расположении ванны снизу под валком. Такую схему можно использовать для получения свинцовых лент в рулонах толщиной 0,25–1,25 мм [3].

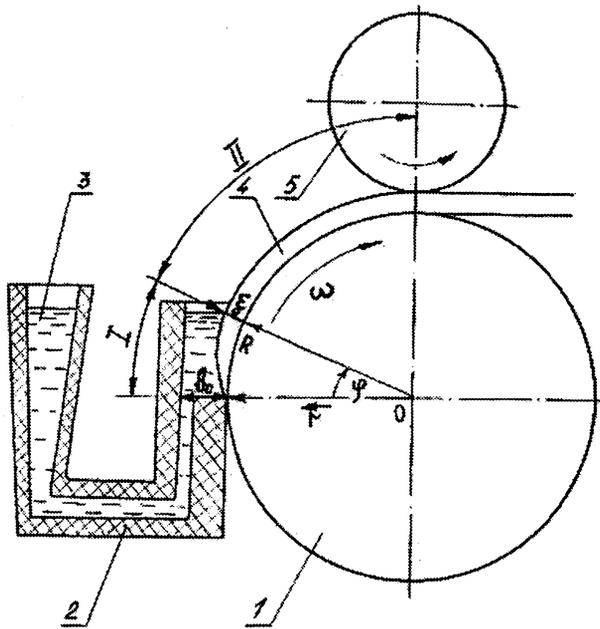


Рис. 1. Схема непрерывного литья ленты с расположением металлоприемника выше оси валка: 1 – кристаллизатор; 2 – литниковая система; 3 – расплав; 4 – отливка; 5 – прижимной ролик; I – зона намораживания; II – зона охлаждения отливки

При литье по схеме с боковой ванной корка 4 формируется из расплава 3, который находится в металлоприемнике 2. Одной стенкой металлоприемника является валок-кристаллизатор 1, а четыре других изготовлены из теплоизоляционного материала.

При извлечении отливки в результате механического взаимодействия с расплавом происходит разрушение фронта затвердевания. В условиях непрерывного намораживания разрушившиеся кристаллы частично расплавляются перегретым расплавом и частично захватываются фронтом кристаллизации. При установившемся режиме литья объем кристаллов, разрушившихся за единицу времени, будет равен сумме дополнительно затвердевших и захваченных фронтом кристаллизации. Поэтому явление механического разрушения фронта затвердевания не будет влиять на скорость роста корки.

Для создания технологической установки и оборудования процесса намораживания необходимо определить режим литья и параметры оборудования, обеспечивающие заданную толщину отливки к моменту извлечения из расплава. Предварительную оценку влияния интенсивности теплообмена, величины перегрева расплава на кинетику затвердевания отливки можно осуществить, используя уравнение теплового баланса, выражающее количество теплоты, отданное с участка поверхности отливки площадью  $F_1$  за время  $dt$  и полученное участком поверхности кристаллизатора площадью  $F_2$  за то же время:

$$dQ = dQ_{2акк} + dQ_{охл} = dQ_{кр} + dQ_{1акк} + dQ_{пер}, \quad (1)$$

где  $dQ$  – количество теплоты, полученной кристаллизатором через поверхность  $F_2$ ;  $dQ_{2акк}$  – количество теплоты, аккумулированной стенкой валка;  $dQ_{охл}$  – количество теплоты, переданной охлаждающей жидкости с внутренней поверхности валка площадью  $F_3$ ;  $dQ_{кр}$  – теплота кристаллизации отливки, переданная через поверхность  $F_1$ ;  $dQ_{1акк}$  – теплота, выделившаяся из корки вследствие понижения ее температуры;  $dQ_{пер}$  – теплота перегрева, переданная через поверхность  $F_1$ .

При намораживании корки малой толщины на кристаллизаторе, толщина стенки которого на порядок больше толщины отливки, а диаметр валка больше в десятки раз, можно считать, что за время нахождения в ванне с расплавом кристаллизатор не успевает прогреться на всю толщину. Все тепло, переданное от отливки, аккумулируется стенкой валка. Так как алюминий и цинк обладают достаточно высокой теплопроводностью, то теплоаккумулирующая способность корки будет мала и можно пренебречь величиной  $dQ_{1акк}$ . Тогда уравнение (1) примет вид

$$dQ = dQ_{2акк} = dQ_{кр} + dQ_{пер}. \quad (2)$$

Кроме того, можно принять, что передача тепла вдоль отливки и стенки валка отсутствует, все тепло передается по нормали к их поверхностям. Будем считать, что коэффициент контактного теплообмена между коркой и стенкой кристаллизатора  $\alpha_1$  равен термической проводимости зазора между ними и в процессе затвердевания в ванне не изменяется ( $\alpha_1 = \text{const}$ ). Так как температура поверхности отливки мало отличается от температуры кристаллизации металла, можно принять, что кристаллизатор прогревается средой с постоянной температурой, равной  $T_{кр}$ . Примем также, что температура в стенке кристаллизатора перед входом в ванну равна  $T_в$ .

При установившемся режиме литья температурное поле ванны с расплавом будет неизменным. Теплообмен между жидким металлом и коркой будет проходить при постоянном коэффициенте конвективного теплообмена  $\alpha_ж = \text{const}$ .

При принятых допущениях, задавшись параболическим распределением температуры в стенке вала, при условии небольшой глубины его прогрева получим

$$dQ = \frac{\alpha_1(T_{кр} - T_b)dt}{1 + \frac{\alpha_1}{\lambda n} \sqrt{n(n+1)at}} F_1, \quad (3)$$

$$dQ_{кр} = \rho L F_1 d\xi, \quad (4)$$

$$dQ_{пер} = \alpha_{ж}(T_{зал} - T_{кр})F_1 dt, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала кристаллизатора;  $a$  – коэффициент его температуропроводности;  $n$  – показатель параболы;  $t$  – время намораживания;  $\rho$  – плотность корки вблизи температуры кристаллизации;  $L$  – удельная скрытая теплота кристаллизации металла;  $\xi$  – толщина корки, затвердевающей на валке;  $T_{зал}$  – температура заливаемого расплава.

Подставив выражения (3)–(5) в уравнение (2) и проинтегрировав его, можно получить формулу для расчета толщины корки в любой момент времени, которую в первом приближении удобно использовать для анализа кинетики затвердевания отливки и определения условий намораживания в перегретом расплаве.

Толщину корки  $\xi_b$ , затвердевшей на валке за время нахождения в ванне  $t_b$ , можно определить по формуле:

$$\xi_b = \frac{n\lambda t_b (T_{кр} - T_b)}{\rho L_{эф} \left( \sqrt{n(n+1)at_b} + \frac{n\lambda}{\alpha_1} \right)}, \quad (6)$$

где  $L_{эф}$  – эффективная теплота кристаллизации металла, включающая теплоту перегрева.

Существенное влияние на процесс формирования отливки при литье намораживанием оказывает явление наноса [6]. Сущность явления состоит в том, что в результате действия поверхностных и гидродинамических сил на поверхности твердой подложки при ее извлечении остается слой смачивающей жидкости определенной толщины. При литье намораживанием после извлечения отливки из ванны происходит затвердевание наносного слоя. Поэтому толщина отливки в зоне охлаждения  $II$  (рис. 1) будет складываться из толщины корки  $\xi_b$ , затвердевшей в ванне с расплавом, и толщины наносного слоя  $\xi_{нн}$ , которую можно определить по формуле:

$$\xi_{нн} = \frac{0,94(\eta W)^{2/3}}{\sqrt{1 - \cos(180^\circ - \varphi_c)} (\rho_1 g)^{1/2} \sigma^{1/6}}, \quad (7)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости расплава;  $W$  – скорость литья.

При литье намораживанием на вращающемся валке-кристаллизаторе затвердевшая корка удаляется со значительной скоростью под некоторым

углом  $\varphi_c$  к свободной поверхности ванны (рис. 2). В этих условиях на процесс формирования отливки существенное влияние оказывают силы поверхностного натяжения. В результате их действия в зоне выхода корки из расплава, а также между кристаллизатором и нижней стенкой металлоприемника, образуются мениски. Верхний мениск образуется в результате смачивания расплавом корки, которая играет роль подложки. От размеров менисков зависит протяженность зоны формирования отливки из расплава, от высоты верхнего мениска – еще и величина сил, действующих на корку при выходе из ванны.

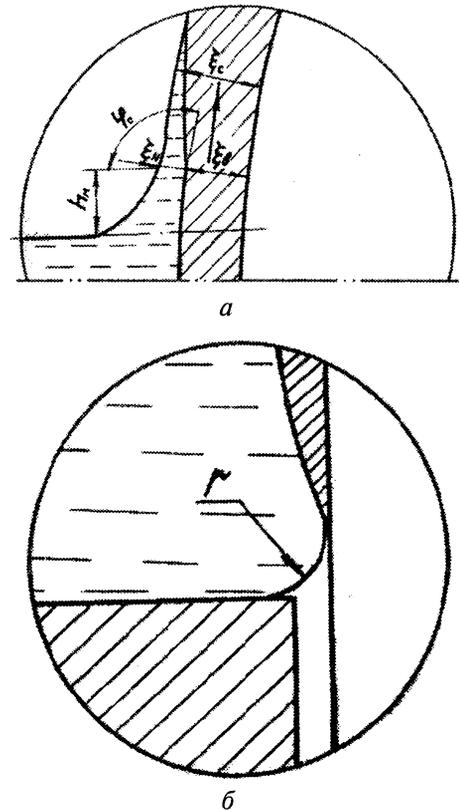


Рис. 2. Схема формирования корки при непрерывном намораживании на вращающемся кристаллизаторе: *a* – верхний мениск; *b* – нижний мениск;  $h_m$  – высота мениска;  $\varphi_c$  – угол наклона стенки;  $\xi_b$  – толщина корки на валке;  $\xi_{нн}$  – толщина наносного слоя;  $\xi_c$  – суммарная толщина отливки;  $r$  – радиус нижнего мениска

Формула для расчета высоты верхнего мениска у стенки, которая наклонена под углом  $\varphi_c$  к горизонту, имеет вид

$$h_m = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho_1 g}} \sqrt{1 - \cos(\varphi_c - \theta)}, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения расплава на границе раздела с воздухом;  $\rho_1$  – плотность расплава;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\theta$  – краевой угол смачивания корки расплавом.

Для реальных условий намораживания можно считать, что имеет место абсолютное смачивание

корки расплавом ( $\theta=0$ ). Величина силы  $P$ , которая действует на корку при выходе из расплава и стремится оторвать отливку от кристаллизатора, зависит от высоты мениска и определяется по формуле:

$$P = \frac{\rho_l g b h_m^2}{2}, \quad (9)$$

где  $b$  – ширина отливки.

Результаты расчетов показали, что высота верхнего мениска должна учитываться при определении протяженности зоны намораживания, а размером нижнего мениска можно пренебречь. Требования к величине зазора между валком и металлоприемником достаточно жесткие. Сила  $P$  для алюминия и цинка весьма значительна, принимая во внимание малую жесткость отливки и низкую прочность этих металлов вблизи температуры кристаллизации.

Как показали результаты экспериментально-теоретических исследований по намораживанию свинца, цинка и алюминия [7], характер теплообмена для всех металлов совпадает и в значительной степени зависит от шероховатости рабочей поверхности кристаллизатора, чистоты расплава и наличия модификаторов.

Интенсивность и характер теплообмена, а также характер роста корки для гладкого и шероховатого кристаллизаторов различны. Так, при намораживании алюминия высокой чистоты на гладком кристаллизаторе коэффициент контактного теплообмена резко возрастает в начальный момент до значений 18–20 кВт/(м<sup>2</sup>·К), а затем уменьшается почти в 2 раза и далее изменяется незначительно. При намораживании на дробеструйном кристаллизаторе такого скачка величины  $\alpha_1$  не происходит и корка растет равномерно. Ввод модификатора в алюминий высокой чистоты мало влияет на процесс теплообмена и рост корки. Однако при намораживании цинка с 0,1% Mg скорость роста корки возрастает примерно на 30–40%. Кроме того, результаты исследований показали, что изменение коэффициента конвективного теплообмена между коркой и расплавом в ванне практически не оказывает влияния на интенсивность контактного теплообмена между коркой и рабочей поверхностью кристаллизатора, хотя толщина корки меняется существенно. Это является следствием незначительной толщины формирующейся отливки.

Очевидно, что сделанные в формуле (3) допущения о постоянстве  $\alpha_1$ , а также о параболическом распределении температуры в стенке валка не отражают реальной картины теплообмена и являются достаточно грубыми. Поэтому выражения (2)–(5) использовали для предварительной оценки кинетики формирования отливки.

Учитывая указанные особенности формирования металлических лент, разработана математическая

модель процессов теплообмена и затвердевания при литье намораживанием на валке в зоне I.

Уравнение теплопроводности для жидкой фазы, корки и валка с учетом квазистационарности процесса литья имеет общий вид

$$\omega \rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} = \frac{\lambda_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right), \quad (10)$$

где  $i=1, 2, 3$  – индексы расчетных областей относятся соответственно к жидкой фазе, корке и валку;  $\omega$  – угловая скорость вращения валков;  $\rho_i, c_i, \lambda_i$  – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность;  $T_i$  – температурные поля;  $\varphi(\tau)$  – угловая координата;  $r$  – радиальная координата (см. рис. 1).

Начальные условия

$$T_1|_{\varphi=0} = T_{\text{зал}}, \quad T_2|_{\varphi=0} = T_{\text{зал}}, \quad T_3|_{\varphi=0} = T_{\text{в}}. \quad (11)$$

Граничные условия

$$\frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R+b_0} = 0, \quad T_1 \Big|_{r=R+\xi} = T_2 \Big|_{r=R+\xi} = T_k, \quad (12)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 (T_2 - T_3) \Big|_{r=R}, \quad (13)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 (T_2 - T_3) \Big|_{r=R},$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \alpha_2 (T_3 - T_{\text{вс}}) \Big|_{r=R_0}. \quad (14)$$

Дифференциальное уравнение затвердевания отливки в ванне с расплавом в форме Стефана

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R+\xi} + \omega \rho_2 L \frac{d\xi}{d\varphi} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R+\xi}, \quad (15)$$

где  $b_0$  – ширина ванны с расплавом у валка (см. рис. 1);  $R$  – внешний радиус валка-кристаллизатора;  $R_0$  – внутренний радиус валка;  $\alpha_2$  – коэффициент конвективного теплообмена на водоохлаждаемой поверхности валка;  $T_{\text{вс}}$  – температура воды.

Решение задачи (10)–(15) осуществлялось для зоны намораживания, длина которой была увеличена на высоту мениска  $h_m$  (см. формулу (8)). Математическая модель адаптирована к условиям реального процесса литья алюминия, цинка и свинца по толщине корки, сформировавшейся в зоне I, с учетом толщины наносного слоя  $\xi_n$  (см. формулу (7)), и температуре рабочей поверхности валка-кристаллизатора на основе идентификации параметра  $\alpha_1$ . Параметрическая идентификация осуществлялась путем минимизации функционала методом наименьших квадратов:

$$K_1 = \left( \frac{\xi_p(\alpha_1) - (\xi_3 - \xi_n)}{\xi_3 - \xi_n} \right)^2 + \sum_{i=1}^N \left( \frac{\tilde{T}_{3,i} - T_{3p,i}(\alpha_1)}{Y_{3,i}} \right)^2, \quad (16)$$

где  $N$  – количество измерений температуры рабочей поверхности валка  $\tilde{T}_3$ ;  $T_{3p}$  – расчетные

значения температур рабочей поверхности валка;  $\xi_p$ ,  $\xi_s$  — расчетные и экспериментальные толщины корок.

На рис. 3 показаны результаты адаптации математической модели для условий намораживания цинка со скоростью 6 м/мин на стальном валке-кристаллизаторе, охлаждаемом водой с интенсивностью, соответствующей  $\alpha_2=10000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [7]. Экспериментально измеренная толщина отливки, сформировавшейся в зоне I,  $\xi_s=2,7$  мм, а расчетное значение  $\xi_p=2,493$  мм, т.е. разница составила чуть более 7%. Максимальное расхождение по температуре рабочей поверхности валка-кристаллизатора в точке измерения составило менее 2%. Полученные результаты говорят о высокой степени адекватности математической модели.

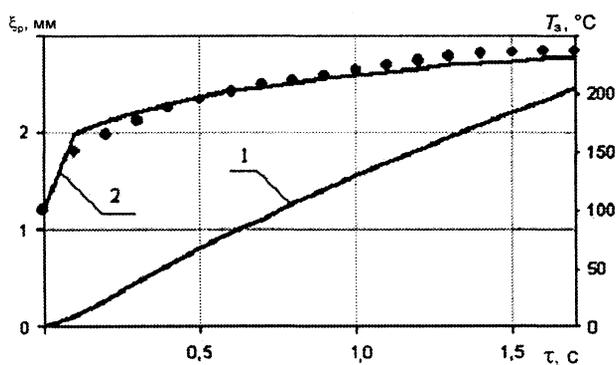


Рис. 3. Результаты адаптации математической модели: 1 —  $\xi_p$ ; 2 —  $T_{sp}$ ; точки —  $\tilde{T}_3$

В результате экспериментальных и численных исследований определили средние значения адаптивного параметра — коэффициента контактного

теплообмена  $\alpha_1$  для условий литья технически чистых алюминия, цинка и свинца. При намораживании на валке-кристаллизаторе алюминия со скоростями от 3 до 6 м/мин среднее значение  $\alpha_1 \approx 4000-4500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), цинка  $\alpha_1 \approx 7500-8300$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), свинца  $\alpha_1 \approx 2500-2800$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили выявить особенности формирования металлических лент при литье намораживанием на валке, определить характер и интенсивность теплообмена растущей корки с расплавом и стенкой валка, оценить степень влияния поверхностных и гидродинамических явлений на кинетику формирования отливки. Результаты исследований легли в основу создания технологической установки и оборудования для получения алюминиевых лент и цинковых полос.

### Литература

1. Захаревич Н.И., Майзин А.Я., Софинский П.И. Непрерывное литье металлов в движущиеся формы. М., 1966.
2. Германн Э. Непрерывное литье. М.: Metallurgizdat, 1961.
3. Шварцмайер В. Непрерывная разливка. М.: Metallurgizdat, 1961.
4. Баландин Г.Ф. Литье намораживанием. М.: Metallurgizdat, 1962.
5. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М.: Наука, 1966.
6. Дерягин Б.Ф., Леви С.М. Физико-химия нанесения тонких слоев на движущуюся подложку. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
7. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.