



The results of experimental and theoretical investigations of leaded tape forming at continuous casting in roll crystallizer with flanges are presented. The monogram for determination of optimum casting speed is built.

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, В. А. ПУМПУР, В. М. ИЛЬЮШЕНКО, П. Ю. ДУВАЛОВ, ИТМ НАН Беларуси

УДК 621.74:517.977

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СВИНЦОВЫХ ЛЕНТ СПОСОБОМ БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ

Идея получения листа путем непрерывной подачи расплава в горизонтально расположенные валки прокатного стана была предложена Г. Бессемером еще в 1846 г. [1]. Для того чтобы расплав не вытекал из валков, на них предусматриваются торцовые ограничители – реборды. Тем не менее, этот метод непрерывного литья не нашел практического применения из-за присущих ему недостатков [2]. В первую очередь потому, что расплав затвердевает не только на поверхностях валков, но и на ребордах. Вследствие этого условия прокатки неодинаковы, лист формируется с гофрами и трещинами на краях. Для получения отливки без гофр необходимо обеспечить одинаковые условия ее формирования по всей ширине валка.

Условия формирования лент в валковом кристаллизаторе классифицируются по признаку наличия или отсутствия деформации затвердевшего металла валками. При наличии деформации имеет место бесслитковая прокатка формирующейся ленты. В этом случае теплообмен рассматривается

в двух зонах, а именно, в бездеформационной зоне затвердевания отливки и в зоне обжатия, где происходит ее охлаждение [2, 3]. Как показали результаты многолетних исследований, бесслитковая прокатка – наиболее эффективный и высокопроизводительный способ получения лент, в частности алюминиевых [3, 4].

Цель проводимых исследований заключалась в разработке машины непрерывного литья свинцовых лент в валковый кристаллизатор способом бесслитковой прокатки. Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- экспериментально-теоретические исследования теплообмена при бесслитковой прокатке лент на основе математического моделирования;
- определение оптимальных параметров литейной машины и режимов литья лент различной толщины.

Характерной особенностью формирования отливки при литье в валковый кристаллизатор является то, что в одном агрегате одновременно происходит затвердевание расплава и обжатие (прокатка) затвердевших корочек валками. На рис. 1 показана схема литья ленты в валковом кристаллизаторе.

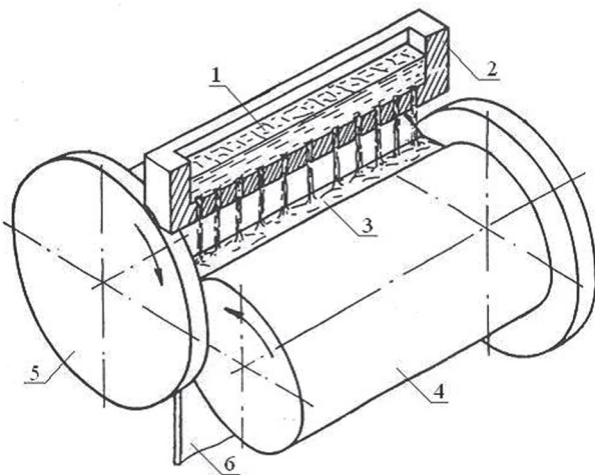


Рис. 1. Схема непрерывного литья ленты в валковый кристаллизатор с ребордами: 1 – расплав; 2 – распределитель расплава; 3 – ванна; 4 – бочка валка; 5 – реборда; 6 – лента

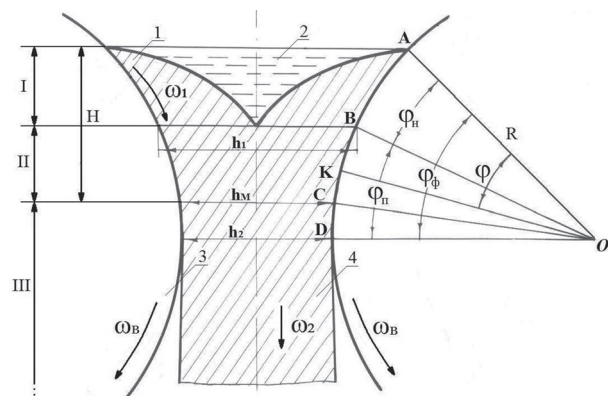


Рис. 2. Схема к расчету температурного поля отливки: 1 – отливка; 2 – расплав; 3 – валок-кристаллизатор; 4 – лента

В зоне I (рис. 2) происходит намораживание корочек на поверхностях кристаллизатора в результате теплового взаимодействия с расплавом. Скорость роста корочек и протяженность зоны I определяются условиями теплообмена корочки с валком и жидким расплавом, а также теплофизическими характеристиками материала отливки и кристаллизатора. В зоне намораживания рабочие поверхности валков движутся с большей скоростью, чем корочки ($\omega_b > \omega_1$), т. е. происходит отставание корочек. Так как объем металла, проходящего через любое поперечное сечение в зеве валков, сохраняется постоянным, а суммарная толщина намерзших корочек h_1 больше, чем толщина ленты h_2 , то скорость ω_1 движения корочки меньше скорости выхода ленты из валков. Наличие скольжения корочек по поверхности валков приводит к возникновению специфических условий процесса теплообмена между ними, которые не встречаются в других видах литья.

В зоне II корочки обжимаются (прокатываются) валками и одновременно охлаждаются. В результате обжатия происходит изменение структуры литого металла и формирование свойств готового изделия. В точке C (рис. 2) скорость движения отливки ω_2 и валков ω_b одинаковы. Условия теплообмена в зоне II зависят от теплофизических характеристик материалов отливки и валка, характера обработки и состояния рабочей поверхности кристаллизатора, относительного обжатия корочек и механических характеристик прокатываемого материала, которые непрерывно меняются в результате охлаждения. На участке CD силы трения между заготовкой и валками препятствуют ее выходу, поверхность отливки движется быстрее поверхности валков, т. е. происходит обжатие валками отливки с опережением. Следовательно, вдоль всей дуги соприкосновения металла с валками (кроме нейтральной точки C) происходит скольжение поверхности отливки по валкам. Протяженность зоны отставания I и зоны опережения II зависит от свойств материала отливки, ее температуры, состояния поверхности кристаллизаторов и степени обжатия заготовки валками.

Таким образом, физическая картина формирования отливки в валковом кристаллизаторе является достаточно сложной, так как затвердевшая корочка в зоне намораживания и заготовка в зоне прокатки движутся с различными скоростями относительно поверхности валка, а давление в зоне деформации распределено неодинаково и достигает больших величин.

При выходе валка на квазистационарный режим работы изменяется его диаметр в соответ-

ствии с изменением его температурного поля, а, следовательно, и зазор между валками, определяющий толщину отливки. Для получения лент хорошего качества и стабильной толщины необходимо обеспечить одинаковые условия формирования отливки по ширине в течение всего технологического цикла, а, значит, наилучшие условия охлаждения валков-кристаллизаторов на внутренней поверхности.

В ИТМ НАН Беларуси разработан усовершенствованный способ непрерывного литья лент в валковый кристаллизатор с ребордами и подачей расплава струями в зев валков из распределителя (рис. 2). Литье осуществляется в стальные валки. Чтобы обеспечить равномерное формирование отливки по всей длине валков, предложено часть перегретого расплава подавать на поверхность ванны непосредственно к ребордам [5], и таким образом расплавить затвердевающие на них корочки. Доля этого расплава от общего количества, подаваемого в кристаллизатор, составляет:

$$\frac{M_p}{M} = \frac{F_p}{F_b + F_p} \left(1 + \frac{L}{c_1 \Delta T_{\text{пер}}} \right), \quad (1)$$

где M и M_p – массы расплава, подаваемые в единицу времени в кристаллизатор и непосредственно к ребордам в том числе; F_b и F_p – площадь теплового контакта, затвердевающего в зеве валков расплава с поверхностями валков и реборд соответственно; L и c_1 – соответственно удельная теплота кристаллизации и удельная теплоемкость жидкого расплава; $\Delta T_{\text{пер}}$ – температура перегрева заливаемого в валки расплава.

Проведены исследования по восстановлению температуры поверхности валка и плотности теплового потока на его поверхности $q(t)$ на основе измерения температуры на глубине 1 мм от поверхности валка и решения обратной задачи теплопроводности. Это позволило рассчитать коэффициент теплообмена $\alpha(t)$ между отливкой и валком по известной формуле [6]:

$$\alpha(t) = \frac{q(t)}{T_{n1}(t) - T_{n2}(t)}, \quad (2)$$

где $T_{n1}(t)$ – температура контактирующей поверхности отливки; $T_{n2}(t)$ – температура поверхности валка.

Температурное поле отливки определяли на основе математического моделирования. В качестве граничного условия использовали значения $q(t)$, т. е. принимались граничные условия второго рода. Кроме того, были приняты следующие допущения: теплофизические характеристики материала

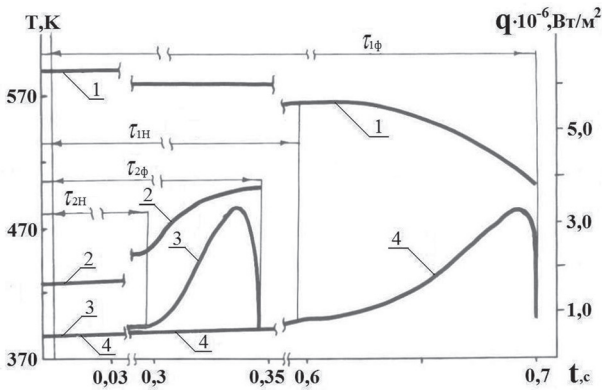


Рис. 3. Изменение во времени величин удельных тепловых потоков и температур поверхности для вала и отливки: 1 – температура поверхности отливки; 2 – температура поверхности вала; 3, 4 – удельный тепловой поток на поверхности вала и отливки

ла отливки постоянны; интервал кристаллизации отсутствует; учет теплоты перегрева осуществлялся путем введения эффективной теплоты кристаллизации; выделение тепла при прокатке в очаге деформации происходит равномерно во всем объеме и равно работе, затрачиваемой на прокатку. На рис. 3 приведены результаты расчетов изменения во времени величины удельного теплового потока на поверхности отливки $q(t)$ (кривая 4). Для сравнения построены зависимости изменения температуры поверхности вала и величины удельного теплового потока за время нахождения в зоне формирования отливки (кривые 2 и 3).

Используя зависимости $T_{n1}(\varphi)$, $T_n(\varphi)$ и $q(\varphi)$ (рис. 4, кривые 1–3), величину $\alpha(\varphi)$ определяли по формуле (2). Кривая 4 характеризует изменение коэффициента теплообмена между отливкой и валком.

Экспериментально установлено, что при получении лент одинаковой толщины (рис. 5) интенсивность нагрева вала зависит от его скорости ω_v . Количество тепла, которое поглощается единицей рабочей поверхности кристаллизатора в двух зонах формирования ленты $Q^s(t)$, также зависит от скорости литья (рис. 5). Нагрев вала в зоне намораживания при малых скоростях литья происходит значительно медленнее, чем при высоких. Характер кривых на рис. 5, а указывает на то, что при литье свинцовой ленты толщиной 0,8 мм существует примерно линейная зависимость между скоростью валков и скоростью их нагрева в зоне намораживания.

Суммарное количество тепла, полученное валком в зоне формирования отливок одинаковой толщины, для различных скоростей литья неодинаково и увеличивается с уменьшением ω_v . Это различие объясняется тем, что с уменьшением скорости вращения валков возрастает величина опережения,

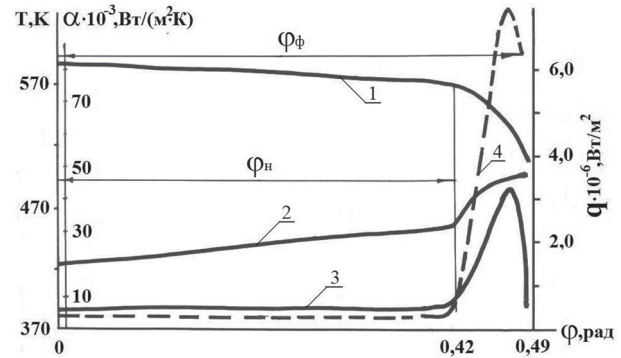


Рис. 4. Определение зависимости $\alpha=\alpha(\varphi)$: 1 – температура поверхности отливки; 2 – температура поверхности вала; 3 – удельный тепловой поток $q(\varphi)$; 4 – коэффициент теплообмена отливки с валком

увеличивается количество тепла, выделившееся в результате деформации, а отливка охлаждается до более низких температур.

Анализ кривых изменений величин удельных потоков на рабочей поверхности вала (рис. 6) показывает, что интенсивность теплообмена в зоне намораживания при малых скоростях литья ниже, чем при более высоких. Следует отметить, что при высоких скоростях литья, когда обжатие невелико за время намораживания, интенсивность нагрева падает в 2,0–2,5 раза (рис. 6, кривые 1, 2), при малых скоростях (рис. 6, кривая 3) – не более чем в 1,5 раза. Снижение интенсивности в значительной мере происходит из-за возрастания термического сопротивления на границе отливка – валок, образования складок и трещин на рабочей поверхности отливки в зоне намораживания, а также коробления корочек. При больших скоростях литья скорости движения корочек и вала отличаются в меньшей степени, чем при более низких ω_v . При высоких скоростях литья температура расплава в ванне значительно выше, чем при низких. В результате в первом случае может иметь место более длитель-

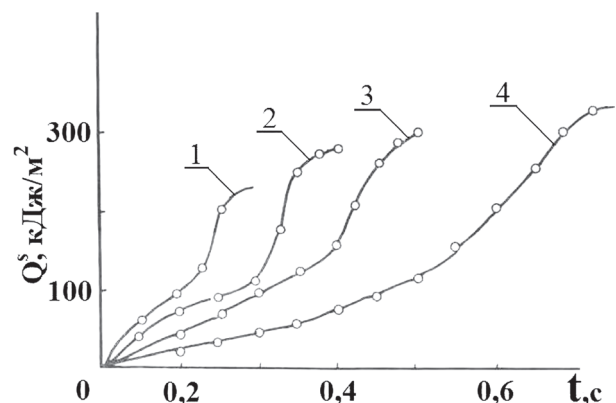


Рис. 5. Влияние скорости вращения валков на процесс их нагрева: 1 – $\omega_v = 16,4$ м/мин; 2 – 10,2; 3 – 6,8; 4 – 3,5 м/мин; толщина ленты 0,8 мм

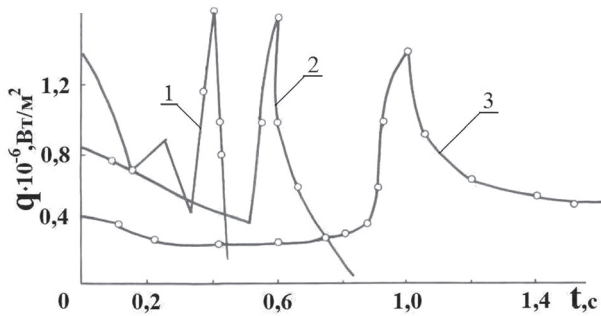


Рис. 6. Изменение величины удельного потока на рабочей поверхности кристаллизатора в зависимости от скорости вращения валков: 1 – $\omega_b = 6,18$ м/мин; 2 – 3,72; 3 – 1,92 м/мин; толщина ленты 1,6 мм

ный непосредственный контакт жидкого металла с поверхностью кристаллизатора, чем во втором. Это также сказывается на характере формирования поверхности.

Зоны обжатия характеризуются резким подъемом температуры на поверхности кристаллизатора, увеличением скорости изменения $Q^s(t)$ и $q(t)$, а затем быстрым уменьшением значений этих величин. Это объясняется хорошим тепловым контактом в зоне деформации металла, что ведет к резкому снижению термического сопротивления между отливкой и формой. Выделяющаяся в процессе обжатия теплота деформации не может компенсировать быстрый теплоотвод в валки, температура отливки снижается, интенсивность теплоотвода падает. При меньших скоростях литья охлаждение занимает больше времени. Предельные значения величин удельных тепловых потоков составляют $(1,5-3,0) \cdot 10^6$ Вт/м² и мало зависят от скорости литья и толщины отливки.

Исследовано влияние начальной температуры кристаллизатора и температуры заливки расплава на интенсивность нагрева валкового кристаллизатора. Полученные результаты позволили установить физическую картину процесса теплообмена при формировании отливки, определить параметры теплообмена, разработать обобщенную математическую модель затвердевания и охлаждения отливки для случая теплообмена с валком при граничных условиях третьего рода. В зонах намораживания и обжатия принимались средние значения коэффициентов контактного теплообмена α_{cp} . В частности, для случая получения свинцовой ленты толщиной 1,6 мм в валки диаметром 200 мм с величиной обжатия 32% и величиной опережения 28% в зоне намораживания $\alpha_{cp} = 5800$ Вт/(м²·К), а в зоне обжатия $\alpha_{cp} = 40000$ Вт/(м²·К).

Разработанный программный комплекс позволил провести расчеты по определению скорости литья для получения ленты с заданной величиной

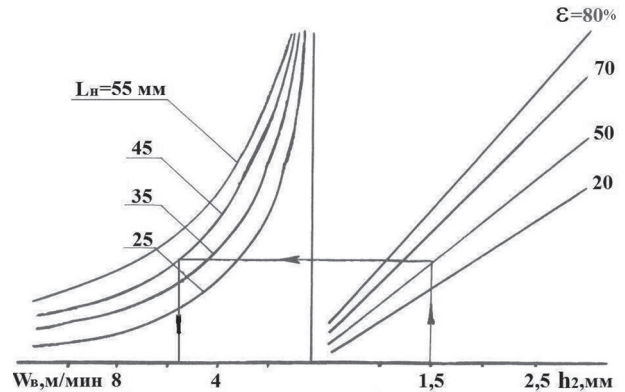


Рис. 7. Определение скорости литья свинцовой ленты по номограмме при температуре заливки 670 К и начальной температуре валков 370 К

обжатия. Проведена серия численных экспериментов, в результате которой установлена функциональная зависимость между четырьмя параметрами процесса $F(h_2, \varepsilon, L_n, \omega_b) = 0$, представленная в виде номограммы (рис. 7), где L_n – длина зоны намораживания; h_2 – толщина ленты на выходе из валков. Задавшись значением h_2 (например, $h_2 = 1,5$ мм) и обжатием ($\varepsilon = 50\%$), выбрав длину зоны намораживания ($L_n = 45$ мм), можно найти оптимальную скорость вращения валков ($\omega_b = 5,7$ м/мин).

Кроме того, была изучена динамика изменения температурного поля валка в процессе его работы, что дало возможность проследить за тем, как меняется размер валка, вызванный изменением его температурного поля, по формуле [7]:

$$\Delta D = D \left(\frac{1-\mu}{E} \sigma_n - \beta T_{2n} \right), \quad (3)$$

σ_n – окружное нормальное напряжение у наружной поверхности валка; E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала валка; β – коэффициент линейного расширения материала валка; T_{2n} – температура внешней поверхности валка.

Величину σ_n можно определить по формуле [8]:

$$\sigma_n = \frac{E\beta}{1-\mu} \left(\frac{2}{R^2 - R_{вн}^2} \int_{R_{вн}}^R T r dr - T_2 \right), \quad (4)$$

где $R_{вн}$ – внутренний радиус валка.

В результате численных экспериментов с использованием обобщенной математической модели были получены конкретные зависимости изменения температуры поверхности кристаллизатора и его диаметра. На рис. 8 показаны результаты расчетов для случая литья свинцовой ленты толщиной 1 мм в стальные валки диаметром 200 мм. Как видно из рисунка при недостаточной интенсивности охлаждения валка (кривые 1, 2) тепловой режим

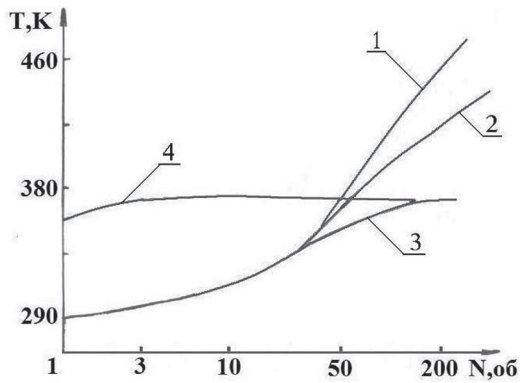


Рис. 8. Характер изменения температуры поверхности стального вала T в процессе литья: T – температура поверхности вала в конце оборота; N – число оборотов вала; $D_{\text{вн}}$ – диаметр охлаждающего канала; α_3 – коэффициент теплообмена внутренней поверхности вала с водой; 1 – $D_{\text{вн}} = 50$ мм; $\alpha_3 = 1000$ Вт/(м²·К); 2 – $D_{\text{вн}} = 90$ мм; $\alpha_3 = 1000$ Вт/(м²·К); 3, 4 – $D_{\text{вн}} = 90$ мм; $\alpha_3 = 4000$ Вт/(м²·К)

вала длительное время не стабилизируется, а его температура возрастает на значительную величину. В приведенных условиях размер вала непрерывно увеличивается, а его изменение может составить до 20–30% от толщины ленты. Увеличение интенсивности охлаждения улучшает условия термической работы кристаллизатора. Соответствующим выбором параметров системы водяного охлаждения и расхода воды можно обеспечить условия быстрого выхода на квазиустановившийся тепловой режим (кривые 3). При правильном выборе начальной температуры и интенсивности водяного охлаждения кристаллизатора обеспечивается минимальная деформация кристаллизатора. Это имеет большое практическое значение, так как

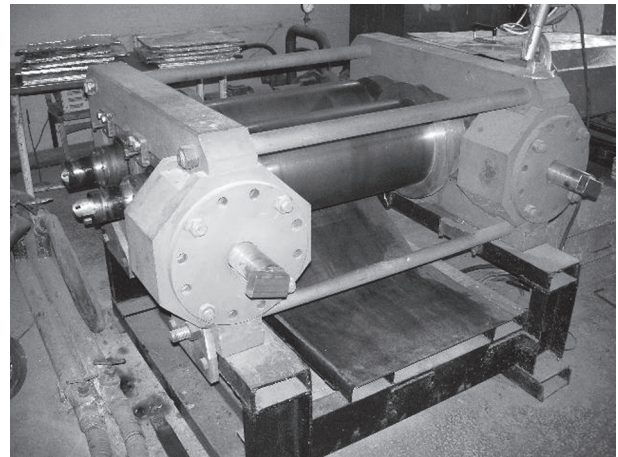


Рис. 9. Лабораторная установка беслитковой прокатки свинцовой ленты

позволяет простыми средствами обеспечить получение ленты с жесткими допусками по толщине.

В результате выполнения комплексного исследования теплообмена при формировании непрерывной плоской отливки в валковом кристаллизаторе разработана лабораторная установка непрерывного литья свинцовых лент толщиной от 1,6 до 6 мм способом беслитковой прокатки (рис. 9).

Основные данные лабораторной установки: диаметр бочек валков – 300 мм; диаметр реборд – 400 мм; длина рабочей зоны бочек валков – 650 мм; мощность привода валков – 22 кВт; электропривод валков с частотным регулированием скорости вращения 1,5–10 об/мин; мощность тепловой нагрузки на валки – 20–60 кВт; расход воды на охлаждение – 3–5 л/с.

Литература

1. Германн Э. Непрерывное литье. М.: Металлургиздат, 1961.
2. Чижиков В. В., Гуляев Б. Б., Борисов В. Г. Исследование условий теплообмена в валковом кристаллизаторе при беслитковой прокатке // Автоматизация процессов литья и обработки давлением. М.: Наука, 1979.
3. Борисов В. Г., Мареев С. Е., Зюзько И. И. Некоторые вопросы теории и практики беслитковой прокатки алюминиевой ленты // Металловедение сплавов легких металлов. М.: Наука, 1970.
4. Курочкин П. Д., Кузнецов В. С., Борисов В. Г. Затвердевание алюминиевого листа при непрерывном литье в валковый кристаллизатор // Новое в процессе горячей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971.
5. А. с. (СССР) 984649. Опубл. в Б. И., 1982. № 48. С. 40.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк. 1967.
7. Третьяков А. В., Гарбер Э. А. Расчет и исследования валков холодной прокатки. М.: Машиностроение, 1966.