



The heat interchange is examined during casting of lead strands, lead alloys and salts into roll mold by means of rolling from the molten condition and by fluid rolling. The influence of casting properties on mechanical characteristics, structure and chemical heterogeneity of strands produced by rolling from the molten condition is investigated. The parameters of the equipment for continuous casting of strands into the roll mold are given.

Э. Ф. БАРАНОВСКИЙ, ИТМ НАН Беларуси

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНТ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ В ВАЛКОВЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР С РЕБОРДАМИ

УДК 621.74.047

Идею получения листа путем непрерывной подачи расплава в горизонтально расположенные валки прокатного стана в 1846 г. предложил Г. Бессемер [1]. Для предотвращения вытекания расплава из зева валков они снабжены торцовыми ограничителями в виде реборд. Однако практического применения этот метод непрерывного литья не нашел из-за присущих ему недостатков [2]. Так как расплав затвердевает не только на поверхностях валков, но и на ребордах, то из-за неодинаковых условий прокатки лист формируется с гофрами и трещинами на краях.

В ИТМ НАН Беларуси разработан усовершенствованный способ непрерывного литья лент из легкоплавких металлов и солей в валковый кристаллизатор с ребордами и подачей расплава в зев валков из распределителя 1 струями (рис. 1).

Чтобы обеспечить равномерное по всей длине валков затвердевание, предложено [3] часть перегретого расплава подавать на поверхность ванны непосредственно к ребордам, и таким образом

расплавить затвердевающие на них корочки. Доля этого расплава от общего количества, подаваемого в кристаллизатор, составляет

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

где M и M_p — массы расплава, подаваемые в единицу времени в кристаллизатор, в том числе непосредственно к ребордам; F_b и F_p — площади теплового контакта затвердевающей в зеве валков ванны с поверхностями валков и реборд; r , c — соответственно теплота кристаллизации и теплоемкость жидкого расплава; $\Delta T_{пер}$ — температура перегрева расплава.

Усовершенствованная схема литья в валки была применена при разработке технологических процессов получения лент из свинца, свинцово-сурьмянистых сплавов, хлористого серебра и армированной ленты из сплава солей на основе хлористой меди. Литье осуществляют в стальные валки диаметрами 190 и 300 мм с ребордами диаметрами 240 и 360 мм соответственно.

При разработке технологических процессов изучены четыре схемы формирования отливок в валковом кристаллизаторе (рис. 2). Схемы рис. 2, а, б соответствуют способу бесслитковой прокатки (БП), который характеризуется тем, что затвердевшие на валках корки суммарной толщиной h_2 прокатываются в ленту толщиной h_1 . В этих условиях скорость движения корок v_k в зоне намораживания отливки Z_n меньше скорости вращения валков v_b :

$$v_k = v_b(1 - \epsilon)(1 + S), \quad (2)$$

где $\epsilon = (h_2 - h_1)/h_2$ — относительное обжатие отливки валками; $S = (v_n - v_b)/v_b$ — относительное опережение (доля превышения скорости выхода ленты над скоростью вращения валков).

Схема рис. 2, а соответствует литью чистых веществ и сплавов эвтектического состава, схема

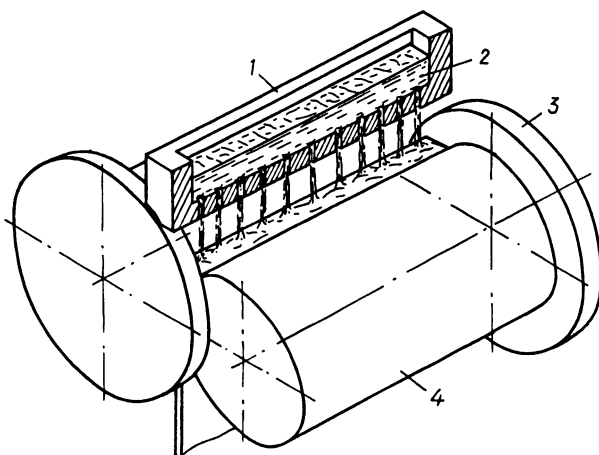


Рис. 1. Схема непрерывного литья лент в валковый кристаллизатор с ребордами: 1 — распределитель расплава; 2 — расплав; 3 — реборда; 4 — валок-кристаллизатор; 5 — лента

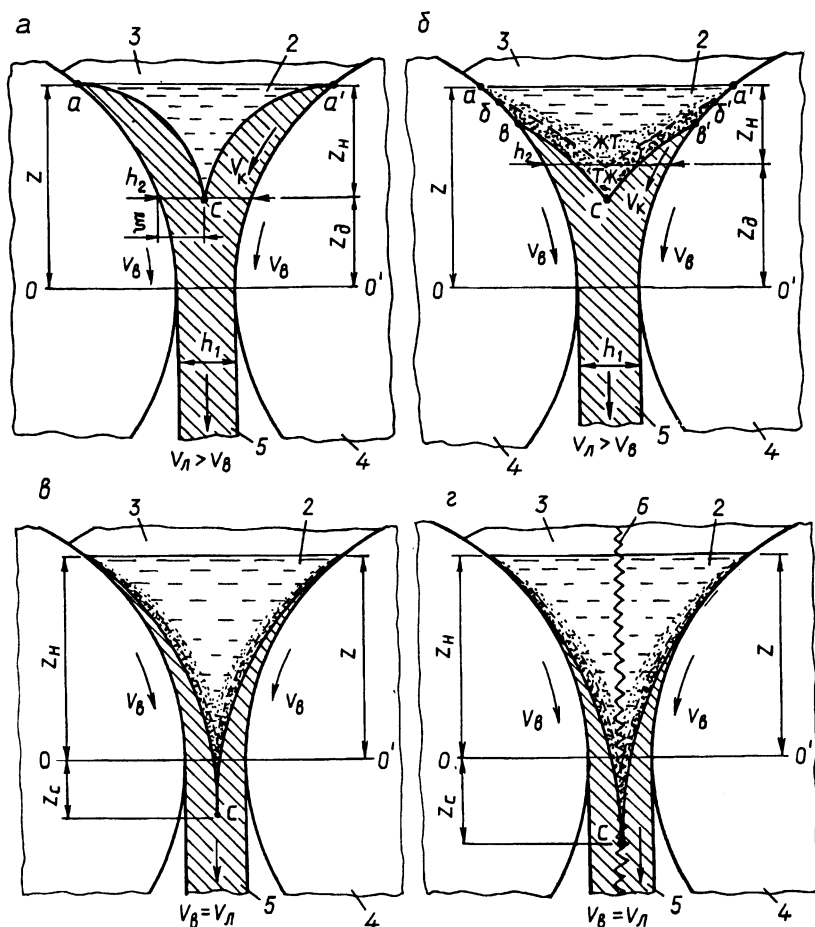


Рис. 2. Схемы формирования лент в валковом кристаллизаторе: *a* — чистых материалов и сплавов эвтектического состава по методу БП; *б* — широкоинтервальных сплавов по методу БП; *в* — узкоинтервальных сплавов по методу ЖП; *г* — армированной отливки на основе узкоинтервального сплава по методу ЖП; 1 — распределитель расплава; 2 — расплав; 3 — реборда; 4 — валок кристаллизатор; 5 — лента; 6 — армирующая сетка

рис. 2, *б* — литью широкоинтервальных сплавов, когда на участке *аб* корка находится в жидко-твердом состоянии (ЖТ), т.е. не имеет жесткого каркаса, а на участке *бв* — в твердо-жидком состоянии (ТЖ) и имеет жесткий каркас.

При формировании лент по методу жидкой прокатки (ЖП) (рис. 2, *в*, *г*) затвердевшие на валках корки не прокатываются и $v_b = v_l$. Формирование ленты в этом случае происходит в результате сваривания отливки при деформации только ее твердо-жидкой сердцевины с выдавливанием части жидкости. Наличие арматуры в зоне формирования отливки (рис. 2, *г*) не должно приводить к прокатке твердых корок и арматуры. Это обеспечивается при вдавливании армирующего материала в твердо-жидкую часть затвердевающей отливки.

При исследовании закономерностей формирования отливки по способу БП отливали ленты толщиной 0,8–2,0 мм из свинца и свинцово-сурьмянистых сплавов с содержанием сурьмы от 1 до 14 мас. %, а также ленту толщиной 0,36–0,5 мм из хлористого серебра (AgCl). По схеме ЖП разливали свинец, свинцово-сурьмянистый сплав с содержанием сурьмы 12% (эвтектика) и сплав солей на основе CuCl.

Литье по способу ЖП осуществляли при сжатии валков пружинами с усилием 15 кг на 1 см длины бочки валка, а по способу БП устанавливали с зазором, обеспечивающим прокатку на требуемую толщину h_1 . Перед началом литья кристаллизатор подогрели до температуры 90–100 °С для свинца и его сплавов и до температуры 50–60 °С для солей.

Расплав в зев валков подавали из распределительных устройств струями через круглые отверстия с соблюдением условия (1). Для свинца и свинцовых сплавов температура перегрева $\Delta T_{пер}$ составляла 60 °С, а для AgCl и CuCl — 80 °С.

При выходе на установившийся режим литья одновременно прекращали подачу расплава в валки и их вращение. После затвердевания расплава в зеву валков их разводили и извлекали клиновидную отливку (в дальнейшем "клин") вместе с куском ленты. По характеру поверхности "клина" определяли протяженности зон намораживания Z_n и обжатия Z_n (рис. 2), а также толщины ленты h_1 и отливки в зоне срастания фронтов затвердевания h_1 для расчета степени обжатия отливки валками ϵ . Находили также величину опережения при прокатке ленты S . Для лент из свинцово-

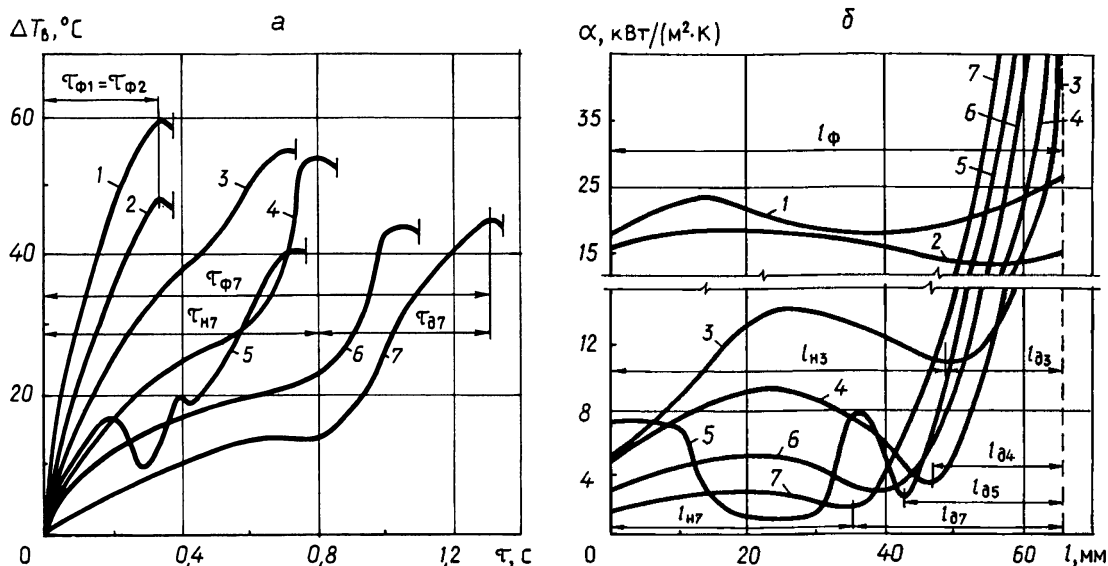


Рис. 3. Результаты изучения теплообмена в зоне формирования ленты при литье свинца и сплавов Pb—Sb: а — изменение температуры поверхности валка $\Delta T_b(\tau)$; б — интенсивность теплообмена валка с отливкой $\alpha(l)$ по дуге l : 1 — Pb+12%Sb, ЖП, $v=200$ мм/с, $h_1=2$ мм; 2 — Pb, ЖП, $v=200$ мм/с, $h_1=1,9$ мм; 3 — Pb+3%Sb, БП, $v=100$ мм/с, $h_1=2$ мм, $\epsilon=35\%$, $S=12\%$; 4 — Pb, БП, $v=83$ мм/с, $h_1=2$ мм, $\epsilon=35\%$, $S=10\%$; 5 — Pb+12%Sb, БП, $v=100$ мм/с, $h_1=1,1$ мм, $\epsilon=70\%$, $S=22\%$; 6 — Pb, БП, $v=50$ мм/с, $h_1=2$ мм, $\epsilon=52\%$, $S=16\%$; 7 — Pb, БП, $h_1=2$ мм, $v=42$ мм/с, $\epsilon=72\%$, $S=19\%$

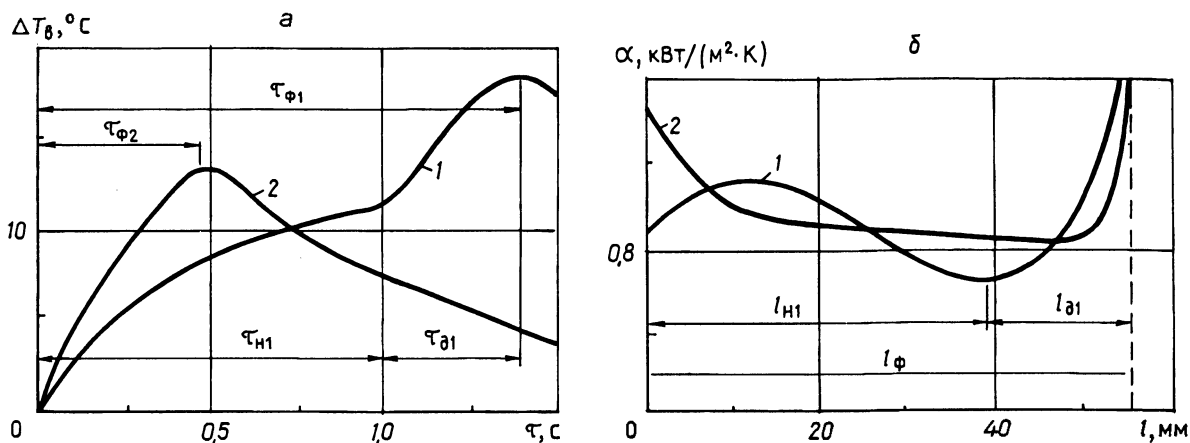


Рис. 4. Результаты изучения теплообмена в зоне формирования ленты при литье солей: а — изменение температуры поверхности валка $\Delta T_b(\tau)$; б — интенсивность теплообмена валка с отливкой $\alpha(l)$ по дуге l : 1 — AgCl, БП, $v=36$ мм/с, $h=0,4$ мм, $\epsilon=80\%$, $S=27\%$; 2 — CuCl, ЖП, $v=110$ мм/с, $h=0,5$ мм

сурьмянистых сплавов производили послойный (через 0,1 мм) химический анализ ленты на содержание сурьмы. Исследовали также механические свойства лент и их эксплуатационные характеристики. Теплообмен отливки с кристаллизатором изучали экспериментально-теоретическим методом по результатам записи на осциллографе показаний термопары в стенке валка на глубине 1 мм от его рабочей поверхности. В результате обработки экспериментальных данных путем решения на ЭВМ обратной граничной задачи теплопроводности с учетом погрешности, вносимой установкой термопары, рассчитывали температуры и удельные тепловые потоки для поверхности валка и отливки, а также коэффициенты теплообмена между ними [4, 5].

На рис. 3 приведены результаты исследований по изучению теплообмена при литье лент из свинца и его сплавов. Анализ зависимостей пока-

зывает, что нагрев валка и интенсивность его теплообмена с отливкой имеют достаточно сложный характер и зависят от способа литья, химического состава расплава и степени обжатия отливки ϵ .

Установлено, что при ЖП интенсивность теплообмена валка с затвердевающей отливкой (рис. 3, б, кривые 1 и 2) значительно выше, чем в зонах намораживания при БП. По этой причине скорость литья свинцовой ленты толщиной 2 мм при ЖП составляет 200 мм/с, а при БП—42—83 мм/с (рис. 3, кривые 4, 6, 7), причем условия теплообмена ухудшаются при увеличении степени обжатия ϵ . При БП свинцовых сплавов с содержанием сурьмы от 1 до 8,5% интенсивность теплообмена в зоне намораживания выше, чем для свинца и при 3% Sb она максимальная (рис. 3, б, кривая 3), а для эвтектики — существенно ниже, чем при литье свинца (рис. 3, б, кривая 5). Такой характер

теплообмена можно объяснить тем, что в условиях проскальзывания отливки относительно вала происходит коробление, вспучивание и даже скалывание затвердевающих корочек. Так, резкое изменение ΔT_v и α при литье эвтектики (рис. 3, кривая 5) можно объяснить скалыванием первичной корки (первый пик), а затем заполнением трещины в корке расплавом (второй пик).

При литье в валковый кристаллизатор солей (AgCl по методу БП и CuCl по методу ЖП) установлено (рис. 4), что, несмотря на более высокие, чем у свинца температуры затвердевания, теплоты кристаллизации и удельные теплоемкости, интенсивность теплообмена таких отливок с валком почти на порядок ниже, чем у свинца и его сплавов (рис. 4, б).

Для решения практических задач, можно воспользоваться средней величиной коэффициента теплообмена α_{cp} между отливкой и валком в зоне намораживания:

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{\tau_n} \int_0^{\tau_n} \alpha(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где τ_n — время прохождения термопарой зоны намораживания.

Значения α_{cp} при литье свинца и эвтектического сплава (Pb+12% Sb) по методу ЖП составляют 16 800 и 20 300 Вт/(м²·К) соответственно. Величина α_{cp} в зоне затвердевания составляет для AgCl 850 Вт/(м²·К) а для CuCl — 960 Вт/(м²·К), что почти в 20 раз меньше, чем у свинца и его сплавов при ЖП. Малую величину α_{cp} при литье солей можно объяснить тем, что поверхность таких отливок формируется волнистой с $R_a = 25-35$ мкм, тогда как у свинца и его сплавов в зоне намораживания отливки $R_a = 3,5-4,6$ мкм. Следует отметить, что в обоих случаях валок имел чистоту поверхности $R_a = 1,6-2,0$ мкм.

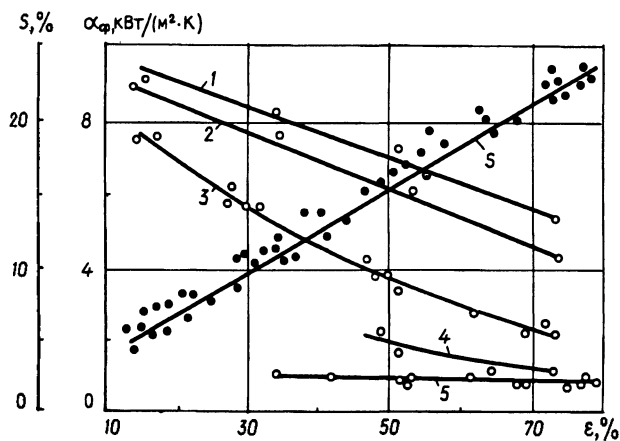


Рис. 5. Усредненные значения коэффициентов теплообмена вала с отливкой в зоне намораживания в зависимости от степени обжатия ленты ϵ при бесслитковой прокатке: 1 — Pb+3%Sb; 2 — Pb+6%Sb; 3 — Pb; 4 — Pb+13%Sb; 5 — AgCl; S — опережение при литье свинца и его сплавов с содержанием сурьмы 3 и 6%

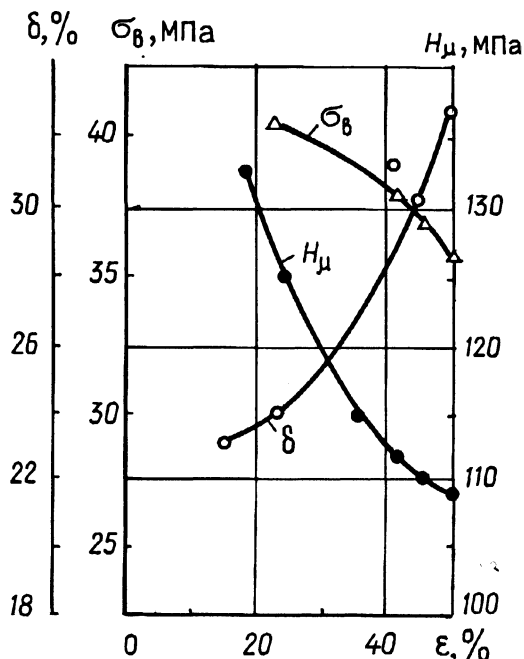


Рис. 6. Влияние параметров литья ленты толщиной 1,2 мм из сплава Pb+3%Sb на механические свойства

На рис. 5 приведены средние интегральные значения α_{cp} , полученные при литье по способу БП свинца и его сплавов, а также AgCl.

Качество лент, полученных непрерывным литьем, изучали применительно к требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления соответствующих изделий. Механические свойства лент из свинца и свинцовых аккумуляторных сплавов зависят от степени обжатия ϵ . При малых обжатиях (до 35%) ленты имеют высокую неоднородность механических свойств, а при $\epsilon = 45-50\%$ приобретают текстуру проката и практически одинаковые характеристики вдоль и поперек прокатки.

Механические свойства лент, изготовленных бесслитковой прокаткой, зависят от степени обжатия ϵ . Так, у сплава Pb+3%Sb (рис. 6) относительное удлинение δ увеличивается с ростом степени обжатия, а микротвердость H_μ уменьшается при некотором снижении предела прочности σ_v . Для лент из свинца Cl и AgCl важнейшим технологическим свойством является число перегибов n через валик диаметром 4 мм. Для AgCl необходимое по ТУ требование $n > 20$ достигается при $\epsilon > 78\%$. Для свинцовой ленты $h_1 = 2$ мм, которая используется в аккумуляторной промышленности, число перегибов по ТУ должно составлять $n > 17$, что обеспечивается при $\epsilon > 30\%$, а при $\epsilon = 50\%$ n достигает значения 28.

Органическим недостатком непрерывного литья широкоинтервальных сплавов методом БП является неоднородность химического состава по толщине ленты. Изучение содержания сурьмы по сечению ленты из сплава Pb+3%Sb (рис. 7) показывает, что химическая неоднородность определяется в основном толщиной ленты и мало зависит

Техническая характеристика машин непрерывного литья лент в валковый кристаллизатор

Метод литья и область применения ленты	Толщина ленты, мм	Ширина ленты, мм	Скорость литья, мм/с	Производительность, т/ч	Мощность электропривода, кВт	Расход воды, м ³ /ч	Габариты литейной машины, мм
БП. Свинцовые аккумуляторные сплавы. Изготовление просечных токоотводов аккумуляторов	(0,8–1,6) ±0,02	150	90–280	1,0–1,5	5,5	4–6	3000×2800×800
БП. Свинец. Детали стационарных аккумуляторных батарей	(1,8–2) ±0,05	650	60–80	3–4	12,5	12–14	3800×3200×900
БП. AgCl. Электроды ХИТ	(0,36–0,5) ±0,02	300	45–60	0,1–0,14	9,0	4–6	3200×3000×900
ЖП. CuCl армированная. Электроды водоактивируемых ХИТ	(0,5–0,6) ±0,03	425	100–120	0,3–0,4	7,5	10–12	9000×4500×900

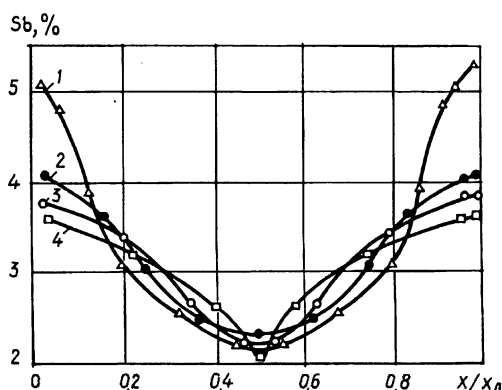


Рис. 7. Химическая неоднородность по толщине лент из сплава Pb+3%Sb: 1 — $X_n=2$ мм, $\epsilon=35\%$; 2 — $X_n=1,2$ мм, $\epsilon=72\%$; 3 — $X_n=1,2$ мм, $\epsilon=35\%$; 4 — $X_n=0,8$ мм, $\epsilon=35\%$

от степени ее обжатия ϵ . Так, химическая неоднородность ленты толщиной 1,2 мм, которая получена с обжатием 73% (рис. 7, кривая 2), мало отличается от ленты, полученной с обжатием 35% (рис. 7, кривая 3). Для лент толщиной 0,8 и 2,0 мм, полученных при одинаковых степенях обжатия (35%), содержание сурьмы в центре и на поверхности ленты отличается соответственно на 1,6 и 2,9% при среднем содержании сурьмы в ленте всего 3%.

Следует отметить, что экспериментально установлены пределы минимальных толщин лент,

которые могут изготавливаться по методу БП в рулонах. Так, для AgCl — 0,32 мм, для свинца — 1,2 мм, а для свинцовых сплавов с содержанием сурьмы 2 — 8% — 0,7 — 0,8 мм. При литье армированной ленты на основе CuCl она устойчиво формируется в пределах толщин 0,4–0,8 мм.

По результатам исследований разработаны технологии и оборудование, основные характеристики которых приведены в таблице.

Институт технологии металлов НАН Беларуси имеет возможность осуществить TRANSFER указанных в таблице технологий и оборудования в соответствии с техническими требованиями заказчиков.

Литература

- Герман Э. Непрерывное литье. М.: Metallurgizdat, 1961.
- Металлург, 1940. №5. С. 5–17.
- Способ непрерывного литья ленты: А. с. 984649 СССР: Оpubл. в Б. И., 1982. №48. С. 40.
- Барановский Э. Ф., Ильюшенко В. М., Степаненко А. А. и др. Определение параметров непрерывного литья свинцовых сплавов в валковый кристаллизатор // Цветные металлы. 1980. № 5. С. 75–77.
- Барановский Э. Ф., Севастьянов П. В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.