



Heat exchange during continuous casting of a lead battery grid is investigated. Thermal analysis of mold design values and of melting furnace electric power of the continuous casting machine is made.

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

ТЕПЛОВЫЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ СВИНЦОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ РЕШЕТКИ

УДК 669.18.046

Потребность Республики Беларусь в свинцовых стартерных аккумуляторных батареях составляет свыше 600 тыс. шт. в год и на их закупку затрачивается свыше 30 млн у. е. Создание производства свинцовых аккумуляторов в Беларуси актуально. Дело в том, что изготовление таких батарей экономически выгодно, так как стоимость свинца в аккумуляторе составляет только 30% от его цены. Поэтому даже небольшие страны с развитым туризмом, такие, как Австрия, Швейцария и др., изготавливают свинцовые аккумуляторные батареи из привозного сырья не только для собственных нужд, но и на экспорт.

Располагая значительным опытом разработки технологии изготовления химических источников тока, ИТМ НАН Беларуси в начале 90-х годов инициировал проведение работ по технологии и оборудованию для оснащения создаваемых в республике аккумуляторных производств. Их технический уровень в основном определяется способом изготовления аккумуляторной решетки — важнейшего элемента электродной части свинцовой батареи. Поэтому при выборе

технологии изготовления аккумуляторной пластины в качестве базового принят способ получения решетки непрерывным литьем по схеме фирмы "Wirtz" (США) [1]. Такая технология нашла применение в США и Европе для получения решеток из свинцово-кальциевых и свинцово-селеновых аккумуляторных сплавов [2]. ИТМ НАН Беларуси разрабатывает оборудование и технологии непрерывного литья решеток из свинцово-сурьмянистых сплавов, так как аккумуляторные сплавы с кальцием и селеном в СНГ не производятся.

Цель настоящего исследования состояла в разработке тепловых основ непрерывного литья аккумуляторной решетки из широкоинтервальных Pb—Sb-сплавов для определения основных конструктивных параметров литейной машины.

Формирование аккумуляторной решетки при непрерывном литье

Схема получения непрерывной решетки показана на рис. 1. Расплав подают из печи центробежным насосом по трубопроводу II в кристаллизатор, состоящий из вращающегося формообразую-

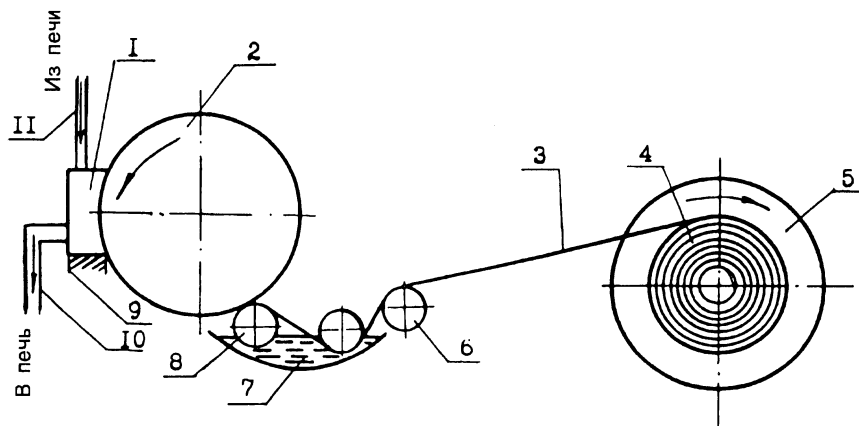


Рис. 1. Схема непрерывного литья аккумуляторной решетки: 1 — башмак-питатель; 2 — формообразующий валок; 3 — решетчатая лента; 4 — рулон; 5 — шпуля; 6 — натяжной ролик; 7 — водяная ванна; 8 — контактный ролик; 9 — опора; 10 — сливной трубопровод; 11 — подающий трубопровод

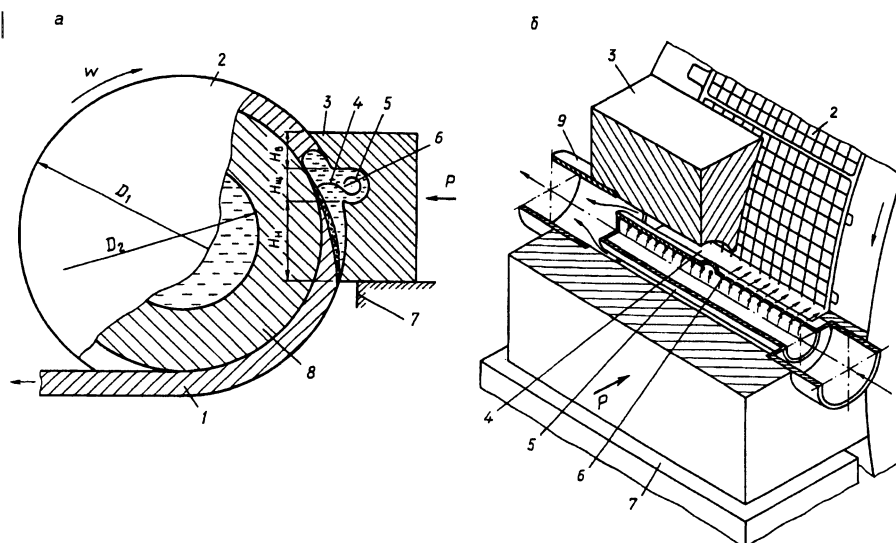


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и конструкция (б) кристаллизатора машины непрерывного литья аккумуляторной решетки: 1 — отливка; 2 — формообразующий валок; 3 — башмак-питатель; 4 — литниковый паз; 5 — литник-распределитель; 6 — литниковое отверстие; 7 — неподвижная опора; 8 — вода; 9 — сливная труба

шего валка 2 и неподвижного башмака-питателя 1. Через фронтальную щель в контактирующей с валком стенке башмака-питателя расплав заполняет рельеф решетки на валке, а его излишки по сливному трубопроводу 10 возвращаются в печь. Затвердевающая в пазах гравюры формообразующего валка решетчатая отливка движется относительно стенки башмака-питателя. После выхода из-под башмака сформировавшаяся лента 3 охлаждается в пазах валка до ее съема, а затем в ванне 7 и сворачивается в рулон 4 на шпулю 5 сматывающим устройством. При достижении рулоном установленного диаметра отливку разрезают, скорость вращения валка уменьшают и производят заправку ленты на очередную шпулю, а затем скорость литья увеличивают до рабочей величины.

Формирование решетчатой ленты происходит в кристаллизаторе, схема которого показана на рис. 2, а, а конструкция — на рис. 2, б. В башмаке-питателе 3 выполнен литниковый паз 4 с фронтальной щелью для подачи расплава к формообразующему валку. С целью обеспечения равномерной подачи расплава в литниковом пазу 4 башмака с зазором установлен питатель-распределитель 5 в виде трубы с отверстиями 6. Избыточный расплав после выхода из питателя-распределителя 5 поступает в зазор между ним и стенками литникового паза, а затем в отводящую трубу 9, по которой возвращается в котел плавильной печи. Расплав в зону формирования отливки подают под некоторым избыточным давлением. В зоне литникового паза расплав не только заполняет гравюру решетки, но и взаимодействует со свободной поверхностью формообразующего валка, в результате чего существенно охлаждается. За вычетом площади гравюры решетки эта поверхность составляет около 75% площади валка в зоне литникового паза. За пределами литникового паза башмак контактирует с сопря-

женной поверхностью валка. В зоне их контакта происходит передача тепла от затвердевающих элементов решетки в валок и башмак, а также теплообмен между элементами кристаллизатора.

Для устойчивого получения непрерывным литьем аккумуляторной решетки расплав должен поступать в кристаллизатор при постоянной температуре, отливка выходит из-под башмака затвердевшей и снимается с валка при некоторой температуре, обеспечивающей ей достаточную прочность и жесткость. Определение основных конструктивных параметров необходимой для этого литейной машины можно осуществить только по результатам исследований теплообмена решетчатой ленты и формы.

Расчет тепловой нагрузки на формообразующий валок

Величина тепловой нагрузки на валок N_v равна количеству тепла, которое поступает через его поверхность в единицу времени. При установившемся режиме литья

$$N_v = N_l + N_p + N_6, \quad (1)$$

где N_l , N_p , N_6 — тепловые потоки, которые поступают в валок соответственно в результате затвердевания и охлаждения отливки, при теплообмене перегретого расплава с гладкими участками поверхности валка в зоне литникового паза, при контактном теплообмене поверхности валка с башмаком-питателем.

Величину N_l получаем из уравнения теплового баланса затвердевания и охлаждения ленты с валком, которые перемещаются со скоростью w :

$$N_l = Mw(L_3 + c'\Delta T_{пер}) + c(T_c - T_y), \quad (2)$$

где M — масса погонного метра решетчатой ленты; L_3 — эффективная теплота кристаллизации сплава; c' и c — удельные теплоемкости материала отливки

в жидком и твердом состояниях; $\Delta T_{\text{пер}}$ — температура перегрева подаваемого в кристаллизатор расплава; T_c и T_y — соответственно температуры солидуса отливки и удаления из валака решетчатой ленты.

Величину N_p находим по формуле работы [3] для конвективного теплообмена полубесконечной стенки с перегретым расплавом:

$$N_p = 2K_1 F_{\text{щ}} \lambda_2 (T_{\text{зал}} - T_0) / (\sqrt{12a_2 \tau_{\text{щ}}} + \frac{2\lambda_2}{\alpha_{1,2}}), \quad (3)$$

где $F_{\text{щ}}$ — площадь щели в башмаке-питателе; K_1 — доля гладкой поверхности формообразующего валака в зоне его контакта со щелью башмака; λ_2 и a_2 — коэффициенты теплопроводности и температуропроводности валака; $\alpha_{1,2}$ — коэффициент теплообмена расплава с валком; $T_{\text{зал}}$ и T_0 — температуры подаваемого в кристаллизатор расплава и поверхности валака; $\tau_{\text{щ}}$ — время прохождения фиксированной точкой валака щели в башмаке.

Значение N_6 определяем из зависимости:

$$N_6 = K_2 \alpha_{2,3} F_6 (T_6 - T_b), \quad (4)$$

где $\alpha_{2,3}$ — коэффициент контактного теплообмена между валком и башмаком; F_6 — площадь контакта валака с башмаком; K_2 — доля гладкой поверхности на формообразующем валке в зоне его контакта с башмаком; T_6 и T_b — средние значения температур валака и башмака в зоне их контакта.

Оценка величины N_b выполнена для литья решетки из сплава с содержанием $\text{Sb} = 4,5\%$ для $w = 0,2-0,7$ м/с при $M = 0,490$ кг; $L_s = 38650$ Дж/кг; $\Delta T_{\text{пер}} = 100^\circ\text{C}$; $T_y = 140^\circ\text{C}$; $K_1 = 0,75$; $K_2 = 0,85$; $T_{\text{зал}} = 420^\circ\text{C}$; $T_0 = 100^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{щ}} = 0,01$ м/В; $\alpha_{1,2} = 35000$ Вт/(м²·град); $\alpha_{2,3} = 1500$ Вт/(м²·град); $F_6 = 0,02$ м; $T_6 = 220^\circ\text{C}$; $T_b = 120^\circ\text{C}$.

Значение $\alpha_{1,2}$ в зоне взаимодействия перегретого расплава с гладкой поверхностью валака принято по результатам исследований теплообмена при погружении чугуновой пластины в перегретый до 420°C свинцово-сурьмянистый сплав. В процессе погружения осуществлялась струйная подача расплава из

затопленной трубы на поверхность пластины через отверстия диаметром 6 мм с расстояния 15 мм в количестве $1,0-2,5$ кг/с. Для этих условий $\alpha_{1,2}$ составило $(29-41) \cdot 10^3$ Вт/(м²·град) в зависимости от расхода расплава. Результаты расчетов приведены на рис. 3. Их анализ показывает, что суммарная тепловая нагрузка на валок значительно зависит от скорости литья и при $w = 0,2$ м/с значение $N_b = 14,4$ кВт, а при $w = 0,7$ м/с $N_b = 31,2$ кВт.

Оценка величины захлаживания расплава в кристаллизаторе

Следует отметить, что расплав при прохождении через кристаллизатор существенно охлаждается и мощность этого охлаждения $N_3 = N_p + N_6$. При изменении скорости литья от $0,2$ до $0,7$ м/с N_3 возрастает от 9 до $11,7$ кВт (рис. 3).

Уменьшение температуры расплава в кристаллизаторе ΔT_3 можно найти по формуле:

$$\Delta T_3 = \frac{N_3}{Gc'}, \quad (5)$$

где G — расход расплава на выходе из кристаллизатора.

Так, при $G = 2$ кг/с температура расплава на выходе из кристаллизатора будет меньше, чем на входе в башмак на $34,6^\circ\text{C}$ при $w = 0,2$ м/с и на 45°C при $w = 0,7$ м/с.

Чтобы обеспечить постоянство температуры расплава в печи на протяжении всего периода литья, ее электрическую мощность необходимо выбирать с учетом возмещения теплопотерь в кристаллизаторе.

Расчет затвердевания и охлаждения аккумуляторной решетки

Формирование из расплава аккумуляторной решетки происходит в результате теплообмена отливки со стенками каналов гравюры решетки в валке, а также со стенкой башмака-питателя (см. рис. 2, а).

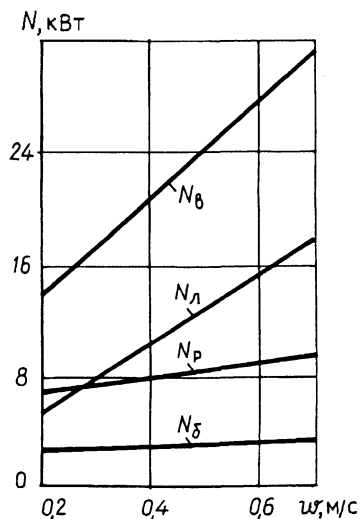


Рис. 3. Зависимость тепловой нагрузки на валок N_b и ее составляющих N_p , N_6 от скорости литья решетчатой ленты.

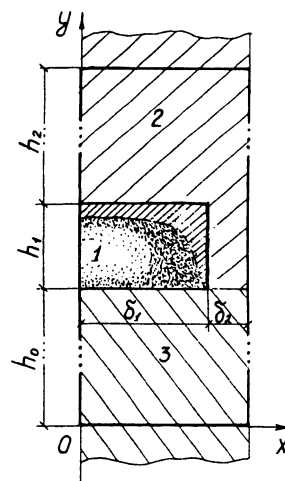


Рис. 4. Схема к расчету затвердевания элементов аккумуляторной решетки при непрерывном литье: 1 — отливка; 2 — формообразующий валок; 3 — башмак

Решение задачи затвердевания решетки с учетом ее геометрии, а также неравномерности температурного поля в валке и башмаке затруднено. Поэтому при составлении математической модели затвердевания широкоинтервального сплава и охлаждения затвердевшей отливки рассматривается теплообмен прямоугольного элемента решетки неограниченной длины с полупространствами из материала валка и башмака, а также контактных зон между ними при граничных условиях третьего рода.

Расчетная схема для составления двухмерной математической модели теплообмена при затвердевании и охлаждении элемента отливки приведена на рис. 4. Так как время затвердевания и охлаждения наиболее массивного элемента решетки не превышает 2 с, принято, что расстояния h_0 и h_2 составляют 20 и 30 мм соответственно, а $\delta_2 = 3,5$ мм (половина расстояния между соседними жилками решетки).

С учетом принятых допущений математическая модель теплообмена представлена в следующем виде:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

где $i = 1, 2, 3$ — номер расчетной области (1 — отливка; 2 — формообразующий валок; 3 — башмак); ρ, c, λ — соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность; T — температурное поле.

Начальные условия:

$$T_1 = T_{\text{зал}}, T_2 = T_{\text{в}}, T_3 = T_{\text{с}}. \quad (7)$$

Здесь $T_{\text{зал}}$ — температура заливки; $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{с}}$ — соответственно начальные температуры валка и башмака.

На поверхностях контактных областей (рис. 4) принимались граничные условия

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} = \alpha_{\kappa} (T_n - T_m), \quad \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} = \alpha_{\kappa} (T_n - T_m), \quad (8)$$

где n, m — номера соответствующих расчетных областей; α_{κ} — коэффициент контактного теплообмена, который для отливки с валком соответствует $\alpha_{1,2}$, отливки с башмаком — $\alpha_{1,3}$ и валка с башмаком — $\alpha_{2,3}$. Значения этих коэффициентов изменяются на каждом этапе формирования отливки.

На оси симметрии отливки

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right| = 0, \quad \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right| = 0, \quad \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right| = 0. \quad (9)$$

На расстоянии $\delta_2 = 3,5$ мм принимаем

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=\delta_1+\delta_2} = 0. \quad (10)$$

На глубине $h_2 = 30$ мм

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial y} \right|_{y=h_0+h_1+h_2} = 0. \quad (11)$$

На глубине $h_0 = 20$ мм

$$\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial y} \right|_{y=h_0} = 0. \quad (12)$$

При охлаждении отливки после выхода ее из-под башмака происходит теплообмен ее свободной поверхности с воздухом и граничные условия для областей 1 и 2 имеют вид

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \alpha_{\text{в}} (T_1 - T_{\text{с}}), \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha_{\text{в}} (T_2 - T_{\text{с}}). \quad (13)$$

Здесь $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент контактного теплообмена отливки и валка с воздухом; $T_{\text{с}}$ — температура среды.

Принимая во внимание, что процесс кристаллизации рассматриваемого сплава происходит в интервале температур, расчет коэффициентов λ, ρ, c для двухфазной зоны осуществляем по методике [4]. На основании чего

$$\begin{cases} \lambda = (\lambda_{\text{ж}} + \lambda_{\text{т}})(1 - \psi) + \lambda_{\text{т}}, \\ \rho = (\rho_{\text{ж}} + \rho_{\text{т}})(1 - \psi) + \rho_{\text{т}}, \\ c = c_{\text{ж}} + c_{\text{т}} - L \frac{\partial \psi}{\partial T}, \end{cases} \quad (14)$$

где $\psi = 1 - \frac{T - T_{\text{с}}}{T_{\text{л}} - T_{\text{с}}}$ — доля твердого вещества в

двухфазной зоне отливки; $\frac{\partial \psi}{\partial T} = \frac{1}{T_{\text{л}} - T_{\text{с}}}$ — темп кристаллизации; L — скрытая теплота кристаллизации; $\lambda_{\text{т}}, \rho_{\text{т}}, c_{\text{т}}, \lambda_{\text{ж}}, \rho_{\text{ж}}, c_{\text{ж}}$ — соответственно теплопроводность, плотность и теплоемкость твердой и жидкой фазы.

Для расчета затвердевания элементов решетки на ПЭВМ разработана программа RESHOTKA на языке Си. Расчет формирования отливки осуществляли при следующих параметрах ее теплообмена с валком в зависимости от агрегатного состояния: для перегретого расплава $\alpha_{1,2} = 30\,000$ Вт/(м²·град); для твердо-жидкого состояния $\alpha_{1,2} = 20\,000$ Вт/(м²·град); после образования твердой корки на стенках канала $\alpha_{1,2} = 10\,000$ Вт/(м²·град). Между отливкой и башмаком $\alpha_{1,3} = 5000$ Вт/(м²·град), а между валком и башмаком $\alpha_{2,3} = 1500$ Вт/(м²·град). В зоне охлаждения отливки после выхода из-под башмака $\alpha_{1,2} = 2000$ Вт/(м²·град) и $\alpha_{1,\text{в}} = 30$ Вт/(м²·град).

В процессе расчета на ПЭВМ определяли долю полностью затвердевшего металла $\xi, \%$, а также долю металла в твердо-жидком состоянии и процентное содержание в нем твердой фазы ψ . На рис. 5 приведены результаты расчета затвердевания жилок решетки сечением 0,9×1,4 и 1,4×2,5 мм, а также перемычки между решетками шириной $B=5$ мм и высотой $h = 1,4$ мм при $T_{\text{зал}} = 420^\circ\text{C}$ и $w = 0,35$ м/с. Расчеты показывают, что полное затвердевание перемычки составляет 0,31 с. Температура решетки к моменту ее съема с валка в его крайней нижней точке будет всего на 10–15°C выше температуры поверхности формообразующего валка и составляет 110–130°C для $w = 0,2\text{--}0,7$ м/с.

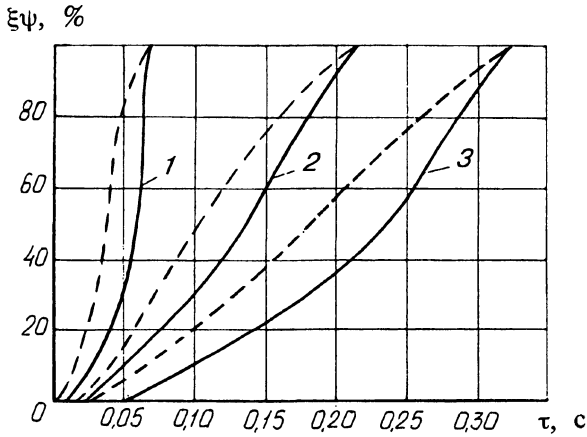


Рис. 5. Динамика образования твердой корки ξ , % и твердой фазы в двухфазной зоне ψ , % для элементов решетки: 1 — сечение $0,9 \times 1,4$ мм; 2 — сечение $1,4 \times 2,5$ мм; 3 — сечение $1,4 \times 5$ мм. Сплошная линия — твердая корка, штриховая линия — твердая фаза в твердо-жидкой зоне

Определение параметров кристаллизатора машины непрерывного литья решетки

При определении диаметра формообразующего вала будем исходить из того, что вся тепловая нагрузка на кристаллизатор передается охлаждающей воде, а температура на водоохлаждаемой поверхности вала остается практически одинаковой.

При принятых условиях внутренний диаметр вала D_2 рассчитываем по формуле:

$$D_2 = \frac{N_B}{\pi B \alpha_{2,B} (T_{2п} - T_{ок})}, \quad (15)$$

где B — ширина водоохлаждаемой зоны вала; $T_{2п}$ и $T_{ок}$ — соответственно температуры водоохлаждаемой поверхности и охлаждающей воды; $\alpha_{2,B}$ — коэффициент теплообмена на водоохлаждаемой поверхности. Расчет D_2 по формуле (15) при $B = 0,2$ м, $\alpha_{2,B} = 3000$ Вт/(м² · град), $T_{2п} = 60^\circ\text{C}$ и $T_{ок} = 20^\circ\text{C}$ дает для скорости литья $w = 0,7$ м/с значение $0,478$ м, а для $w = 0,35$ м/с $D_2 = 0,32$ м. С учетом толщины стенки вала $\delta_B = 30$ мм и кратности расположения гравюр решетки на его рабочей

поверхности наружный диаметр вала D_1 для скорости $w = 0,7$ м/с должен составить 546 мм, а для $w = 0,35$ м/с 410 мм.

При оценке параметров башмака определим протяженность зоны его контакта с отливкой $H_{ц}$ (см. рис. 2, а) и рассмотрим два случая: 1) при выходе из-под башмака расплав в самом массивном сечении отливки (перемычка между решетками) полностью затвердел; 2) содержание твердого вещества в твердо-жидкой фазе отливки составляет $\psi = 60\%$. Из рис. 5 видно, что полное затвердевание отливки происходит при $\tau_{ф} = 0,31$ с, а при $\psi = 60\%$ $\tau_{ф}$ составит $0,22$ с. Тогда $H_{ц} = w \tau_{ф}$ при скорости литья $0,35$ м/с составит для случая 1) $108,5$ мм, а для случая 2) — 77 мм. При проектировании башмака $H_{ц}$ было принято 77 мм, а $H_B = 70$ мм при $H_{ц} = 10$ мм. В процессе доводки оборудования H_B было сокращено до 50 мм и суммарная высота башмака составила 137 мм.

По результатам выполненных исследований спроектирована и изготовлена машина непрерывного литья аккумуляторной решетки толщиной $1,4$ мм. Формообразующий валок машины имеет $D_1 = 410$ мм и $D_2 = 350$ мм и изготовлен из серого чугуна. Башмак-питатель изготовлен из высокопрочного чугуна и имеет следующие размеры: $H_B = 50$ мм, $H_{ц} = 77$ мм, $H_{ц} = 10$ мм.

Литье свинцового сплава с содержанием $4,0 - 4,5\%$ Sb устойчиво обеспечивается при скорости $0,2 - 0,4$ м/с. В состав машины входит плавильно-раздаточная электропечь емкостью 1200 кг с установленной электрической мощностью 21 кВт. Производительность литейной машины составляет от 4000 до 8500 решеток/ч или около 600 кг/ч решетчатой ленты.

Литература

1. Continuous casting and plate making system leads battery technology into the 90's // Cast Master JR. 1998. Vol. 1, N 1. P. 1—2.
2. Recombination — Italian style // Batteries International. Issue 3. 1990. P. 56—58.
3. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. Л.: Госэнергоиздат, 1995.
4. Самойлович Ю. А. Формирование слитка. М.: Металлургия, 1978.