

Помимо рассмотренных узлов каменным литьем футеруют каналы систем гидрозолоудаления (ГЗУ), золо- и шлакопроводы, улиты мельничных вентиляторов, бункера и течи сырого угля и другое оборудование. Высокую эффективность при эксплуатации показали используемые в системах ГЗУ взамен чугунных камнелитые смывные и побудительные сопла. Надежность футеровок обеспечивается высокими эксплуатационными свойствами камнелитого материала.

Применение камнелитых футеровок позволяет отказаться от ежегодного восстановительного ремонта, связанного с разборкой всего горелочного устройства, сократить расход металла и топлива, значительно снизить ремонтные затраты и улучшить условия труда персонала. По аналогии разработана и изготовлена камнелитая защита для центральных и наружных труб горелок котлов П-57 энергоблоков 500 МВт. Детали футеровок изготавливают из камнелитейного расплава центробежным способом.

**В.М. Карпов,
В.С. Балин**

МЕХАНИЗИРОВАННАЯ ЛИНИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ШПУНТОВАННЫХ КАМНЕЛИТЫХ ПЛИТ

Защита технологического оборудования от износа во многих случаях эффективна при применении плиточной футеровки. Одним из материалов, обладающих высокой абразивной стойкостью, кислотостойкостью, щелочестойкостью и невысокой стоимостью, является каменное литье.

Основная разновидность каменного литья – плиты различных типоразмеров, изготавливаемые в металлических или песчаных формах. Наиболее прогрессивным и высокопроизводительным является изготовление камнелитых плит на кокильном конвейере, позволяющее механизировать и автоматизировать трудоемкие операции.

Для удовлетворения спроса на футеровочные плиты сконструирован и построен литейный конвейер, представляющий собой замкнутую механизированную технологическую линию производительностью 180 плит в час (рис. 1). Конвейер имеет как ручное, так и полуавтоматическое управление. Кокили выполнены из жаростойкой стали X25H20 в форме прямоугольной рамки. Технологическая линия состоит из участка заливки и подпрессовки расплава, туннельной кристаллизационной печи, участка выбivки плиток, ветви возврата и подогрева рамок. Движение рамок осуществляется гидравлическими толкателями, работающими попарно синхронно.

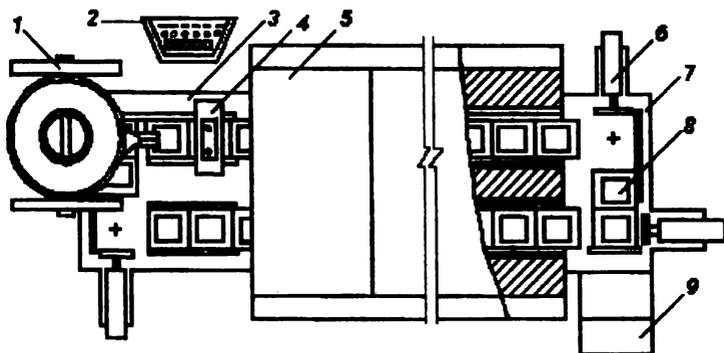


Рис. 1. Схема рамочного конвейера для производства камнелитых плит:

1 – миксер; 2 – пульт управления; 3 – заливочный стол; 4 – механизм подпрессовки; 5 – кристаллизатор и печь подогрева рамок; 6 – гидротолкатель; 7 – приемный стол; 8 – выбивное окно; 9 – накопитель роликовой печи

В отличие от действующих камнелитых конвейеров, рассматриваемая линия имеет электрообогреваемый миксер для длительной разливки расплава с регулировкой его температуры и механизм подпрессовки плит. Форма кокилей позволяет производить плиты с торцевым ступенчатым шпунтом. Ранее такие плиты изготовляли вручную, в разборных кокилях.

Расплав готовят в пятитонных дуговых электропечах с графитовыми электродами. Печи работают при напряжении 380 В, для наплавления ванны используется ток 800–850 А. Для кокильного литья наиболее приемлемы расплавы с хорошей кристаллизационной способностью. Этому требованию отвечает шихта, приготовляемая на основе горнблендита (отход обогащения железной руды Первоуральского месторождения, фракция 5–10мм) и пироксенитового шлама Качканарского горно-обогатительного комбината (фракция 0–2мм). Установлено, что приемлемым комплексом технологических свойств обладают расплавы с содержанием 50–52 % SiO_2 (таблица).

Химический состав применяемых расплавов

Материал	Массовое содержание, %							
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	Fe_2O_3	CaO	Mg O	R_2O	Прочие
Горнблендит	38,2	13,7	9,7	10,0	11,2	12,6	2,6	2,0
Пироксенит	45,1	10,3	5,8	5,1	18,2	9,6	2,1	3,8
Горнблендитовый расплав	52,4	12,3	12,4	2,6	8,6	7,7	1,8	2,2
Пироксенитовый расплав	51,3	9,4	7,5	1,8	17,1	7,3	1,7	3,9

В связи с этим к исходному сырью добавляют кислый подшихтовочный материал – кварцевый песок. В качестве инициатора кристаллизации вводят тонкоизмельченную хромовую руду. Расплав выпускают из печи при 1500–1520 °С и переливают в цилиндрический наклоняющийся электрообогреваемый миксер. Стальные электроды вмонтированы в боковые стенки миксера на двух уровнях, по три в каждом. Питание током осуществляется от трехфазного трансформатора, имеющего несколько ступеней. Разливка расплава из миксера ведется при 1350–1380 °С непрерывной струей в течение 80–90 мин. Заданная температура расплава регулируется силой тока в миксере переключением ступеней трансформатора.

Заливка одной плиты продолжается 19–20 с, после чего с помощью гидроцилиндров производится импульсный толчок рамок и под струю расплава попадает очередная рамка. Залитый кокиль передвигается по металлическому водоохлаждаемому столу на позицию подпрессовки сверху, где с помощью водоохлаждаемого пуансона при удельном давлении прессования $(2,5-3,0)10^5$ Па формируется верхняя рифленая поверхность плиты или центральное монтажное отверстие.

На рис. 2 представлены термограммы охлаждения шпунтованных плит толщиной 18 мм с подпрессовкой в течение 20 с после окончания заливки с последующим охлаждением на воздухе. Температура заливаемого расплава и рамки соответственно равны 1350 и 540 °С.

При подпрессовке быстро падает (до 800 °С) температура слоев, контактирующих с пуансоном, что приводит к появлению остеклованного слоя толщиной 2–3 мм. Аналогичная степень переохлаждения наблюдает-

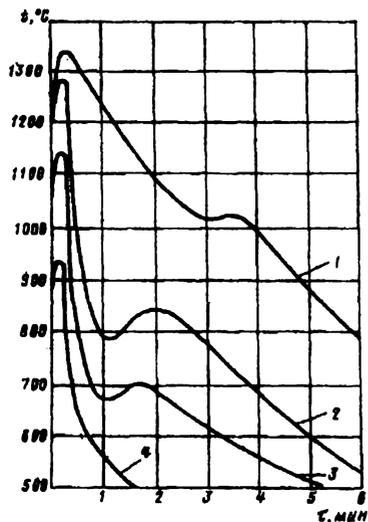


Рис. 2. Термограммы охлаждения шпунтованных плит с подпрессовкой после заливки:
1 – центральная зона; 2 – верхний слой;
3 – нижний слой; 4 – шпунтовая часть

ся и в нижних слоях плиты, контактирующих с водоохлаждаемым столом. В то же время к концу прессования центральная зона изделия имеет температуру 1200–1250 °С, т.е. плита находится еще в вязко-жидком состоянии.

Установлено, что кинетика охлаждения контактирующих с формой поверхностей отливки, особенно шпунтовой части, зависит не столько от температуры заливаемого расплава, сколько от температуры подогрева рамок. В связи с этим для уменьшения перепада температур по сечению отливки температура рамок перед заливкой должна составлять 450–500 °С.

После подпрессовки рамка с плиткой проталкивается в туннельную кристаллизационную печь, где выдерживается при 870 °С в течение 10–11 мин. Закристаллизованная плита поступает на приемный стол на позицию выбивки, где под действием собственного веса выпадает из рамки через окно в столе и перемещается в накопитель, из которого порядно (4–5 шт. в ряду) проталкивается на ролики туннельной печи для последующего охлаждения. Освободившаяся от плиты рамка поступает в печь подогрева (температура 700 °С).

Охладительная туннельная печь длиной 24 м имеет газовый обогрев, позволяющий поддерживать почти линейное падение температуры по длине. Плиты, расположенные в один ряд, перемещаются по приводному роликовому поду. Продолжительность охлаждения плит до 50–70 °С составляет 2,5 ч.

Упрощенная физическая модель охлаждения плитки на роликовом поде может быть представлена как симметричное $\left(\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0\right)$ охлаждение неограниченной пластины толщиной $2R$ с однородным начальным распределением температуры по сечению: $T(x, 0) = T_0$.

Плита охлаждается при граничных условиях третьего рода

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [(T_0 - b\tau) - T(\pm R, \tau)] = 0 \quad (1)$$

где λ – теплопроводность плиты;

T – температура в точке с координатой x (начало координат находится посередине толщины плиты);

τ – время;

α – коэффициент теплоотдачи от плиты в печное пространство;

T_0 – начальная температура плиты;

b – скорость охлаждения среды.

Температура печного пространства меняется по закону $T_{\text{эф}} = T_0 - b\tau$.

Известное решение сформулированной краевой задачи имеет вид

$$T(x, \tau) = T_0 - b\tau + \frac{b}{2a} \left[R^2 \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) - x^2 \right] - \frac{bR^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n} \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0), \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности плиты;

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} R; \quad A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n};$$

μ_n – корни характеристического уравнения;

$$\operatorname{ctg} \mu = aR/\lambda; \quad F_0 = \alpha\tau/R^2.$$

Анализ решения (2) показывает, что охлаждающаяся плита довольно быстро входит в режим, близкий к квазистационарному

$$T(x, \tau) = T_0 - b\tau + \frac{b}{2a} \left[R^2 \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) - x^2 \right], \quad (3)$$

при котором перепад температур по толщине изделия определяется температуропроводностью материала и скоростью охлаждения среды.

Возникающие в плите осевые температурные напряжения могут быть аппроксимированы следующей формулой:

$$\sigma_{\text{доп}} = \alpha_n E (T - T_{\text{ср}}) (1 - \nu), \quad (4)$$

где α_n – температурный коэффициент линейного расширения;

E – модуль упругости материала;

$T_{\text{ср}}$ – средняя температура по сечению плиты в момент перехода осевой зоны в упругое состояние;

ν – коэффициент Пуассона.

Задавая максимально допустимое напряжение растяжения $\sigma_{\text{доп}}$, можно рассчитать предельно допустимый перепад температур

$$(T - T_{\text{ср}})_{\text{доп}} = \sigma_{\text{доп}} (1 - \nu) / (\alpha_n E).$$

С другой стороны, учитывая, что переход к полностью упругому состоянию осуществляется в области квазистационарного режима и используя зависимость (3), получаем

$$(T - T_{\text{ср}})_{\text{доп}} = bR^2/6a.$$

Отсюда допустимая скорость охлаждения плит в печи

$$b_{\text{доп}} = 6\alpha(1-\nu) \sigma_{\text{доп}} / (\alpha_{\text{л}} E R^2).$$

В действующей печи скорость охлаждения составляет 320 К/ч, что в соответствии с формулами (3) и (4) дает допустимую максимальную величину остаточных напряжений $30 \cdot 10^5$ Па.

Получаемые плиты имеют в основном мелкокристаллическую, пироксеновую структуру.

**В.М. Карпов,
В.С. Балин**

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОТЖИГА КАМНЕЛИТЫХ ПЛИТ

Термообработку каменного литья проводят с целью получения кристаллической структуры в отливке, а также для снижения уровня температурных напряжений, возникающих при охлаждении залитого в форму силикатного расплава. Назначение рациональных режимов обжига отливок предполагает изучение реологических характеристик стеклокристаллического камнелитого материала, расчет реологических констант. В свою очередь, значения этих констант могут быть заложены в машинный расчет температурных полей, формирующихся, например, при отжиге камнелитых плит в открытых песчаных формах.

Реологические характеристики камнелитого материала изучали при растяжении и изгибе в интервале температур $20 \div 900$ °С на образцах, вырезанных из закристаллизованных отливок, а также на остеклованных образцах. На специальной установке фиксировали деформацию образцов при постоянной нагрузке и после ее снятия. Кривые деформации образцов во времени (рис. 1) показывают, что камнелитому материалу (содержание (%): 50 SiO₂, 6,5 Al₂O₃, 20 CaO, 7,7 MgO, 3 FeO, 6,6 Fe₂O₃, 1,8 R₂O) свойственны три вида деформации: мгновенная гуковская, упругозамедленная и необратимое пластическое течение.

До 500 °С при напряжениях до 37,5 МПа закристаллизованный пироксенит сохраняет обратимые упругие свойства, причем деформация носит мгновенный характер. При 600 °С в образцах появляется упругозамедленная деформация, которая растет с увеличением напряжения. При 700 °С начинает проявляться вязкопластическое течение материала. При 900 °С мате-