

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 SiO<sub>2</sub>, 6,5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20 CaO, 7,7 MgO, 3 FeO, 6,6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,8 R<sub>2</sub>O) 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-

риал течет даже при малых напряжениях. В остеклованных пироксенитовых образцах уже при 500 °С наблюдается развитие упругозамедленной деформации, а при 600 °С материал течет, начиная с напряжения 3,0 МПа.

Реологическая модель такого материала в первом приближении может быть представлена в виде сочетания механических элементов: пружин и амортизаторов. Пружинам приписывают механические свойства идеальной упругости (закон Гука), а вязким элементам (амортизаторам) – свойства идеально вязкой жидкости (закон Ньютона). Удовлетворительно отражает механическое поведение исследуемого материала в широком интервале температур модель, состоящая из последовательно соединенных двух-

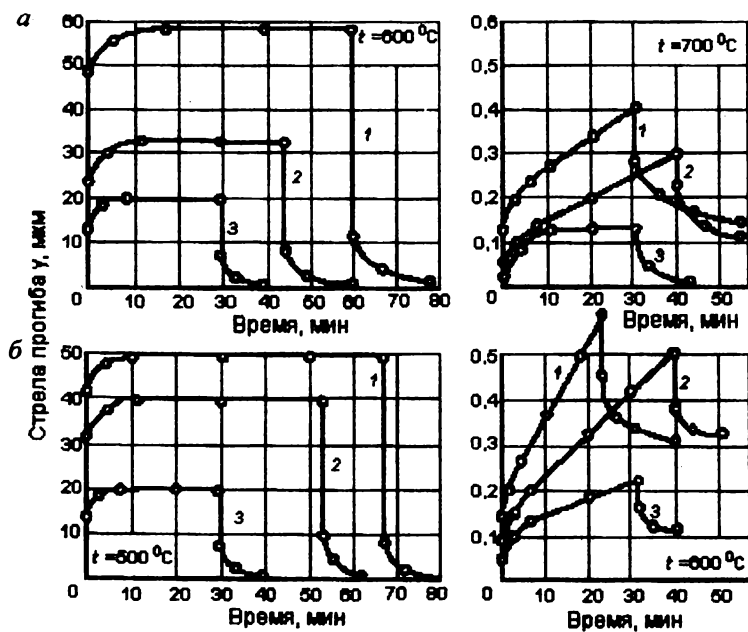


Рис. 1. Деформация закристаллизованных (а) и остеклованных (б) образцов при изгибе:

1 -  $\sigma_{изг} = 22,5$  МПа; 2 -  $\sigma_{изг} = 15,0$  МПа; 3 -  $\sigma_{изг} = 9,0$  МПа

элементной модели тела Кельвина и трехэлементной модели тела Бингама, которую можно рассматривать как усложненную «сдвиговым» элементом Сен-Венана модель тела Максвелла (рис. 2).

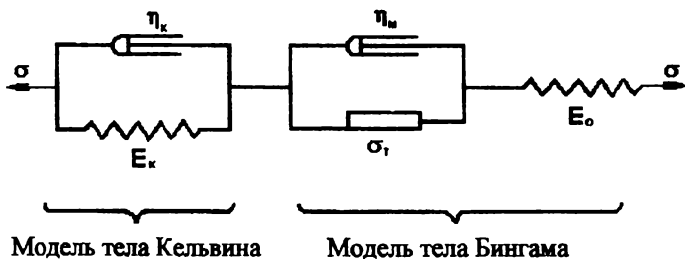


Рис. 2. Упрощенная реологическая модель  
стеклокристаллического материала

Связь между напряжением  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в таком материале выражается уравнением

$$\frac{d^2 \sigma}{d \tau^2} + \left[ E_0 \left( \frac{1}{\eta_n} + \frac{1}{\eta_k} \right) + \frac{E_k}{\eta_k} \right] \times \frac{d \sigma}{d \tau} + \frac{E_0 E_k}{\eta_n \eta_k} (\sigma - \sigma_T) = E_0 \frac{d^2 \varepsilon}{d \tau^2} + \frac{E_0 E_k}{\eta_k} \frac{d \varepsilon}{d \tau}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время;

$E_0$  – модуль упругости гуковского элемента;

$\eta_n$  и  $\eta_k$  – вязкостные коэффициенты, характеризующие соответственно необратимое пластическое течение и обратимое течение при упругозамедленной деформации;

$E_k$  – модуль упругости Кельвина

Интегрирование уравнения (1) при условии  $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$  приводит к зависимости

$$\varepsilon(\tau) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{\eta_n} \tau + \frac{\sigma_0}{E_k} (1 - e^{-E_k \tau / \eta_k}), \quad (2)$$

где первое слагаемое отражает мгновенную упругую деформацию, второе – развитие необратимого вязкого течения, а третье – упругую запаздывающую деформацию.

По экспериментальным кривым нагружения и разгружения образцов были вычислены константы, характеризующие реологическую модель изученных камнелитых материалов при различных температурах. Весь температурный диапазон охлаждения камнелитого изделия после его отвердевания можно разделить на три участка. На высокотемпературном участке (выше 700 °С) возможна активная релаксация возникающих напряжений вследствие пластического течения. В промежуточном интервале

(примерно 700–500 °С) возникающие напряжения могут частично сниматься за счет упругозамедленной деформации. В низкотемпературном интервале релаксация напряжений происходит крайне медленно, что необходимо учитывать при назначении скоростей охлаждения изделий.

Расчитанные значения реологических констант заложены в расчет температурно-временных режимов отжига наиболее массового вида продукции – камнелитых плит различной толщины – в типовых конвейерных печах. При этом получены вполне приемлемые результаты.

Физические и математические модели формирования напряжений в плиточных изделиях при конвейерном изготовлении составляли последовательно для каждого этапа отжига. Расчет температурных полей проводили с помощью ЭВМ как для печей с приводным роликовым подом (симметричные условия теплообмена), так и для тележечного конвейера (несимметричное охлаждение). При симметричном теплообмене изменение температуры в теле плиты описывали дифференциальным уравнением Фурье, а условия теплообмена между плитой и средой задавали граничными условиями III рода. Характер распределения остаточных напряжений, сформировавшихся в плите при охлаждении в печи с постоянной скоростью, изображен на рис. 3. Как известно, величина остаточных температурных напряжений зависит от разницы температур в упругом слое изделия и средней температуры по сечению, причем эту разницу рассчитывают

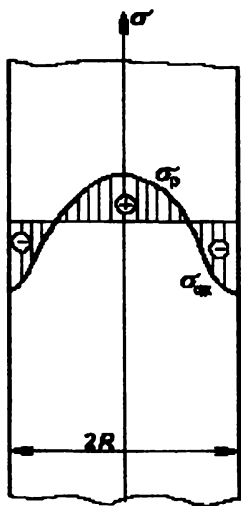


Рис. 3. Распределение температур и напряжений в плите при охлаждении в печи

для момента времени, когда последний (центральный) слой плиты переходит из пластического состояния в упругое. Начиная с этого момента разные слои изделия подвергаются различной величине свободной линейной усадки. Поскольку же отдельные слои в отливке жестко связаны, то они могут дать только одинаковую усадку. В результате такого несоответствия свободной и фактической (средней) величины усадки при последующем охлаждении до комнатной температуры появляются остаточные упругие деформации, формирующие нерелаксирующие напряжения. Для сохранения целостности изделия величина этих напряжений не должна превышать предела прочности материала при растяжении.

Закономерно предположить, что для снижения уровня остаточных напряжений следует выравнивать перепад температур по сечению плиты перед входом ее в область упругого состояния. С этой целью при температуре 650 °С делали изотермическую выдержку до максимально возможного выравнивания перепада температур между поверхностью и центром плиты. Дальнейшее охлаждение проводили с высокими скоростями, что позволило существенно сократить общую продолжительность отжига и повысить пропускную способность туннельной роликковой печи, согласовав ее с производительностью заливочного конвейера.

Расчитаны фактические и допустимые значения перепадов температур в плитах различной толщины (10–50 мм) для скоростей симметричного охлаждения от 100 до 600 К/ч. При этом величина допустимого перепада температур в плите при входе ее в область упругого состояния составила 12 °С (рис. 4).

Несколько иная картина возникает при отжиге камнелитых плит в подогретых открытых песчаных формах на тележечном конвейере. Несимметричные условия охлаждения закристаллизованных плит потребовали при расчете температурных полей применения итерационного метода. Расчет проводили для скоростей охлаждения от 50 до 300 К/ч и толщины типовой футеровочной плиты – 30 мм. «Мягкие» условия охлаждения отливок в подогретых песчаных формах не позволяют зародиться значительным временным напряжениям и допустимый температурный перепад может быть выдержан при скоростях охлаждения среды не выше 100 К/ч (рис. 5).

Проведенные исследования реологических свойств камнелитого материала и расчеты температурных полей позволили оценить влияние различных температурно-временных и конструкционно-технологических факторов на формирование остаточных напряжений в отливках при отжиге их в туннельных печах с роликвым подом и на тележечном конвейере.

Результаты выполненной работы успешно реализованы в режимах термообработки плит в камнелитых цехах ОАО «Свердловэнерго» и ОАО «Первоуральский завод горного оборудования».

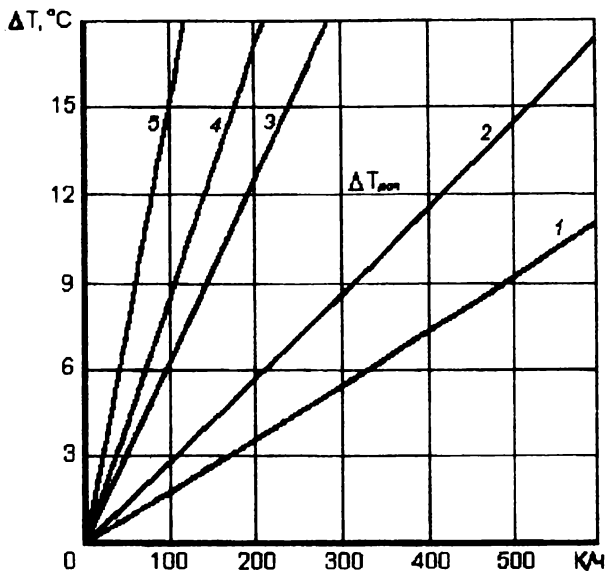


Рис. 4. Допустимые перепады температур в плитах при входе в область упругого состояния:  
 1 – при  $2R=10$  мм; 2 – при  $2R=20$  мм; 3 – при  $2R=30$  мм;  
 4 – при  $2R=40$  мм; 5 – при  $2R=50$  мм

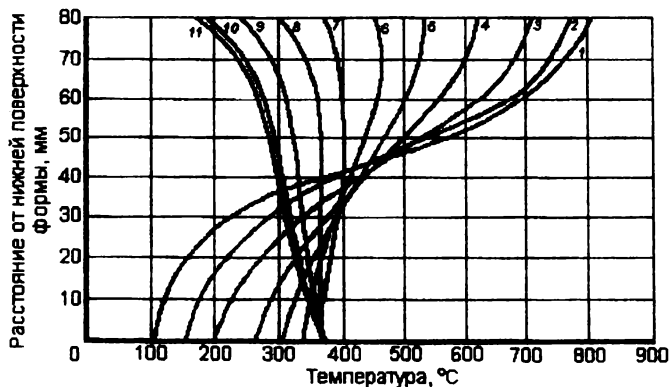


Рис. 5. Распределение температур в отливке и в форме при охлаждении со скоростью 100 К/ч в моменты времени, ч:  
 1 – 0; 2 – 0,33; 3 – 1,0; 4 – 2,0; 5 – 3,0; 6 – 4,0; 7 – 5,0;  
 8 – 6,0; 9 – 7,0; 10 – 8,0; 11 – 8,33