

ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕННЫХ ОТЛИВОК

Низкая теплопроводность и температуропроводность каменного материала ($\lambda = 1,0-1,8$ Вт/(м·К); $a = (3-5) \cdot 10^{-7}$ м²/с) приводят к образованию значительных температурных напряжений в теле отливки при ее охлаждении. Чем выше скорость охлаждения изделия, тем более значительные температурные градиенты возникают в отливках и тем выше вероятность их разрушения.

Существуют и другие причины, вызывающие растрескивание камнелитых изделий. Одна из них -- межфазные напряжения, возникающие при охлаждении отливки на границе кристаллов и межкристаллического стекла из-за различия коэффициентов линейного расширения соответствующих фаз. К аналогичным результатам ведет полиминеральность структуры литья. Эти два фактора могут действовать и совместно.

Если межфазные напряжения можно значительно снизить подбором химического состава расплава и вариациями температурных режимов кристаллизации отливок, в результате чего структура литья может быть максимально приближена к монокристалльной, то теплопроводность каменного литья не удастся сколько-нибудь существенно повысить, и она в основном определяет склонность отливок к трещинообразованию.

Известно, что температурные напряжения являются главным образом следствием температурного перепада по толщине отливки, а также неравномерности охлаждения (или нагрева) из-за ее разнотолщинности. Последняя причина существенно ограничивает ассортимент камнелитых изделий, так как получить отливки сложной конфигурации весьма затруднительно из-за возникающих в процессе термической обработки значительных временных и остаточных напряжений.

Чувствительность каменного литья к действию температурных напряжений, а следовательно, связанная с этим низкая термостойкость требуют тщательной организации термической обработки изделий в производственных условиях, особенно режимов их охлаждения. Скорость охлаждения камнелитых изделий находится обычно в пределах от 25 до 100 град/ч и зависит в основном от их конфигурации, толщины сте-

нок и массы. Простейшие отливки в виде плит массой до 10 кг охлаждаются с наибольшей скоростью. Чем сложнее отливка и больше ее масса, тем меньше скорость охлаждения. Сокращение времени термической обработки крупногабаритных отливок и снижение брака по трещинообразованию являются насущными проблемами в камнелитейном производстве.

Исследование реологических свойств каменных отливок позволило установить, что до температуры 650 °С горнблендитовые отливки сохраняют свойства упругого тела. В интервале температур 650–750 °С начинает проявляться упругозамедленная деформация. Выше температуры 750 °С материал отливок склонен к необратимому пластическому течению.

Таким образом, при охлаждении до температуры 750 °С в объеме горнблендитовых отливок возможны компромиссные деформации за счет явления вязкопластического трения, устраняющие несоответствие в скоростях усадки. Поэтому высокотемпературный интервал мало опасен с точки зрения трещинообразования и здесь допустимы более высокие скорости охлаждения отливок.

При отжиге отливок с недостаточной степенью кристаллизации, полученных литьем в кокиль, приходится считаться с возможностью остаточных пластических деформаций в изделиях под действием собственного веса. Это может проявляться в виде эллипсоидного сечения литых труб, коробления плиточных изделий и т. п.

Интервал температур 650–750 °С наиболее опасен для крупногабаритных отливок, получаемых литьем в кокиль (например, трубы диаметром от 600 мм и более). В подобных отливках при этих температурах возможна деформация под действием собственной массы за счет явления упругого последействия, что может приводить к нарушению геометрии отливок. Для таких изделий желательно значительно снизить температуру в зоне садки отжигательной печи до 700–650 °С.

Начиная с температуры 650 °С материал горнблендитовых отливок приобретает свойства упругого тела Гука. Если к этому моменту времени градиент температур по сечению отливки будет близким к нулю, то в дальнейшем в ней возникают только временные температурные напряжения, исчезающие при окончательном охлаждении и выравнивании температуры. Величина остаточных температурных напряжений будет определяться теми температурными перепадами ΔT , которые сложатся в изде-

лии к периоду перехода в упругое состояние. Следовательно, верхний предел скорости охлаждения каменных отливок в пластическом и упруговязком состояниях ограничен, несмотря на наличие релаксации напряжений, формированием предельно допустимых ΔT .

Рассмотрим, например, симметричное охлаждение камнелитой отливки наиболее распространенного типа футеровочной плитки, которую теплотехнически можно уподобить бесконечной пластине толщиной $2R$. Принимаем, что в начальный момент времени пластина находится в тепловом равновесии с окружающей средой, температура которой есть функция времени $T_c = T_0 - v\tau$, и считаем, что теплообмен на поверхности пластины характеризуется относительной интенсивностью критерия Био -- Bi .

При квазистационарном режиме охлаждения величины температурных перепадов между отдельными точками отливки не меняются во времени и зависят от скорости охлаждения v . Температура в плитке характеризуется уравнением

$$T_{(x, \tau)} = T_0 - v\tau + \frac{v}{2a} \left[R^2 \left(1 + \frac{2}{Bi} \right) - X^2 \right],$$

где $T_{(x, \tau)}$ -- температура в точке с координатой X в момент времени τ ($-R < X < +R$);

v -- скорость охлаждения;

a -- коэффициент температуропроводности;

Fo -- критерий Фурье, определяемый как $\frac{a\tau}{R^2}$;

Bi -- критерий Био, $Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot R$;

α -- коэффициент теплообмена;

λ -- коэффициент теплопроводности;

Независимо от условий теплообмена на поверхности плитки величина температурного перепада по толщине в центральной зоне определяется формулой

$$\Delta T_1 = \frac{vR^2}{2a}.$$

Величина температурного перепада между поверхностью плитки и окружающей средой равна

$$\Delta T_2 = \frac{\sigma R^2}{a \cdot \text{Bi}}.$$

При температурах ниже 350–400 °С охлаждение изделий по прямолинейной зависимости вести практически невозможно. Здесь необходимо плавное изменение температуры по закону, близкому к экспоненте:

$$T_{c(t)} - T_1 = (T_1 - T_0)e^{-kt},$$

где T_1 – конечная температура среды;
 T_0 – начальная температура среды;
 k – темп охлаждения.

При этом в отливках постепенно реализуются остаточные напряжения, что менее опасно, поскольку прочностные свойства материала стали уже достаточно высокими.

В процессе окончательного охлаждения все температурные градиенты исчезнут, в результате чего сформируются остаточные температурные напряжения. Любые отклонения от квазистационарного режима в области чисто упругого состояния приводят к возникновению временных или остаточных температурных напряжений.

**В. С. Балин,
В. М. Карпов**

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГОРНБЛЕНДИТОВЫХ ОТЛИВОК

В настоящее время в камнелитейном производстве для охлаждения отливок используются туннельные печи непрерывного действия длиной до 40 м и более. В головной части печи в зоне садки отливок температура поддерживается в пределах 800–950 °С и зависит от вида отжигаемого литья. В случае термической обработки некоторых видов кокильных отливок, которые кристаллизуются в специальных печах, в садочной зоне охлаждающей печи устанавливается температура 800–850 °С. При отжиге