

И. Н. Дударь, д. т. н., проф.; В. Л. Дмитренко

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВИБРОПРЕССОВАННОГО БЕТОНА

В статье рассмотрены особенности распределения полей температуры, давления и влагосодержания по сечению пластины из вибропрессованного бетона (ВПБ) при одностороннем и двустороннем охлаждении. Проведен анализ особенностей напряженного состояния твердеющего под давлением бетона в процессе охлаждения с учетом возникающих при этом градиентов температуры, влагосодержания и давления, а также через разницу деформационных свойств составляющих компонентов; изложены наиболее полные обобщенные критериальные уравнения интенсивности снижения температур и давлений при охлаждении изделий из вибропрессованного бетона.

Ключевые слова: вибропрессованный бетон, напряженное состояние, градиент температуры, уравнения интенсивности снижения температур.

Интенсификация производства, обеспечение высокого оборота дорогостоящих пресс-форм при производстве изделий из вибропрессованных бетонов возможны только в случае обеспечения минимальной продолжительности цикла тепловой обработки, включающего периоды нагрева и охлаждения. Обычно изделия из вибропрессованного бетона твердеют в жёстких герметических формах, что частично или полностью исключает испарение влаги с их поверхности и способствует более медленному охлаждению бетона.

Рассмотрим особенности распределения поля температуры, давления и влагосодержания по сечению пластины из вибропрессованного бетона (ВПБ) при одностороннем и двустороннем охлаждении. Состояние, характеризуемое перепадами температуры Δt , влажности Δu и давления Δp , покажем для неограниченной пластины в середине периода охлаждения τ_{III} . Распределение полей температур, влагосодержаний и давлений, вызывающих соответствующие потоки жидкой фазы в бетоне q_{mt} , q_{mu} , q_{mp} , вынуждающих массу внутренней влаги перемещаться к поверхности изделия (рис. 1).

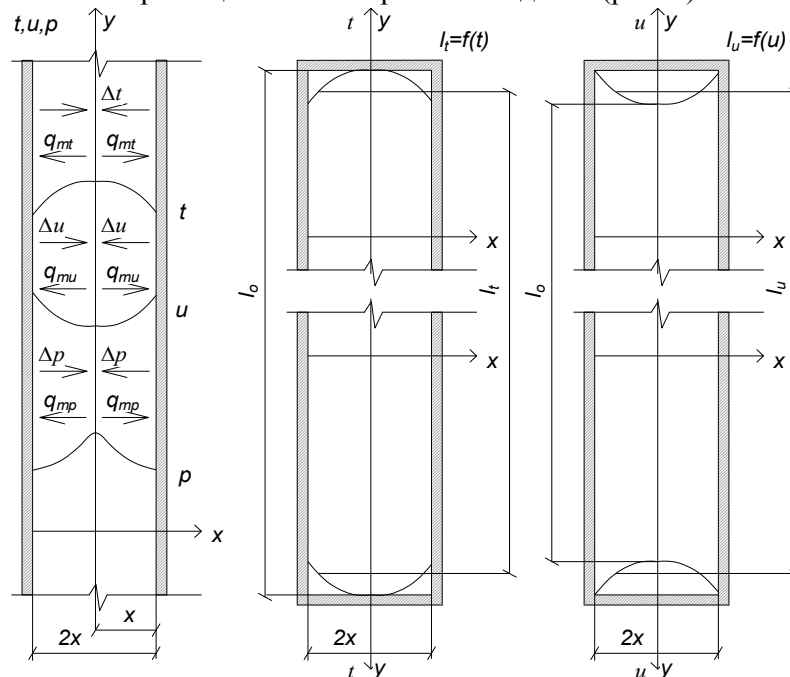


Рис. 1. Схемы полей температур, влагосодержаний и давлений в период охлаждения вибропрессованного бетона

В силу снижения температуры пресс-формы и бетона пластина стремится сократиться по поверхности на величину l_{iq} , а одновременно с этим под воздействием q_{mt} , обусловленным градиентом температуры, повышается влагосодержание поверхностного слоя, что приводит к увеличению линейных размеров пластины на величину l_{uq} . Результирующую деформацию пластины можно выразить как $l_{об} = l_{iq} - l_{uq}$. Поверхностные слои бетона изделия испытывают максимальные напряжения от перепада температуры Δt и влажности ΔU , к которым добавляются воздействия от перепада давлений, возрастающие с ростом скорости охлаждения. При этом температурные деформации металла форм при охлаждении изделий значительно превышают деформации бетона, так как охлаждение изделий медленнее чем охлаждение оснастки. Перепады температур между горячим бетоном и быстро остывающей пресс-формой могут достигать 45...55 °C (рис. 2).

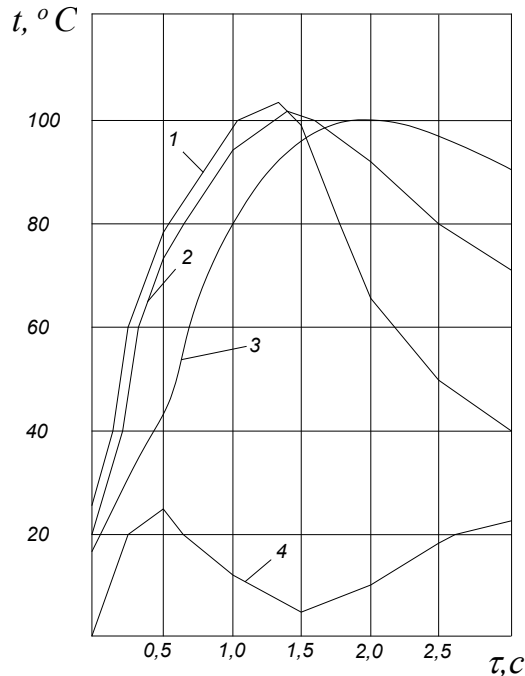


Рис. 2. Распределение температур в период охлаждения железобетонной виброгидропрессованной трубы после двусторонней термообработки в металлических колпаках

1, 2, 3 – температура внешней формы, бетона в защитном и подарматурном слоях изделия соответственно, 4 – температура формы внутри

В силу этого на контакте бетона и формы возникают касательные напряжения, обжимающие изделие в процессе охлаждения. Если форма имеет хотя бы одну плоскость, не жёстко связанную с изделием, то с ее стороны по поверхности бетона могут возникнуть растягивающие напряжения вследствие изгиба пластины от действия касательных напряжений со стороны жесткой формы (рис. 3).

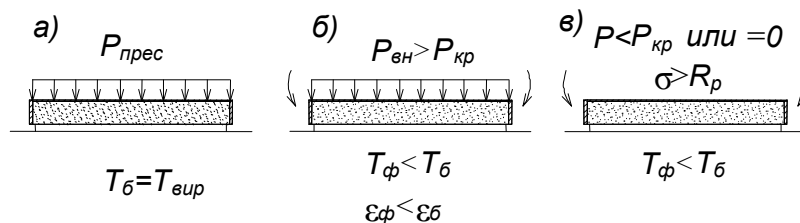


Рис. 3. Схемы взаимодействия изделия из вибропрессованного бетона с формой.

а) в период изотермического прогрева; б) при охлаждении под давлением; в) при охлаждении под давлением при отсутствии внешнего воздействия

Рассмотрим влияние последовательности снятия давления на напряженное состояние

Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

плоской пластины. Допустим, что в начале процесса охлаждения давление прессования уменьшится до атмосферного за небольшой промежуток времени (0,10...0,15 ч.), тогда в верхней зоне могут возникнуть растягивающие усилия, при этом, если их величина будет превышать предельно допустимые напряжения на разрыв R_p , по поверхности бетонной пластины образуются микротрещины.

В случае охлаждения в условиях сохранения всестороннего обжатия, абсолютное значение которого достаточно для создания контрусилия, способного компенсировать влияние изгибающих усилий, трещинообразование будет отсутствовать. Критическая величина давления термопригрузки $P_{прес}^{крит}$ является функцией перепада температур Δt , высоты изделия h , прочности бетона на растяжение R_p , теплофизических свойств бетона и формы, а также ее конструкции:

$$P_{прес}^{крит} = f(\Delta t_{ф.б.}, R_p, h, \alpha_{ф.}, \alpha_{б.} \dots).$$

С другой стороны, в процессе охлаждения бетона, нагретого под давлением до температур более 100°C, при резком сбросе давления прессования возможно явление „закипания” несвязанной жидкости вследствие ее перегрева, что, как известно, будет способствовать образованию направленной пористости и ухудшению структуры бетона. Условия, при которых невозможно явление перегрева жидкой фазы, т. е. она не может оказаться в состоянии „закипания”, в любой момент времени можно записать в виде:

$$\bar{t}_{б}^i \leq 100 \sqrt[4]{P_{прес}^t} - \Delta t_{зан}; \quad (1)$$

$$P_{прес}^t \leq \left(\frac{\bar{t}_{б}^i}{100} \right) + \Delta P_{зан}, \quad (2)$$

где $P_{прес}^t$ — внешнее давление на поверхность бетона при его охлаждении в любой момент, $\times 10^{-1}$ МПа; $\bar{t}_{б}^i$ — средняя температура бетона по сечению изделия, °C; $\Delta t_{зан}$ — безопасное снижение температуры ниже точки насыщения, вызванное перепадами температуры в изделии; $\Delta P_{зан}$ — повышение давления выше давления насыщения, обусловленное неравномерностью распределения давлений и температур.

Величины $\Delta t_{зан}$ и $\Delta P_{зан}$ учитывают градиенты температур и давлений по сечению и служат как бы дополнительным фактором, устраняющим возможное локальное парообразование в точках изделия, где наблюдается максимальная температура. Требуемая величина дополнительного давления при градиенте температуры по сечению не более 10 °C в зависимости от максимальной температуры прогрева бетона (от 100 до 200 °C) изменяется в пределах 0,04...0,428 МПа (табл. 1).

По общепринятому мнению, в затвердевшем бетоне существует внутреннее поле напряжения, обусловленное усадкой, неоднородностью в объеме влажности, температуры и давления [1]. По данным работ на датчиках, помещённых в цементное тесто после твердения, в течении трех суток при нормальных условиях зафиксированы сжимающие напряжения величиной 2,0...3,0 МПа. При твердении бетона в процессе тепловой обработки в среде с 100%-ной влажностью не установлено наличие сжимающих напряжений на заполнители-датчике [2]. В прессованных бетонах, твердеющих под давлением, по данным работы [3], должны существовать обжимающие заполнители напряжения, теоретическая величина которых достигает 3,0...4,0 МПа (в зависимости от вида заполнителя, его деформационных свойств и давления прессования).

Однако результаты экспериментальных исследований, проведённых в последнее время, не подтвердили существование обжимающих заполнителей напряжений ни при усадке, ни при воздействии внешнего прессующего давления величиной 2,0 МПа и более после твердения бетона в течение 18...21 суток [4]. По мнению авторов работы [4], объясняется это явление

наличием контракции цементного камня в процессе его твердения, которая снимает внешнее давление на заполнитель к концу процесса формирования структуры бетона.

Таблица 1

Зависимость величины давления прессования от средней температуры бетона и перепада температур в изделии

Средняя температура бетона $T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Требуемая величина давления $P_{\text{прес}} \times 10^{-1}$ МПа	1,42	2,02	2,78	3,77	5,00	6,48	8,3	10,46	13,02	16,03	19,83
Давление насыщенного пара $P_{\text{н}} \times 10^{-1}$ МПа	1,01	1,43	1,98	2,70	3,61	4,76	6,18	7,92	10,03	12,55	15,55
Величина дополнительного давления из-за перепада температур $(T_{\text{ср}} - T) = 10 ^\circ\text{C}$	0,41	0,55	0,80	1,07	1,39	1,72	2,12	2,54	3,00	3,48	4,28

Рассмотрим теперь физические явления, возникающие при охлаждении изделия из вибропрессованного бетона. Так, при снижении давления прессования на величину ΔP за время Δt в порах бетона снижается плотность пара, а это в свою очередь сопровождается возникновением дополнительного количества насыщенного пара $\Delta G = \Pi_{\text{св}} \partial'' / \partial \tau$. В результате этого в порах слоя бетона изделия возникнут избыточные давления, равные $dP \Delta x / dx$, которые будут стремиться оторвать этот слой плиты от ее поверхности, что неизбежно приведет к возникновению растягивающих напряжений со стороны свободной поверхности. Для определения величины растягивающих усилий от действия избыточного давления автор работы [2] предлагает использовать зависимость:

$$d\tau_p = \frac{\bar{\Pi}_{\text{св}} dP \Delta x}{100 dx}, \quad (3)$$

где $\bar{\Pi}_{\text{св}}$ – объем свободных пор в бетоне; Δx – толщина рассматриваемого слоя плиты; $\frac{dP}{dx}$ – градиент давления по толщине плиты.

Допустимый перепад давлений по сечению плиты можно определить из условия, что величина внутренних растягивающих напряжений в любой точке сечения будет меньше предела прочности бетона на растяжение $R_p^{(x)}$:

$$\Delta P_{\text{дон}} = \frac{100 R_p^{(x)} K_{\text{дон}}^{-1}}{\Pi_{\text{св}}}. \quad (4)$$

Если в выражение (4) подставить значение всех переменных, величина допустимых перепадов давления, вызванная влиянием дополнительного парообразования для вибропрессованного бетона с прочностью на сжатие (после тепловой обработки) 20,0...40,0 МПа, будет составлять 1,02...2,0 МПа.

Как известно, в процессе охлаждения железобетонных изделий возникают существенные перепады температур по сечению. Допустимую величину напряжений в бетоне, вызванных градиентом температуры можно определить по такой аналитической зависимости:

$$\sigma_{x(t)} = \frac{\alpha(\bar{t} - t_{(x,\tau)}) \bar{E}}{1 - \mu} \leq R_p^{(x)} K_3^{-1}, \quad (5)$$

здесь α – коэффициент температурного расширения бетона; $\bar{t}$ – средняя температура бетона по сечению; $t_{(x,\tau)}$ – температура в слое в момент времени τ ; $\bar{E}$ – среднее значение модуля деформации по сечению; μ – коэффициент Пуассона бетона; K_3 – коэффициент запаса.

Если подставить исходные данные для вибропрессованного бетона, можно определить значение допустимого перепада температур по сечению изделия:

$$\Delta t_{\max} = \bar{t} - t_{(x,\tau)} = \frac{R_p(1-\mu)}{E\alpha} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}(1-0,2)}{1 \cdot 10^{-2}} \approx 12^\circ \text{C}, \quad (6)$$

где R_p/E – отношение, принято равным максимальной растяжимости вибропрессованного бетона, которое находится в пределах $1,5 \cdot 10^{-4}$; μ – значением коэффициента Пуассона задаемся в пределах 0,2.

Исходя из данного условия, можно вычислить допустимый перепад давления по сечению изделия, который в данном случае не будет превышать $0,5 \cdot 10^{-1}$ МПа. При этом перепад температуры по сечению вызывает растягивающие напряжения по поверхности плиты, а перепад давлений – в перпендикулярной плоскости по толщине изделия.

Напряжения в ВПБ, обусловленные градиентом влагосодержания, по сечению изделия можно определить по формуле:

$$\sigma_{x(u)} = \varepsilon_{x(u)} E = \frac{\beta_y(U_x - \bar{U})}{1-\mu} E \leq R_p^{(x)} K_3^{-1}, \quad (7)$$

здесь β_y – коэффициент линейной усадки бетона, который равен приблизительно $\beta_y = 3 \cdot 10^{-1} \frac{\text{мм/мм}}{^\circ\text{C}}$; $U_x, \bar{U}$ – влагосодержание бетона в слое x и среднее по сечению.

Допустимый перепад влагосодержаний по сечению не должен превышать величины $\Delta U_{\max}$:

$$\Delta U_{\max} = \frac{(1-\mu)R_p^{(x)}}{E\beta_y} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}(1-0,2)}{3 \cdot 10^{-2}} = 0,4 \cdot 10^{-2} \frac{^\circ\text{C}}{\text{мм/мм}}. \quad (8)$$

В результате проведенного анализа особенностей напряженного состояния твердеющего под давлением бетона в процессе охлаждения с учетом возникающих при этом градиентов температуры, влагосодержания и давления, а также из-за разностей деформативных свойств составляющих компонентов, стало возможным получить наиболее полные обобщенные критериальные уравнения интенсивности снижения температур и давлений при охлаждении изделий из вибропрессованного бетона:

$$R_p^{(x)} \geq K_3 \left\{ \frac{\Pi_{св}}{100} \Delta P_{(x,\Delta)} + \frac{E}{1-\mu} [\alpha(\bar{t} - t_{(x,\tau)} + \beta_y(U_x - \bar{U}))] + \sigma_p^{роз} \right\}, \quad (9)$$

$$t_0^{\max} \leq 100 \sqrt[4]{P_{\max}^t - \Delta t_3^t}. \quad (10)$$

Таким образом, при решении задач оптимизации режимов охлаждения вибропрессованных бетонов в соответствии с уравнениями (9), (10) надо исходить из условия, что сумма внутренних собственных напряжений в любом сечении изделия от перепадов давлений, температур, влагосодержаний и от сброса давления при распрессовке, умноженная на коэффициент запаса, не превышала предела прочности бетона на растяжение, а максимальная температура была ниже температуры насыщения, соответствующей конечному давлению распрессовки, и уменьшенная на величину перепада температур по сечению изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горчаков Г.И., Орендлихер Л.П., Савин В.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 144с.
2. Счастный А.Н. Оптимизация тепловой обработки изделий из цементных и силикатных бетонов: Автореф. дис. кандидата тех. наук / ВЗИСИ. – М., 1979. – 352с.
3. Мурашкин Г.В., Бутенко С.А., Сеськин И.Е. Начальное напряжённое состояние бетона, твердеющего под давлением, по анализу двухкомпонентной модели // Совершенствование методов расчёта и исследование новых типов железобетонных конструкций. – Л.: ЛИСИ, 1981. – С. 92 – 98.
4. Булатов А. И., Видовский А. Л. Обжатие цементным камнем заполнителей в бетоне // Бетон и железобетон. – 1985. – №3. – С. 24 – 26.
5. Требухин А.Ф. Исследование режимов охлаждения при производстве железобетонных конструкций. – Автореф. дис. кандидата тех. наук / ВЗИСИ. – М., 1975. – 245 с.

Дударь Игорь Никифорович – заведующий кафедрой градостроения и архитектуры;

Дмитренко Виктория Леонидовна – магистрант кафедры градостроения и архитектуры.
Винницкий национальный технический университет