Таблица 1 – **Характеристики бетонов с УНМ**

Характеристика бетона	Размерность	Величина в проектном возрасте		Повышение показателя, %
		без УНМ	с УНМ	
Мелкозернистый бетон				
Прочность на сжатие	МПа	55–74	67–82	11–21
Прочность на осевое растяжение (раскалывание)	МПа	1,45–1,67	1,54–2,17	6–30
Прочность на растяжение при изгибе	МПа	9,1–11,9	9,9–13,9	9–17
Водопоглощение	%	3,9–4,0	3,6–3,7	–(7–8)
Высокопрочный бетон				
Прочность на сжатие	МПа	80–100	88–115	10–15
Модуль упругости	МПа x10^3	45–47	46–49	2–4
Водопоглощение	%	2,0–2,8	1,9–2,7	–(3,5–5,0)
Солестойкость после 10 циклов в насыщенных растворах: $NaCl$ – Δm	%	2,5–2,6	2,3–2,5	–(4–8)
$NaCl$ – f_{cm}	МПа	75–83	91–104	21–25
Na_2SO_4 – Δm	%	2,5–2,7	2,3–2,5	–(7–8)
Na_2SO_4 – f_{cm}	МПа	74–79	89–102	20–29
Водонепроницаемость	марка	W16–W18	W18–W20	1 марка

Результаты комплексных экспериментально-теоретических исследований показали, что воздействие углеродных наноматериалов на процессы взаимодействия цемента с водой, твердения, формирования структуры и прочностных свойств цементного бетона имеет физическую природу и не изменяет морфологию кристаллогидратных новообразований затвердевшего цемента.

Результаты механических испытаний бетона на сжатие, растяжение при изгибе и осевое растяжение (путем раскалывания образцов (в статье не приведены)) показали, что в последнем случае прирост прочности бетона (на примере мелкозернистого) более значителен, что подтверждает теоретическую предпосылку о «наноармировании» кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне за счет «встраивания» в неё волокнообразных УНМ, способствующих восприятию растягивающих усилий, возникающих в раскалываемых образцах.

Общая оценка свойств бетона с УНМ подтверждает его перспективность к применению в мелкозернистых и тяжелых бетонах, бетонах дорожных, аэродромных покрытий, а также при изготовлении сборных изделий и в варианте монолитного строительства несущих конструкций, сооружений транспортных коммуникаций.

УДК 539.3

НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕРМОСИЛОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ В СВОЕЙ ПЛОСКОСТИ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ, А. В. НЕСТЕРОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для описания кинематики пакета принята гипотеза «прямой нормали»: в пластине толщиной h нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол, составляющий с радиальной и тангенциальной осями величины $\psi_r(r, \varphi)$ и $\psi_\varphi(r, \varphi)$. Деформации малые. Проекции внешней нагрузки на радиальное и тангенциальное направления обозначим $p_r(r, \varphi)$, $p_\varphi(r, \varphi)$. В этом случае перемещения в пластине выражаются через две искомые функций: u_r, u_φ.

На границах склейки слоев перемещения непрерывны. На торце пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев ($\psi_r = 0$ при $r = r_0$), но не мешающих деформированию из своей плоскости.

Постановка задачи проводится в цилиндрической системе координат r, φ, z. Срединную плоскость заполнителя примем за координатную, ось z направим ей перпендикулярно вверх, к слою 1. В этом случае перемещения в слоях выражаются через пять искомых функций u_r, u_φ, ψ_r, ψ_φ, w:

$$u_r^{(1)} = u_r + c\psi_r - zw,_r\,;\; u_r^{(2)} = u_r - c\psi_r - zw,_r\,;$$

$$u_\varphi^{(1)} = u_\varphi + c\psi_\varphi - \frac{z}{r}w,_\varphi\,;\; c \le z \le c + h_1\,;$$

$$u_\varphi^{(2)} = u_\varphi - c\psi_\varphi - \frac{z}{r}w,_\varphi \quad -c \le z \le c\,;$$

$$u_r^{(3)} = u_r + z\psi_r - zw,_r\,;\; u_\varphi^{(3)} = u_\varphi + z\psi_\varphi - \frac{z}{r}w,_\varphi\,;\; -c - h_2 \le z \le -c\,.$$

где z – расстояние от рассматриваемого волокна до срединной плоскости заполнителя, запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.

Уравнения равновесия рассматриваемой платины в усилиях получены с помощью принципа возможных перемещений Лагранжа.

$$T_{rr,r} + \frac{1}{r}(T_{rr} - T_{\varphi\varphi}) + \frac{1}{2r}T_{r\varphi,\varphi} = -p_r\,,$$

$$H_{rr,r} + \frac{1}{r}(H_{rr} - H_{\varphi\varphi}) - Q_r - \frac{1}{2r}H_{r\varphi,\varphi} = 0$$

$$M_{rr,rr} + \frac{1}{r}(2M_{rr,r} - M_{\varphi\varphi,r}) + \frac{1}{r^2}M_{\varphi\varphi,\varphi\varphi} - \frac{1}{2r}M_{r\varphi,\varphi r} + \frac{1}{2r}M_{r\varphi,r\varphi} + \frac{1}{r^2}M_{r\varphi,\varphi} = -q$$

$$T_{r\varphi,r} + \frac{2}{r}T_{\varphi\varphi,\varphi} + \frac{2}{r}T_{r\varphi} = -p_\varphi\,,$$

$$H_{r\varphi,r} + \frac{2}{r}H_{\varphi\varphi,\varphi} + \frac{2}{r}H_{r\varphi} - 2Q_\varphi = 0\,.$$

Если в этой системе выразить все внутренние усилия через пять искомых функций и добавить к ней граничные условия, то получим замкнутую краевую задачу для нахождения решения.

Уравнения равновесия в частных производных рассматриваемой пластины при неосесимметричном деформировании в своей плоскости будут следовать из этой системы, если положить $\psi_r = \psi_\varphi = w = 0$. В результате

$$(a_5 + a_2)\frac{u_{r,\varphi r}}{r} + (a_5 + a_1)\frac{u_{r,\varphi}}{r^2} + a_5(u_{\varphi,rr} - \frac{u_\varphi}{r^2}) + a_1\frac{u_{\varphi,\varphi\varphi}}{r^2} = -p_\varphi\,,$$

$$(a_2 + a_5)\frac{u_{\varphi,r\varphi}}{r} - (a_1 + a_5)\frac{u_{\varphi,\varphi}}{r^2} + a_1(u_{r,rr} + \frac{u_{r,r}}{r} - \frac{u_r}{r^2}) + a_5\frac{u_{r,\varphi\varphi}}{r^2} = -p_r\,,$$

где запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате, коэффициенты a_i определяются интегральными соотношениями, так как модули упругости материалов в слоях изменяются по их толщине вместе с температурой:

$$a_1 = \sum_{k=1}^{3} K_{k0}\,,\; a_2 = K_{32} + c^2(K_{10} + K_{20})\,,\; a_5 = \int_{h_3} G_3 dz\,,\; a_6 = c(K_{10} - K_{20})\,,$$

$$K_{km} = \int_{h_k} [K_k(T) + \frac{4}{3}G_k(T)]z^m dz \;\; (m = 0,\, 1,\, 2).$$

Добавив к этим уравнениям принятые граничные условия, получим замкнутую краевую задачу для нахождения тангенциальных и радиальных перемещений в задаче о неосесимметричном деформировании трехслойной пластины в своей плоскости.

Так как уравнения равновесия не включают температуру T, то ее воздействие скажется на модулях упругости, входящих в коэффициенты $a_1, \ldots, a_5$ и в соотношения связи напряжений и деформаций.

Зависимость модулей упругости от температуры описывает формула Белла:

$$\{G(T),\, K(T),\, E(T)\} = \{G(0),\, K(0),\, E(0),\, E(0)\}\,\varphi(T)\,,$$

$$\varphi(T) = \begin{cases} 1, & 0 < T / T_m \le 0{,}06, \\ 1{,}03(1 - T/(2T_m)), & 0{,}06 < T / T_m \le 0{,}57, \end{cases}$$

где T_m – температура плавления материала; $G(0)$, $K(0)$, $E(0)$ – значения модулей, которые можно определить, зная G_0 при некоторой температуре, тогда $G(0) = G_0 / \varphi(T_0)$.

Заметим, что при более высоких сходственных температурах $T/T_m > 0{,}57$ возможно малое отклонение поведения материала от линейного закона (3.4).

Закон Гука с учетом температуры принимаем в виде

$$S_x^{'(k)} = 2G_k(T)э_x^{'(k)},$$

$$\sigma^{'(k)} = 3K_k(T)(\varepsilon^{'(k)} - \alpha_{0k}T) \ \ (k = 1, 2),$$

где $S_x^{'(k)}, \sigma^{'(k)}, э_x^{'(k)}, \varepsilon^{'(k)}$ – девиаторные и шаровые части тензоров напряжений и деформаций k-го слоя; $G_k(T)$, $K_k(T)$ – температурно-зависимые модули сдвига и объемного деформирования; α_{0k} – коэффициент линейного температурного расширения материала.

УДК 624.012.41:624.21.037

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКОВ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ И ПУТЕПРОВОДОВ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ ЖИДКИХ СРЕД

А. В. СТЕПАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Обеспечение надежной работы железобетонных конструкций инженерных сооружений в течение всего срока службы является важной составной частью проблемы долговечности. Безопасность конструкций, согласно нормативным документам, формулируется в виде ограничений на ресурс или срок службы из-за физического старения, воздействия агрессивной среды, нагрузок и т. д. Поэтому в основе главных нормативных документов, касающихся проектирования строительных конструкций (СНБ 5.03.01 [1], СТБ ISO 2394 [2], ТКП ЕН 1990 [3]), лежит требование: конструкции и конструктивные элементы следует проектировать и изготавливать таким образом, чтобы их можно было безопасно эксплуатировать на протяжении всего расчетного срока службы с минимальными экономическими затратами.

По данным натурных обследований, анализа проектных материалов и экспертного опроса специалистов установлено, что воздействию агрессивных, в том числе хлоридсодержащих, сред подвергается до 75 % инженерных конструкций и сооружений. Главным фактором разрушения бетона при хлоридном загрязнении является коррозия арматуры, инициируемая и ускоряемая применением солей-антиобледенителей, содержащих хлориды. Большую опасность представляет хрупкое коррозионное разрушение преднапряженной арматуры, так как такой вид коррозии зачастую не имеет видимых признаков разрушения.

Существующие в настоящее время методы расчета железобетонных конструкций мостов и путепроводов не дают однозначного количественного ответа ни о долговечности, ни об остаточном сроке служб железобетонных конструкций мостов и путепроводов, что не гарантирует безопасность железобетонных конструкций во время эксплуатации.

Для прогнозирования срока службы железобетонных конструкций при воздействии хлоридсодержащих жидких сред разработана методика, основанная на вероятностной модели. Рассчитываются периоды инициирования и распространения коррозии арматуры и сравниваются с проектируемым сроком эксплуатации. Вероятность окончания периода инициирования конструкции определяется тем, что на глубине залегания арматуры фактическое содержание хлоридов превысит критическое. Вероятность окончания периода распространения определяется вероятностью того, что прочность бетона на растяжение превысит расчетные растягивающие напряжения в бетоне.