

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БЕТОНА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ ПРИ КАПИЛЛЯРНОЙ УСАДКЕ ПО ОБОБЩЕННОМУ КРИТЕРИЮ

ЛЕОНОВИЧ С.Н.

Белорусский национальный технический университет

1. Определение основных характеристик трещиностойкости бетона на любом уровне его иерархического строения

Коэффициенты интенсивности напряжений в вершине трещиновидного дефекта в материале, структура которого содержит другие микро- и макроповреждения, отражают в своем численном значении влияние этих повреждений на напряженно-деформированное состояние как вокруг дефекта, так и всего объема материала. Учесть это суммарное влияние возможно, рассмотрев все микро- и макродефекты на всех уровнях иерархического строения композита. Каждая из пор и трещин в бетоне создает некое поле напряжений вокруг себя. Если считать, что эти поры и трещины располагаются в объеме бетона с некоторой периодичностью, поля напряжений и деформаций накладываются друг на друга, что создает сложное напряженно-деформированное состояние. Базируясь на рассмотренных выше [1,2] закономерностях процесса разрушения бетона, разделим все дефекты структуры, как исходные, так и развившиеся в результате силовых и не силовых воздействий, на пять основных видов:

1 – округлые пустоты – поры с выходящими на их границы субмикротрещинами, образовавшимися в результате концентрации напряжений вокруг кругового отверстия;

2 – эллипсовидные пустоты – поры с выходящими на их границы микротрещинами;

3 – мезотрещиновидные дефекты в теле бетона (тип I);

4 – краевые трещиновидные дефекты (тип II);

5 – радиальные и контактные трещины вокруг зерен и включений (типы III и IV).

Содержание пустот – пор и трещин видов 1...4 зависит от пористости бетона, а вида 5 – и от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя, причем эти трещины на границе цементного камня и зерен заполнителя характеризуют мезо- и макро-

уровень рассмотрения структуры бетона. Объемное содержание каждого вида пустот – пор и трещин в зависимости от пористости материала и объемного содержания заполнителя определяется экспериментально. Каждому виду повреждений соответствует свое значение коэффициента интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависит от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона. Применяя принцип независимости действия сил и считая, что пустоты – поры и трещины распределены равномерно по всему объему материала, можно записать:

– для субмикро, микро- и мезоуровней

$$K_I = n_1 K_I^1 + n_2 K_I^2 + n_3 K_I^3 + (1 - n_1 - n_2 - n_3) K_I^4, \quad (1)$$

где $K_I^1, K_I^2, K_I^3, K_I^4$ – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в вершинах микродефектов I, 2, 3 и 4 вида; n_1, n_2, n_3 – содержание микродефектов 2 и 3 видов в общем количестве микроповреждений;

– для мезо- и макроуровней

$$K_I = n_1 K_I^1 + n_2 K_I^2 + n_3 K_I^3 + n_4 K_I^4 + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) K_I^5, \quad (2)$$

где K_I^5 – коэффициент интенсивности напряжений в вершинах радиальных и контактных трещин на границе с зернами мелкого и крупного заполнителей; n_4 – содержание краевых трещин в общем количестве повреждений.

Величины $K_I^1 \dots K_I^5$ вычисляются по таблице в зависимости от содержания пустот – пор и трещин данного вида в общем количестве повреждений. Тогда окончательно:

– для субмикро-, микро- и мезоуровней

$$K_I = p\sqrt{\pi} \left\{ n_1 A \sqrt{L_1 (1 + R / (R + L_1))} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + (1 - n_1 - n_2 - n_3) D \sqrt{L_4} \right\}, \quad (3)$$

где $R = 5 \cdot 10^{-7}$ м, $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ м, $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ м, $L_3 = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $L_4 = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $a = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $L_1 \dots L_4$ – полудлина (длина) дефектов или пустот – пор, A, B, C, D – коэффициенты, приведенные в таблице над чертой;

– для мезо- и макроуровней

$$K_I = p\sqrt{\pi} \left\{ n_1 A \sqrt{L_1 (1 + R/(R + L_1))} + n_2 B \sqrt{a + L_2} + n_3 C \sqrt{L_3} + n_4 D \sqrt{L_4} + (1 - n_1 - n_2 - n_3 - n_4) E \sqrt{L_5/2} \right\}, \quad (4)$$

где $R = 5 \cdot 10^{-7}$ м, $L_1 = 1 \cdot 10^{-8}$ м, $L_2 = 1 \cdot 10^{-8}$ м, $L_3 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $L_4 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $L_5 = D_{\max}^{ag}$, $a = 5 \cdot 10^{-6}$ м; D_{\max}^{ag} – максимальный диаметр зерна мелкого или крупного заполнителя в матрице или бетоне; L_5 – длина радиальной трещины; E – коэффициент, приведенный в таблице над чертой.

Величину K_{II} можно определить по коэффициентам C, D и E , приведенным в таблице под чертой. Отметим, что сдвиговые напряжения в вершинах пустот – пор типов 1 и 2 не возникают. Тогда на субмикро-, микро- и мезоуровнях

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + (1 - n_3) K_{II}^4, \quad (5)$$

– на мезо- и макроуровнях

$$K_{II} = n_3 K_{II}^3 + n_4 K_{II}^4 + (1 - n_3 - n_4) K_{II}^5, \quad (6)$$

где характерные размеры трещин 3...5 принимаются для каждого из уровней рассмотрения в соответствии с (1) и (2).

Константу материала K_C определяем по формуле

$$K_C = \sqrt{\sum K_I^2 + \sum K_{II}^2}. \quad (7)$$

2. Алгоритм расчета трещиностойкости (долговечности) бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию

Разработан метод расчета долговечности бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке с использованием подходов механики разрушения, который опирается на концепцию накопления

дефектов в структуре в виде пор, капилляров и трещин до их критической концентрации C_c . При этом рассматривается процесс на двух стадиях: на первой – процесс образования и развития дефектов и на второй – процесс, непосредственно сопровождающий разрушения (фрагментацию) при критической концентрации дефектов. В качестве теоретической основы метода приняты физические представления о механизме приращения объема пустотности трещин в модели бетона, представленной как двухуровневая структура: матрица твердеющего цементного камня с включениями и пустоты различной формы (трещины) как результат внешних воздействий, изменяющих напряженно-деформированное состояние.

Установлен основной расчетный критерий метода – обобщенный суммарный параметр трещиностойкости $K_c = \sqrt{K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2}$, вычисляемый на основании модельных схем развития, объединения, локализации системы трещин, их классификации по видам и относительному количеству в объеме при начальной концентрации, возрастающей до критической, что обусловлено капиллярной усадкой.

Алгоритм расчета трещиностойкости при усадке содержит последовательность операций как для подбора состава по известным влияющим на капиллярное давление факторам и характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам в раннем возрасте, так и для определения остаточного ресурса бетона по образцам, отобранным из конструкций в раннем возрасте в условиях твердения.

Алгоритм включает в себя:

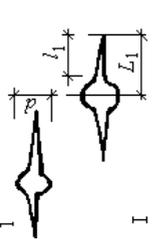
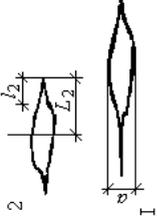
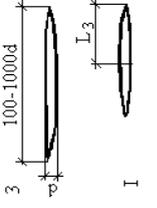
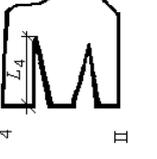
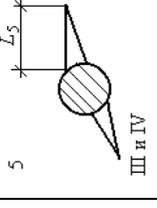
1. Исходные данные о проектных параметрах внешних воздействий: силовых (N, M, Q) и несиловых (t, W, P) воздействий; о характеристиках компонентов бетона: цемента (R_c), заполнителя (R_a), химических добавок.

2. Данные о свойствах бетона, его прочности R_b и R_{br} , упругости E_b , трещиностойкости R_{crc}^0 и R_{crc}^v в раннем возрасте.

3. Операции по расчету пустотности бетона (общей, капиллярной, гелевой, содержанию воздуха).

4. Операции по расчету K_{Ii}^b, K_{IIi}^b в вершинах дефектов I – V вида при капиллярной усадке.

Таблица 1 – Коэффициенты интенсивности напряжений с учетом содержания пустот, капилляров, трещин в цементном камне

Содержание пор $n_1 \dots n_5, \%$	1		2		3		4		5	
										
	I		I		I		II		III и IV	
	$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_1 (1+d/L_1)}$		$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi_1 (a+l_2)}$ $K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_2 (1+d/L_2)}$		$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_3}$ $K_{IIIC} = C \tau_e \sqrt{\pi l_3}$		$K_{IC} = \sigma_e \sqrt{\pi l_4}$ $K_{IIIC} = D \tau_e \sqrt{\pi l_4}$		$K_I = \sigma_e \sqrt{\pi l_5 / 2}$ $K_{IIIC} = E \tau_e \sqrt{\pi l_5 / 2}$	
	A		B		C		D		E	
5	1,733		1,0550		1,0122/1,0205		0,2303/0,2004		0,643/0,060	
10	1,912		1,1003		1,0212/1,0417		0,3116/0,1997		0,651/0,061	
15	2,067		1,2794		1,0480/1,0630		0,3992/0,1901		0,657/0,063	
20	2,235		1,4212		1,0647/1,0890		0,4570/0,1762		0,682/0,068	
25	2,506		1,6517		1,1010/1,1812		0,5640/0,1592		0,701/0,072	
30	2,973		1,8432		1,1535/1,2810		0,6810/0,1446		0,793/0,081	
35	3,084		2,0020		1,4032/1,4216		0,7632/0,1410		0,854/0,087	
40	3,512		2,1760		1,5547/1,5732		0,8720/0,1337		0,892/0,092	

1.	Исходные данные: а) проектные параметры внешних силовых (N, M, Q) и весовых (L, W, P, концентрация химических веществ) воздействий; б) характеристики компонента цемента (R _c), заполнителя (R _з), заполнителя (R _з), химических добавок. Требуемый (проектный) срок службы.
2.	Расчет (подбор) состава бетона по прочности (R, R _{кв}), деформативности (E _в) и трещиностойкости R _{тр} ⁰ .
3.	Расчет по выбранному составу бетона его пустотности; общей, гелевой, капиллярной, дифференциальной пористости цементного камня и бетона по формулам табл.
4.	Расчет коэффициентов интенсивности напряжений КИН в вершинах дефектов I-V вида при усадке (температурно-влажностных воздействиях)
I температурный диапазон (вода)	$K_{1,t}^{I,1,e} = \frac{4\sqrt{\pi} \cdot a_c \cos \theta \cdot \sigma_0 (1-t/t_k)}{\sqrt{2} \cdot g_c \sqrt{l_c} \left[1 - (1-W/100)^2 \right]}; \quad K_{1,t}^{I,1,w} = \alpha_{t,c,w} \Delta E_{w,c} \sqrt{\pi l_c} / 2 \left[1 - (2/\pi) \arcsin(2b_c/l_c) \right]$ $K_{1,t}^{I,1,e,s} = \alpha_{t,c,s} \Delta E_{e,s} \sqrt{\pi l_c} / 2; \quad K_{1,t}^{I,1,e,m} = P_c \sqrt{2} / \sqrt{\pi(l_c^2 - 4b_c^2)};$ $K_{1,t}^{I,1,w,m} = \alpha_{t,c,w} \Delta E_{w,c} \sqrt{\pi l_c} / 2\pi \left[(\pi/2) - \arcsin(2b_c/l_c) \right];$ $K_{1,t}^{II,1,w} = 2 P_w \sqrt{l_c} / \pi \arccos(b_c/l_c) \left[1 + 0,1215(1 - b_c/l_c) \right]; \quad K_{1,t}^{II,1,e,s} = 3,523 \alpha_{t,c,s} \Delta E_{e,s} \sqrt{l_c} / \pi$
Для трещины на контакте с заполнителем	
$K_{1,t}^{III} = P \sqrt{\pi l_c} \left\{ \frac{1 - \alpha_t(r) f(l/R)(M-R)^2}{[(M-R)^2 - r^2]} \right\} (1+g);$ $K_{1,t}^{IV} = 2p(1+\alpha)^{-1} \sqrt{\pi R} \sin \theta \left\{ G_2(1+X_1) \left[G_1(1+X_2) + G_2(1+X_1) \right] e^{\beta(0+\pi)} \right\} / \left\{ (G_2 + G_1 X_2) \left[G_1(1+X_2) + 2G_2(1+X_1) \right] \right\};$ $- G_1(1+X_2) \left(G_1 + G_2 X_1 \right) \left(\cos \theta - 2\beta \sin \theta \right) e^{-2\beta \theta} \left. \right\}$ $K_{1,t}^{IV} = 2 p R^\beta (1+\alpha)^{-1} \sqrt{\pi R} \sin \theta \left\{ G_2(1+X_1) \left[G_2(1+X_1) + G_1(1+X_2) \right] \left(1 - 2\beta \right) e^{\beta(0+\pi)} \right\} / \left\{ (G_2 + G_1 X_1) \left[G_1(1+X_2) + 2G_2(1+X_1) \right] \right\} -$ $- G_1(1+X_2) \left(G_1 + G_2 X_1 \right) \left(\cos \theta - 2\beta \sin \theta \right) e^{-2\beta \theta} \left. \right\}$	

Рис. 1. (начало) Алгоритм расчета трещиностойкости (долговечности) бетона в раннем возрасте изготавливаемых конструкций при капиллярной усадке

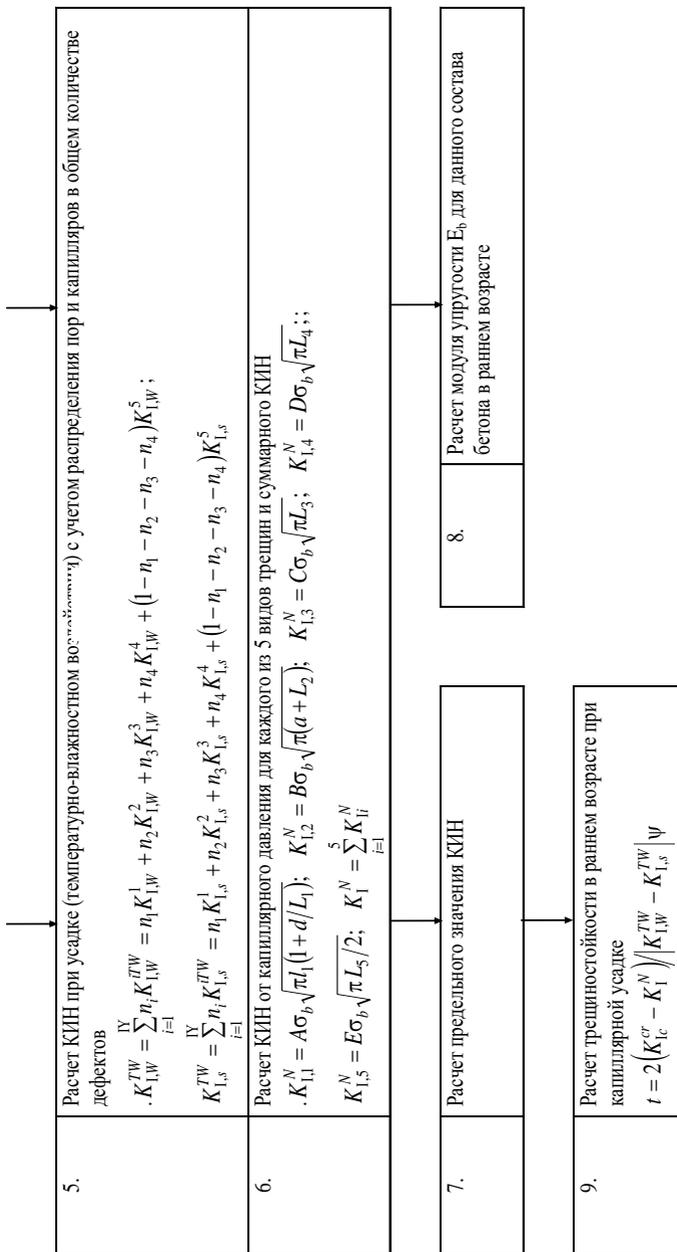


Рис. 1. (окончание) Алгоритм расчета трещиностойкости (долговечности) бетона в раннем возрасте изготавливаемых конструкций при капиллярной усадке

5. Операции по расчету критерия КИН при усадке (температурно-влажностных воздействиях) с учетом распределения пор и капилляров в общем количестве дефектов.

6. Расчет предельного значения КИН для данного состава.

7. Расчет модуля упругости E_b для данного состава.

8. Расчет долговечности бетона с учетом усадки (термовлажностных воздействий).

9. Операции оценки результата и корректировки состава.

Выводы

1. При теоретическом обосновании метода расчета трещиностойкости при капиллярной усадке бетона в раннем возрасте с использованием подходов механики разрушения по обобщенному критерию сформулированы основные допущения.

2. Разработанная модель является иерархической системой, пригодной для описания процессов разрушения (деструкции) бетона в раннем возрасте на любых уровнях рассмотрения его структуры. Введя соответствующие характеристики для материалов заполнителя и цементно-песчаного раствора, можно получить деформативные, прочностные характеристики, параметры развивающихся трещин для бетона в случае изменения его влажности и температуры (при усадке).

3. Базируясь на рассмотренных закономерностях процесса разрушения бетона, предложено разделить все дефекты структуры, как исходные, так и развившиеся в результате силовых и несиловых воздействий, на 5 основных типов. Содержание пор и трещин первых четырех типов зависит от пористости бетона, а типа V – и от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя. Каждому виду повреждений соответствует свой коэффициент интенсивности напряжений, степень влияния и величина которого на общую трещиностойкость материала зависят от количества данного вида пор и трещин в объеме бетона.

4. Предложен новый научно обоснованный алгоритм расчета трещиностойкости при усадке бетона в раннем возрасте по обобщенному критерию, который содержит последовательность операций расчета как для целей подбора состава с учетом влияющих на капиллярное давление факторов и по характеристикам свойств компонентов бетона, его технологическим параметрам, так и для опре-

деления остаточного ресурса бетона по его составу и свойствам, а также по образцам, отобраным из конструкций в раннем возрасте.

Список литературы

1. Леонович, С.Н. Моделирование капиллярной усадки и трещинообразование бетона в раннем возрасте / Наука и техника. – 2017. – № 4. – с.
2. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при коррозионных и температурных воздействиях: монография в 2 ч. / С.Н. Леонович [и др.], под ред. С.Н. Леоновича. – Минск : БНТК, 2016. – 597 с.
3. Leonovich S. The influence of carbon dioxide on the durability of offshore concrete structures / S. Leonovich, E. Shalyi, N. Falaleeva, L. Kim // 26 (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-2016, Rhodes, Greece, June 26 – July 1, 2016.
4. Leonovich S. Frost destruction and fracture mechanics of concrete / S. Leonovich, Yu. Zaitsev, V. Tsuprik, L. Kim // Полярная механика: материалы третьей междунар. конф., 27-30 сентября 2016, Владивосток [Электронный ресурс] / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ, – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. [1096 с.]. – 1 CD. – Систем. требования: процессор с частотой 1,3 ГГц (Intel, AMD); оперативная память от 1 ГБ, Windows (XP; Vista; 7 и т.п.); Acrobat Reader; Foxit Reader либо любой другой их аналог. – ISBN 978-5-7444-3795-4; ISSN 2500-3542. – с. 687-693.
5. Снежков, Д.Ю. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами: монография / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2016. – 331 с.
6. Снежков Д.Ю. Контроль железобетонных конструкций неразрушающими методами: монография [Электронный ресурс] / Д.Ю. Снежков, А.Т. Беккер, С.Н. Леонович, Л.В. Ким // Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальвост. федерал. ун-т, 2016. – 137 с. – 1 CD. – Систем. требования: процессор с частотой 1,3 ГГц (Intel, AMD); оперативная память от 1 ГБ, Windows (XP; Vista; 7 и т.п.); Acrobat Reader; Foxit Reader либо любой другой их аналог. – ISBN 978-5-7444-3794-7.

7. Зайцев, Ю.В. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии: монография / Ю.В. Зайцев, С.Н. Леонович, У. Шнайдер. – Минск: БНТУ, 2011. – 382 с.

8. Эберхардштайнер, Й. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии: монография / Й. Эберхардштайнер, С.Н. Леонович, Ю.В. Зайцев. – Минск: БНТУ, 2013. – 522 с.

9. Леонович, С.Н. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при воздействии высоких температур: монография / С.Н. Леонович, Д.А. Литвиновский, Л.В. Ким / Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2015. – 148 с.

10. Двухсолитонное решение задачи о разупрочняющемся стержне / Г.В. Земляков, М.А. Князев, Е.Е. Трофименко, С.Н. Леонович // Доклады НАН Беларуси, т.56, №3, 2012. – 3 с.