УДК 624. 012:53.09

С.Л. Фомін, Касем Шейхмус, О.І. Давиденко[1], В.Г. Поклонський[1]
Харківський національний університет будівництва та архітектури,
[1]Державне підприємство
"Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій"

МІЦНІСНІ ТА ДЕФОРМАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ ЗА ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

© Фомін С.Л., Шейхмус Касем, Давиденко О.І., Поклонський В. Г., 2013

Розроблено методику визначення критерію несучої здатності бетону $\varepsilon_{cu1,\theta}$ для розрахунку вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій будівель, на основі якої уточнені, наведені в Єврокоді EN 1994-1-2:2005 та ДСТУ-Н-П Б В.2.6-159: 2010, дані про міцнісні і деформаційні властивості бетону за підвищених температур.

Ключові слова: сталезалізобетон, вогнестійкість, діаграма деформування бетону, параметри $\varepsilon_{cu,\theta}$ і $\varepsilon_{cc,\theta}$, потенціал навантаження, корегування даних для розрахунку.

The method of determination of bearing capacity of concrete criteria $\varepsilon_{cu1,\theta}$ to calculate the fire resistance of composite structures of buildings, from which refined given in Eurocode EN 1994-1-2:2005 and DSTU-N-P B.2.6 B-159: 2010, data on strength and deformation properties of concrete at elevated temperatures.

Key words: composite steel and concrete, fire resistance, stress-strain diagram of concrete, parameters $\varepsilon_{cu,\theta}$, and $\varepsilon_{cu,\theta}$ load capacity.

Постановка проблеми

Сьогодні за замовленням Мінрегіонбуду України ДП ДНДІБК за участі ХНУБА розроблені національні норми ДБН В.2.6-160: 2010 з проектування сталезалізобетонних конструкцій [1], які чинніі від 2011-09-01 і стандарт ДСТУ-Н-П Б В. 2.6-159: 2010 [2] за розрахунком стале залізобетонних конструкцій на вогнестійкість, які чинніі від 2012-01-01. Підготовлено проект стандарту ДСТУ-Н П Б В.2.6-ХХ: 20ХХ з проектування залізобетонних конструкцій. Вогнестійкість. Гармонізований з EN 1992-1-2:2004 [3]. Практика проектування показала недоліки наведених в EN 1992-1-2:2004 [5] і ENV 1992-1-2:1995 Eurocode 2 [6] міцності та деформаційних властивостей бетону за підвищених температур, які в процесі гармонізації відбилися у національних стандартах.

Аналіз останніх досліджень

У дослідженні [4] розроблено методику визначення критерію несучої здатності бетону $\varepsilon_{cu1,\theta}$ для розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій будівель, на основі якої уточнені, наведені в Єврокодах EN 1992-1-2:2004 і ENV 1992-1-2:1995 Eurocode 2, дані про характеристики міцності та деформаційні властивості бетону за підвищених температур. Стандарт ДСТУ-Н-П Б В.2.6-159: 2010 [2], гармонозірований з EN 1994-1-2:2005 [7], посилив помилкову концепцію зазначених Єврокодів, що запропонував лінійну апроксимацію низхідних гілок діаграми деформування бетону з силікатним заповнювачем за підвищених температур.

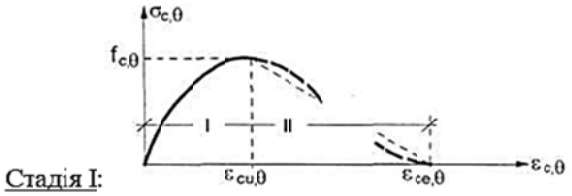
Мета роботи – визначити критерій несучої здатності бетону під час розрахунку вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій з використанням запропонованої у EN 1994-1-2:2005 математичної моделі співвідношення "напруження-деформації" бетону за стиснення і підвищених температур.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Результати виконаних теоретичних досліджень

У розділі 3 стандарту [2] зазначено, що міцність і механічні властивості бетону за підвищених температур можуть бути визначені за залежностями «напруження – деформації», наведеними в EN 1992-1-2 [5], та як показано на рис. 3.2. Залежності «напруження – деформації» визначаються двома параметрами: міцністю на стиск $f_{c,\theta}$ і деформацією $\varepsilon_{cu,\theta}$, що відповідає $f_{c,\theta}$.

У табл. 3.1 [2] наведені значення коефіцієнта зниження $k_{c,\theta}$ для f_c за підвищеної температури бетону θ_c, щоб визначити $f_{c,\theta}$ та деформацію $\varepsilon_{cu,\theta}$.



Стадія I:

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta}\left[3\left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}}\right)\Big/\left\{2+\left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}}\right)^3\right\}\right]$$

$$\left.\begin{matrix} k_{c,\vartheta} = \dfrac{f_{c,\theta}}{f_c} \\ \varepsilon_{cu,\theta} \end{matrix}\right\} \text{значень приймати з таблиці 3.3}$$

Стадія II: - Низхідна ділянка має бути прийнята для числових методів розрахунку

Рис. 1 [2]. Математична модель співвідношень "напруження-деформації" бетону за стиску та підвищених температур

Отже, з одного боку, є пряме посилання на EN 1992-1-2, в якому наведені значення деформації $\varepsilon_{c1,\theta}$, що відповідає $f_{c,\theta}$, і деформації $\varepsilon_{cu1,\theta}$, що відповідає кінцю спадної гілки, з іншого, – пропонується замінити деформації $\varepsilon_{c1,\theta}$ деформаціями $\varepsilon_{cu,\theta}$, а деформації $\varepsilon_{cu1,\theta}$ – деформаціями $\varepsilon_{ce,\theta}$ (максимальними деформаціями під час пожежі (див. с. 17 ДСТУ [2]) (рис. 1).

Крім того, у додатку В запропоновані співвідношення "напруження-деформації" для бетону з силікатного заповнювача за підвищених температур. Діаграми "напруження-деформації" для бетону з силікатного заповнювача і лінійно низхідною ділянкою показано на рис. В.1 додатка до максимальної деформації $\varepsilon_{ce,\theta}$ = 4,75 %. Воно відповідає математичному формулюванню, показаному на рис. 1, та даним табл. 1 [2]. Допустимий діапазон та рекомендовані значення деформації $\varepsilon_{cu,\theta}$ для $f_{c,\theta}$ (рис. 1) запропоновано отримати з табл. В.1.

Табл. В.1. нічим не відрізняється від табл. 3.1 EN 1992-1-2 [5] для звичайного бетону на силікатному заповнювачі, крім того, що у ній деформації εс1, θ (другий стовпець) замінені деформаціями $\varepsilon_{cu,\theta}$, а деформації $\varepsilon_{cu1,\theta}$, – деформаціями $\varepsilon_{ce,\theta}$ (третій стовпчик).

Зауважимо, що у наведених таблицях і графіках відносні деформації мають різні розмірності. Наприклад, у табл. 1 [2] для температури θ_c, =20 °С $\varepsilon_{cu,\theta} = 2{,}5\cdot10^{-3}$, у табл. В.1 $\varepsilon_{cu,\theta} = 2{,}5\cdot10^{3}$, на рис. В. 1 $\varepsilon_{cu,\theta}$ = 0,25 %, на рис. В. $\varepsilon_{cu,\theta}$ = 2,5 ‰, в EN 1992-1-2 $\varepsilon_{c1,\theta}$ = 0,0025.

Це створює додаткові проблеми для проектантів. Слід, на наш вигляд, орієнтуватися на основний документ ДБН В.2.6-98 [8], в якому відносні деформації вимірюються у промілях (табл. 1 [8]). Основні параметри $f_{c,\theta}$ і $\varepsilon_{cu,\theta}$ співвідношення "напруження-деформації" для звичайного бетону на силікатному заповнювачі за підвищених температур і легкого бетону показано на рис. В.2 додатка. Вказується, що міцність на стиск $f_{c,\theta}$ і відповідна деформація $\varepsilon_{cu,\theta}$ повністю визначають стадію I моделі матеріалу разом з рівняннями рис. 1 (табл. 1).

У [4] проведено порівняння діаграми за ДБН В.2.6-98 [8] за нормальної температури з аналогічною діаграмою стандарту [3], яке показує істотне завищення $\varepsilon_{cu1,\theta=20°} = 0{,}0200 = 20$ ‰.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Таблиця 1

Значення двох головних параметрів діаграми "напруження-деформації" звичайного бетону (ЗБ) та легкого бетону (ЛБ) за підвищених температур

Температура бетону θ_c, °С	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_c$		$\varepsilon_{cu,\theta} \cdot 10^{-3}$ Звичайний бетон
	звичайний бетон	легкий бетон	
20	1	1	2,5
100	1	1	4,0
200	0,95	1	5,5
300	0,85	1	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	-

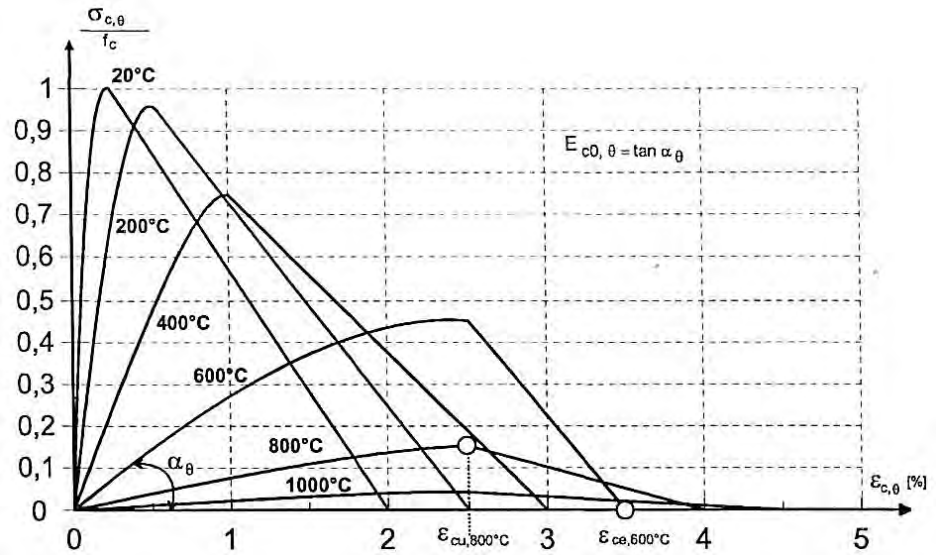


Рис. 2 [2]. Діаграми "напруження-деформації" для бетону з силікатним заповнювачем з лінійно низхідною ділянкою, включаючи рекомендовані значення $\varepsilon_{cu,\theta}$ та $\varepsilon_{ce,\theta}$ з табл. В.1

Це значення $\varepsilon_{cu1,\,\theta=20}$ відповідає кінцю низхідної гілки діаграми за температури 20 °С під час випробування на спеціальних пресах, забезпечених нагрівальним пристроєм і сервоконтролем тиску у циліндрі преса, що дає змогу пройти по низхідній гілці фактично до нульового напруження.

Отже, значення деформацій у шпальтах 4 і 7 табл. 1 [3] не є граничними деформаціями бетону $\varepsilon_{cu1,\,\theta}$.

Граничні відносні деформації бетону $\varepsilon_{cu1,\,\theta=20^\circ}$ використовуються як критерій несучої здатності стисненого бетону і знаходяться у межах 2,4 ...4,5, що відповідає появі магістральної тріщини руйнування бетону зразка.

Вважається, що після рівнів напружень 0,5 – 0,8 $f_{c,\ \theta=20^\circ}$ спадна гілка являє собою вже не область деформування цільного бетонного зразка, а область деформування окремих частин роздробленого бетону. У більшості зарубіжних норм граничні деформації для крайніх фібр стисненого бетону приймаються на рівні 3,0 ... 3,5 $^0/_{00}$.

Для проведення пружних і непружних розрахунків вогнестійкості у програмних комплексах потрібні значення модулів пружності стисненого $E_{c,\theta}$ і розтягненого $E_{tc,\theta}$ бетону, деформацій $\varepsilon_{c1,\theta}$, $\varepsilon_{tc1,\theta}$, що відповідають міцності на стиск $f_{c,\theta}$ та на розтяг $f_{tc,\theta}$, граничних деформацій $\varepsilon_{cu,\theta}$, $\varepsilon_{tcu,\theta}$ і

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

відповідних їм граничних напружень $\sigma_{cu,\theta}$ і $\sigma_{tcu,\theta}$. Дійсні граничні деформації $\varepsilon_{cu1,\theta}$ визначені на підставі енергетичного підходу і наведені у скоригованій таблиці у [4].

Таблиця В.1 [2]

Параметри $\varepsilon_{cu,\theta}$ та $\varepsilon_{ce,\theta}$, що визначають рекомендований діапазон низхідної ділянки для співвідношень "напруження-деформації" бетону за підвищених температур

Температура бетону θ_c, °С	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_c$		$\varepsilon_{cu,\theta} \cdot 10^{-3}$ Звичайний бетон
	Звичайний бетон	Легкий бетон	
20	1	1	2,5
100	1	1	4,0
200	0,95	1	5,5
300	0,85	1	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	-

Скористаємося розробленою методикою для визначення дійсних граничних деформацій $\varepsilon_{cu1,\theta}$ енергетичним підходом, який вже успішно застосовувався для аналогічних досліджень [9].

Для цього побудуємо залежності потенціалу навантаження від величини діючого зусилля – множення зусилля на переміщення на цьому етапі навантажування згідно з [10, 11]. Відповідно до повних діаграм стисненого бетону, побудованих у безрозмірних координатах «$\sigma_{c,\theta}/f_{ck} - \varepsilon_c$» з діаграм (рис. В.1) і табл. В.1, були отримані низхідні гілки діаграми деформування бетону з силікатним заповнювачем за підвищених температур (рис. 1). Значення відносного потенціалу навантаження приведено до вигляду:

$$\hat{W} = \frac{P \cdot \varepsilon \cdot l}{P_{f_{c,\theta}} \cdot \varepsilon_{f_{c,\theta}} \cdot l}, \tag{1}$$

де P, ε – поточні значення навантаження і деформацій; $P_{fc,\theta}$, $\varepsilon_{c1,\theta}$ – значення навантаження і деформацій, що відповідають максимуму кривої «$\sigma_{c,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}$».

Розділивши значення P и $P_{fc,\theta}$ у чисельнику і знаменнику рівняння (1) на площу поперечного перерізу зразка (призми), можна отримати вираз відносного потенціалу навантаження через напруження:

$$\bar{W} = \frac{(\sigma_{c,\theta} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_c}{(f_{c,\theta} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_{c1,\theta}} . \tag{2}$$

Розрахунок проводиться у такій послідовності. З сімейства кривих на рис. 2 вибирається пряма з певною температурою «$\sigma_{c,\theta}/f_{ck} - \varepsilon_c$». Потім будується залежність відносного потенціалу навантаження W від відносних напружень $\bar{\sigma} = \sigma_{c,\theta} / f_{ck}$. Наприклад, для температури θ = 20 ° С за $f_{c,\theta}/f_{ck}$ =1 і $\varepsilon_{fc,\theta=20}$ =2,5 $^0/_{00}$ з (2) отримаємо розрахункову формулу

$$\bar{W} = \frac{(\sigma_{c,\theta} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_c}{(f_{c,\theta} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_{c1,\theta}} = \frac{(\sigma_{c,\theta} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_c}{(f_{c,\theta=20} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_{c1,\theta=20}} = \frac{(\sigma_{c,\theta} / f_{ck}) \cdot \varepsilon_c}{1 \cdot 2{,}5} . \tag{3}$$

Потім за цією формулою обчислюємо значення відносного потенціалу навантаження $\bar{W}$ від відносних напружень $\bar{\sigma} = (\sigma_{c,\theta}) / f_{ck}$ і деформацій ε_c за напрямом стиснення за температури 20 °С. Для θ=20 °С залежність відносного потенціалу навантаження від відносних напружень за напрямом стиснення за температури 20 °С показана на рис. 3. За цим графіком $\bar{W} = f(\bar{\sigma})$ визначаємо значення

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

напруження $\overline{\sigma}$ = 0,571, що відповідає екстремуму потенціалу навантаження W. Потім по діаграмі «$\sigma_{c,\theta}/f_{ck} - \varepsilon_c$» за темсператури 20 °С відшукується значення відносної деформації $\varepsilon_{cu1,\theta}$ = 10 $^0/_{00}$, за якої $\overline{\sigma}$ = 0,571 (рис. 2).

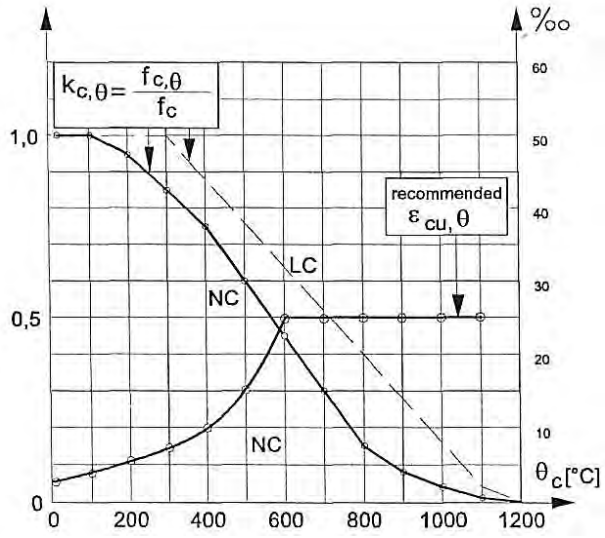


Рис. 3 [2]. Параметри співвідношень "напруження-деформації" за підвищених температур для звичайного (ЗБ) та легкого бетонів (ЛБ)

Аналогічно визначаються значення параметрів низхідних гілок діаграми "напруження-деформація" для бетону за інших температур.

Скориговані значення параметрів діаграми «$\sigma_{c,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}$» для бетонів на силікатному заповнювачі за підвищених температур наведені у таблиці і уточнена їх схема на рис. 4. Залежності деформацій $\varepsilon_{cu,\theta}$ ($\varepsilon_{c1,\theta}$), $\varepsilon_{cu1,\theta}$ і $\varepsilon_{ce,\theta}$ від температури показані на рис. 3.

Отже, розрахунки вогнестійкості можна проводити, використовуючи один з варіантів, запропонованих в розглянутому стандарті:

1. Міцність і механічні властивості бетону за підвищених температур можуть бути визначені за залежностями «напруження-деформації», наведеними в EN 1992-1-2 [5];

2. Використовування математичної моделі співвідношення "напруження-деформації" бетону за стиснення і підвищених температур, показано на рис. 1 [2].

Скореговані параметри $\varepsilon_{cu,\theta}$ ($\varepsilon_{c1,\theta}$), $\varepsilon_{cu1,\theta}$ і $\varepsilon_{ce,\theta}$ діаграми «напруження-деформації» бетону для сталезалізобетонних конструкцій за підвищених температур

Температура бетону θ_c, °С	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_c$	$\varepsilon_{cu,\theta}(\varepsilon_{c1,\theta})$, $^0/_{00}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$, $^0/_{00}$		$\varepsilon_{ce,\theta}$, $^0/_{00}$
			ДСТУ[2]	EN 1992-1-2	
20	1	2,5	10	4,0	20,0
100	1	4,0	11.5	5,4	22,5
200	0,95	5,5	13	7,0	25,0
300	0,85	7,0	13.5	8,0	27,5
400	0,75	10	15	12,0	30,0
500	0,60	15	16	13,0	32,5
600	0,45	25	25	20,0	35,0
700	0,30	25	25	21,0	37,5
800	0,15	25	25	23,0	40,0
900	0,08	25	25	23,5	42,5
1000	0,04	25	25	23,5	45,0
1100	0,01	25	25	23,5	47,5
1200	0	-	-		-

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

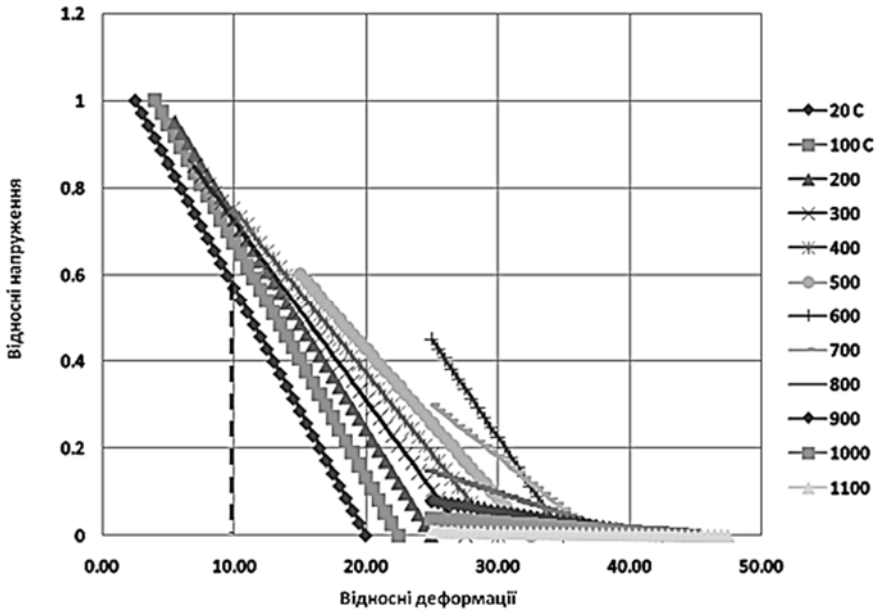


Рис. 4. Низхідні гілки діаграми деформування бетону з силікатним заповнювачем за підвищених температур

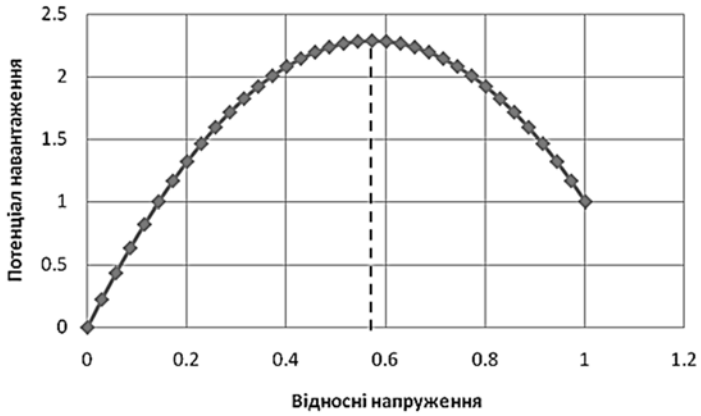


Рис. 5. Залежність відносного потенціалу завантаження W від відносних напружень σ на низхідній гілці діаграми за температури 20°C

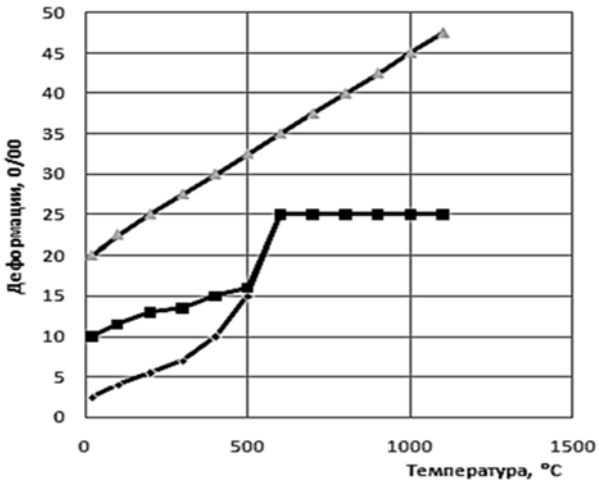


Рис. 6. Залежність деформацій $\varepsilon_{cu,\theta}$ ($\varepsilon_{c1,\theta}$), $\varepsilon_{cu1,\theta}$ і $\varepsilon_{ce,\theta}$ від температури

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

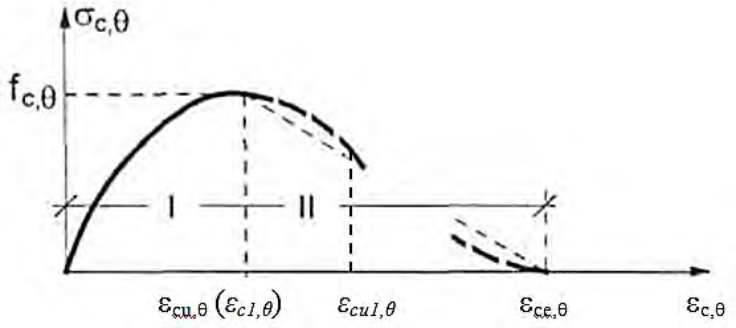


Рис. 7. Уточнена діаграміма «σ $_{c,\theta}$ –ε$_{c,\theta}$» стисненого бетону для сталезалізобетонних конструкцій за підвищених температур

Як у першому, так і в другому варіантах значення відносних деформацій $\varepsilon_{cu,\theta}$ ($\varepsilon_{c1,\theta}$), що відповідають $f_{c,\theta}$, приймаються однаковими за табл. 1 (колонка 3), значення деформацій $\varepsilon_{ce,\theta}$ ($\varepsilon_{cu,\theta}$), які відповідають кінцю низхідної гілки діаграми, також приймаються однаковими (колонка 6) та додатково вводяться деформації $\varepsilon_{cu1,\theta}$, які є критеріями міцності стисненої зони перерізу.

Для першого варіанта за нелінійних низхідних гілок діаграми їх визначають за колонкою 5 табл. 1 (з позначкою EN 1992-1-2).

Для другого варіанта за лінійної апроксимації нізхідних гілок діаграми їх визначають за колонкою 4 табл. 1 (з позначкою ДСТУ [2]).

Порівняння цих даних показує, що точність розрахунків за лінійних спадних гілок знижується: за температури 20 °С $\varepsilon_{cu1,\theta}$ = 10 $^{0}/_{00}$ для ДСТУ[2] замість $\varepsilon_{cu1,\theta}$ = 4 $^{0}/_{00}$ по EN 1992-1-2; за температури 500 °С $\varepsilon_{cu1,\theta}$ = 16 $^{0}/_{00}$ для ДСТУ[2] замість $\varepsilon_{cu1,\theta}$ = 13 $^{0}/_{00}$ по EN 1992-1-2.

Висновки

Виявлено недоліки наведених у EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4 міцності та деформаційних властивостей бетону за підвищених температур, які в процесі гармонізації відбилися в національному стандарті ДСТУ-Н-П Б В.2.6-159: 2010. Розроблено методику визначення уточнених діаграм «σ $_{c,\theta}$ –ε$_{c,\theta}$» для проектування сталезалізобетонних конструкцій під час пожежі. Скориговані значення параметрів діаграми для бетонів на силікатному заповнювачі за підвищених температур наведені у таблиці, уточнена математична модель співвідношення "напруження-деформації" бетону за стиснення і підвищених температур.

1. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с. 2. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-159:2010. Конструкції будинків і споруд. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. – Ч. 1–2: Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. (EN 1994-1-2:2005, MOD). 3. Пр. ДСТУ-НП Б В.2.6-ХХ: 20ХХ Конструкції будинків і споруд. Проектування залізобетонних конструкцій. Основні положення. Вогнестійкість. (EN 1992-1-2:2004). 4. Фомин С.Л., Давиденко А.И., Поклонский В.Г. Уточнение параметров диаграммы "напряжение-деформация" бетона при повышенных температурах // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. № 46. – Одеса: ОДАБА, 2012. – С.360–367. 5. EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules. – Structural fire design. 6. ENV 1992-1-2:1995 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. 7. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4. – Design of composite steel and concrete structures. – Part 1-2: General rules – Structural fire design. 8. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 71 с. 9. Бамбура А.Н., Давиденко А.И. Экспериментальные исследования закономерности деформирования бетона при двухосном сжатии // Строит. конструкции. –1989. – Вып. 42 – С. 95–100. 10. Пановко Я.Г. О критической силе сжатого стержня в неупругой области. – М.: Наука, 1954. – 179 с. 11. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 774 с.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua