

П.М. Фірсов, Ю.М. Круль, С.А. Потапов

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна***АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВАХ**

*Наукова робота присвячена аналізу існуючих методик з розрахунку загальної величини деформації бетону при одночасному впливі механічного навантаження та підвищених температур. Встановлено, що розподіл напружень та деформацій в конструкціях не може бути коректно визначений виключно при застосуванні рекомендованих кривих Eurocode 2. В якості подальших шляхів удосконалення, на базі існуючої методики EC2, пропонується побудова чіткої математичної залежності “напруження-деформація-температура”, для дослідження сумісно пов’язаних ефектів між напруженням і розширенням матеріалу.*

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, бетон, температура, розрахунок, аналіз.

**Постановка проблеми**

На сьогоднішній день під час експлуатації будівель і споруд було доведено, що вплив температурних навантажень, особливо у поєднанні з силовими навантаженнями, призводить до суттєвої зміни експлуатаційних якостей як окремих конструктивних елементів так і споруд в цілому. При аналізі поведінки бетонних конструкцій під час фаз нагріву і охолодження при пожежі необхідно щоб так звана залежність “напруження-деформація-температура” матеріалу була добре зрозуміла та чітко визначена. З 1970-х років були проведені численні дослідження спрямовані на розуміння поведінки бетону при підвищених температурах. В світлі недавніх руйнувань бетонних конструкцій під час пожеж [1, 2], постає необхідність в отриманні більш деталізованої інформації про залежність “напруження-деформація-температура” для бетону, яка застосовується як для фази нагріву, так і для фази охолодження.

При пожежі елементи конструкцій піддаються одночасному навантаженню і нагріву, тобто, залежність між напруженням, деформаціями і температурою бетону повинна враховувати пов’язані ефекти між напруженням і температурним розширенням матеріалу [3]. Хоча властивості основних конструктивних матеріалів, таких як бетон і сталь, здається достатньо вивчені, пов’язані ефекти між напруженням та розширенням бетону не враховуються належним чином в реологічній моделі розрахунку, яка використовується для проектування в Eurocode 2 (EC2). В даному нормативі загальну деформацію  $\varepsilon_{tot}$  матеріалу визначено як комбінацію чотирьох основних компонентів: деформації залежної від напруження, вільної термічної деформації, деформації повзучості та перехідної

термічної деформації або термічної деформації при навантаженні (далі ТДПН). В даному випадку ТДПН була визначена шляхом опрацювання результатів експериментальних даних [4, 5], що обмежує застосування відповідних розрахункових реологічних моделей. Крім того, ТДПН також, зазвичай, неявно включається в розрахункові криві  $\sigma$ - $\varepsilon$  через механічну деформацію та вноситься до стандарту, пропонуючи значення деформації, яке відповідає напруженню стиску при заданих температурах [6]. В результаті застосування кривих  $\sigma$ - $\varepsilon$  в EC2 обмежено поточними зібраними експериментальними даними і досліджуваними видами бетону. Також, варто зазначити, що вказані криві напруження-деформації в EC2 дійсні тільки для фази нагріву [7]. Отже, при неявному включенні ТДПН в розрахункові криві  $\sigma$ - $\varepsilon$ , точність механічної поведінки (напружено-деформованого стану) бетону залишається під питанням. Таким чином, постає необхідність в удосконаленні існуючого алгоритму визначення залежності “напруження-деформація-температура” для бетону, яка повинна мати чіткий зв’язок з фізичними основами сумісних ефектів між напруженням і розширенням матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Аналізуючи виконані на сьогоднішній день дослідження, проведені у галузі впливу підвищених і високих температур з одночасними силовими факторами тривалої та змінної дії, треба відмітити роботи проведені в ДонНАБА під керівництвом професорів О.П. Кричевського і В.І. Кореуна, в УПСК ім. В.М. Шимановського під керівництвом проф. О.І. Голоднова [8] та в ХНУБА під керівництвом проф. С.Л. Фомина [9].

Науковцями ХНУМГ ім. О.М. Бекетова під керівництвом проф. В.С. Шмуклера був

розроблений прогресивний метод з визначення температурних переміщень конструкцій шляхом експериментально-теоретичного дослідження їх ненагрітих аналогів [10]. Розроблений метод є ефективною технологією проведення досліджень конструкцій при дії віртуальних температурних полів. Його важливими особливостями є простота та низька вартість експериментальної частини, фізична прозорість та логічна обґрунтованість отриманих результатів. Для верифікації запропонованого методу були використані результати натурального дослідження залізобетонних плит на продавлювання при нагріві (рис. 1).



Рис. 1. Вид натурної установки для випробувань [10]

Окремо слід зазначити, що розроблений метод не накладає жодних обмежень на якісні та кількісні параметри температурного поля.

Проте результати перелічених досліджень не вирішують весь комплекс проблем пов'язаних із визначенням впливу термосилових навантажень на напружено-деформований стан бетонних і залізобетонних конструкцій. Детальний аналіз та систематизація отриманої інформації сприятиме удосконаленню існуючих методик із забезпечення загальної надійності будівель і споруд.

### Формулювання мети дослідження

Мета наукової роботи – це аналіз та визначення подальших шляхів удосконалення існуючих методик з визначення загальної величини деформації бетону  $\varepsilon_{tot}$  через побудову залежності “напруження-деформація-температура”  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$ , при дослідженні сумісно пов'язаних ефектів між напруженням і розширенням матеріалу.

### Виклад основного матеріалу

Залежність між напруженнями, деформаціями і температурою матеріалів має бути чітко визначена під час досліджень поведінки конструкцій при впливі високих температур. В бетонних

конструкціях залежність “напруження-деформація-температура” для бетону може бути математично представлена для напружень і деформацій, отриманих в результаті випробувань ненавантажених зразків в стаціонарному тепловому режимі. Дані випробування, зазвичай, проводяться наступним чином:

- зразки нагріваються до заданої температури без обмежень і без навантаження;
- задана температура підтримується протягом 2-3 годин для забезпечення однорідності температурного поля в межах вибірки;
- зразки навантажуються до руйнування;
- експериментальні дані про напруження та відповідні деформації при заданій температурі фіксуються під час навантаження.

Залежності між напруженням і деформаціями, отримані в результаті ненапружених стаціонарних випробувань, не враховують будь-які пов'язані ефекти навантаження та тепла. Коли бетонні конструктивні елементи піддаються впливу високих температур, термічні навантаження можуть викликати термічні напруження, якщо елементи не можуть вільно розширятися. В свою чергу виникаючі напруження будуть впливати на термічну деформацію елементів конструкцій [11, 12].

Для врахування цих взаємопов'язаних ефектів використовується так званий “реологічний підхід”, а пов'язані ефекти між поведінкою напруження і розширення враховуються шляхом введення в розрахунок термічної деформації при навантаженні:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{TДПН} + \varepsilon_{cr}, \quad (1)$$

- де  $\varepsilon_{tot}$  – загальна деформація елемента,
- $\varepsilon_{\sigma}$  – деформація, яка залежить від напруження;
- $\varepsilon_{th}$  – вільна термічна деформація;
- $\varepsilon_{TДПН}$  – термічна деформація при навантаженні;
- $\varepsilon_{cr}$  – деформація повзучості бетону.

При різкому підвищенні температури, наприклад у випадку пожежі, деформація повзучості  $\varepsilon_{cr}$  має незначну величину у порівнянні з іншими деформаціями та, при застосуванні реологічного підходу, приймається  $\varepsilon_{cr} = 0$ . Тоді вираз (1) набуває наступного вигляду:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_M + \varepsilon_{th} = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{TДПН} + \varepsilon_{th}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_M = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{TДПН}, \quad (3)$$

- де  $\varepsilon_M$  – сумарна механічна деформація.

З рівнянь (2)-(3) видно, що адекватність залежності  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$  корелює з відповідним значенням термічної деформації при навантаженні  $\varepsilon_{TДПН}$ , як функції температури та напруження. Проте, поточні

кореляції ТДПН не можуть повністю розкрити фізичне значення  $\varepsilon_{ТДПН}$  [7, 13]. Відповідно, точність і можливість застосування розрахункової сумарної механічної деформації  $\varepsilon_M$  і залежності  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$  потребують подальшого аналізу. Отже, поточний стан опрацювання даної проблематики, а також недосконалість чинних вітчизняних будівельних норм обумовлюють необхідність використання в аналізі результатів експериментальних досліджень закордонних науковців та низки нормативних значень наведених в EC2 [14] та ENV-1992 [15].

На рис. 2 наведено криві залежності  $\sigma$ - $\varepsilon$  для зразків, які спочатку нагрівались до заданої температури без навантаження, а потім навантажувались до повного руйнування [4, 5].

В нормативі ENV-1992 рекомендовані значення деформацій, які відповідають міцності бетону на стиск, отримані саме з аналогічних графіків і, відповідно, не враховують ТДПН.

В EC2 рекомендовані значення деформацій, які відповідають міцності бетону на стиск, значно вищі ніж значення рекомендовані в ENV-1992. Додаткова деформація вводиться для урахування ТДПН, але будь-яка деталізована інформація відсутня [7]. Відповідно, отримані значення модуля Юнга по кривим залежності  $\sigma$ - $\varepsilon$  в EC2 значно менші ніж ті, що визначаються згідно рекомендацій ENV-1992.

В обох випадках рекомендована міцність на стиск і відповідні деформації використовуються як вихідні дані для класичної функції, запропонованої для отримання залежності  $\sigma$ - $\varepsilon$  [16]:

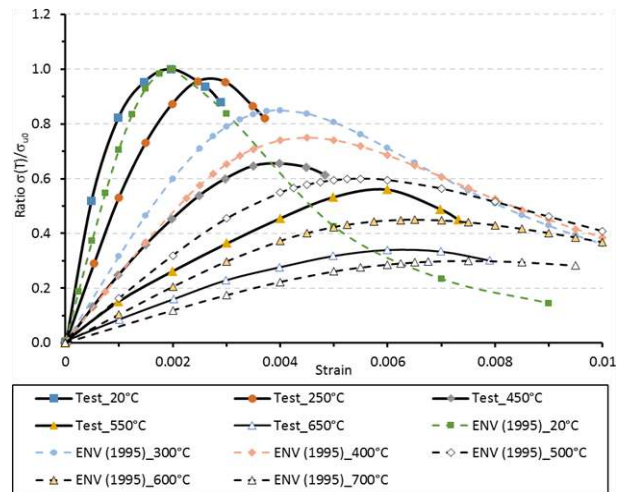


Рис. 2. Рекомендовані значення деформацій і напружень бетону при підвищених температурах, які використовуються в EC2 та ENV-1992

$$\sigma(T) = \frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_{c1,T}} \times \frac{3\sigma_{uT}}{2 + \left(\frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_{c1,T}}\right)^3}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{uT}$  – міцність бетону на стиск;  
 $\varepsilon_{c1,T}$  – відповідна деформація.

У табл. 2 розраховані величини деформацій, які відповідають міцності бетону на стиск, відповідно до рівняння (4). Крім того в даній таблиці показані величини максимальних деформацій  $\varepsilon_{cul,T}$ .

Таблиця 2

Розрахункові значення деформацій і напружень при підвищених температурах згідно EC2 та ENV-1992

T, °C	Деформація, що відповідає міцності на стиск, $\varepsilon_{c1,T}$ ( $\times 10^{-3}$ )			Максимальна деформація, $\varepsilon_{cul,T}$ ( $\times 10^{-3}$ )		$\sigma_{uT} / \sigma_{u0}$	
	ENV-1992		EC2	ENV-1992	EC2	ENV-1992 та EC2	
	Діапазон	Рекоменд.	Рекоменд.	Рекоменд.	Рекоменд.	Бетони на Sil. заповнювачах	Бетони на Cal. заповнювачах
20	2,5	2,5	2,5	20,0	20,0	1	1
100	2,5-4,0	3,5	4,0	22,5	22,5	1	1
200	3,0-5,5	4,5	5,5	25,0	25,0	0,95	0,97
300	4,0-7,0	6,0	7,0	27,5	27,5	0,85	0,91
400	4,5-10,0	7,5	10,0	30,0	30,0	0,75	0,85
500	5,5-15,0	9,5	15,0	32,5	32,5	0,60	0,74
600	6,5-25,0	12,5	25,0	35,0	35,0	0,45	0,60
700	7,5-25,0	14,0	25,0	37,5	37,5	0,30	0,43
800	8,5-25,0	14,5	25,0	40,0	40,0	0,15	0,27
900	10,0-25,0	15,0	25,0	42,5	42,5	0,08	0,15
1000	10,0-25,0	15,0	25,0	45,0	45,0	0,04	0,06
1100	10,0-25,0	15,0	25,0	47,5	47,5	0,01	0,02

Варто зазначити, що після досягнення значення, яке відповідає міцності на стиск, випробувальні дані (рис. 1) доступні лише до поступових напружень  $0,8\sigma_{ul}$ , тому наявної експериментальної основи недостатньо для екстраполяції  $\varepsilon_{cul,T}$ .

Розрахункові дані свідчать про те, що формула (4) забезпечує задовільний механізм для безпечного проектування залізобетонних конструкцій при вогневих впливах. Проте, результати новітніх прогресивних досліджень обумовлюють необхідність подальшого удосконалення даної методики. Існуюча методика характеризує консервативний підхід до руйнування матеріалу, але розподіл напружень та деформацій в конструкціях не може бути коректно визначений, якщо використовувати виключно криві EC2. Таким чином постає необхідність розробки залежності “напруження-деформація-температура”  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$ , в якій фактичні характеристики бетонних матеріалів і пов’язані ефекти між напруженням і розширенням мають бути адекватно та чітко враховані.

Першим кроком при визначенні механічної деформації бетону через залежність  $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$  є розуміння сумісної поведінки між напруженням і розширенням матеріалу. З використанням фундаментальних законів термодинаміки та законів механіки суцільного середовища був розроблений вираз, який характеризує вплив напруження на коефіцієнт теплового розширення твердого матеріалу, коли він одночасно піддається тепловим впливам та навантаженню [13, 17, 18]. Коли бетон піддається одночасному навантаженню та температурним змінам, енергетичний баланс матеріалу можна узагальнити у вигляді рівняння:

$$\rho_0 c_e \frac{\partial T}{\partial t} = T \times \frac{\partial \sigma}{\partial T} \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (5)$$

де  $\rho_0$  – щільність бетону;  
 $c_e$  – питома теплоємність.

Використовуючи закон Гука для визначення зміни напруження від температури ( $\partial\sigma/\partial T$ ), рівняння (5) приймає наступний вигляд:

$$\rho_0 c_e \frac{\partial T}{\partial t} = -ET \left( -\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} - \frac{\sigma}{E^2} \times \frac{\partial E}{\partial T} \right) \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -aET \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (6)$$

Коефіцієнт теплового розширення бетону, який піддається одночасному тепловому впливу (нагріву) та навантаженню, визначається як сума вільного коефіцієнта лінійного розширення та коефіцієнта теплового розширення, який залежить від напруження (7):

$$a = a_0 - \frac{\sigma}{E^2} \times \frac{\partial E}{\partial T}, \quad (7)$$

Підставляючи попередньо визначений коефіцієнт теплового розширення в реологічну модель розрахунку, сумісну поведінку напруження та розширення можна потім переглянути та включити до розрахунку загальної деформації  $\varepsilon_{tot}$ . Модифікована модель загальної деформації бетону  $\varepsilon_{tot}$  в умовах одночасного нагріву і навантаження, для урахування сумісних ефектів має наступну форму:

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_\sigma + a\Delta T = \varepsilon_\sigma + \left( a_0 - \frac{\sigma(T)}{E(T)^2} \times \frac{\partial E}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (8)$$

Фізично обґрунтована модель ТДПН визначається шляхом підстановки рівняння (8) у рівняння (2), таким чином отримуємо:

$$\varepsilon_{ТДПН} = \frac{\sigma(T)}{E(T)^2} \times \frac{\partial E}{\partial T} \times \Delta T, \quad (9)$$

де  $E(T)$  – модуль пружності бетону при заданій температурі;

$\partial E/\partial T$  – швидкість зміни модуля пружності Юнга залежно від температури;

$\Delta T$  – дорівнює  $T - T_{зовн.сер.}$

Підставляючи значення ТДПН з рівняння (9) у рівняння (3) отримуємо:

$$\begin{aligned} \varepsilon_M(T) &= \varepsilon_\sigma(T) + \varepsilon_{ТДПН}(T) = \\ &= \varepsilon_\sigma(T) - \frac{\sigma(T)}{E(T)^2} \times \frac{\partial E}{\partial T} \Delta T. \end{aligned} \quad (10)$$

Варто зазначити, що отриманий вираз для визначення напружено-деформованого стану  $\varepsilon_\sigma(T)$  не диференціює пружну та пластичну деформацію, і його можна скорегувати за допомогою натурних випробувань ненавантажених зразків.

## Висновки

В даній статті аналізуються існуючий реологічний підхід до розрахунку загальної деформації  $\varepsilon_{tot}$  та рекомендовані криві  $\sigma$ - $\varepsilon$  наведені в EC2. Криві “напруження-деформація” бетону, отримані в результаті попередніх досліджень без напруження (навантаження) зразків, не можуть бути використані безпосередньо для проектування бетонних конструкцій під час фази нагріву, оскільки пов’язані ефекти між напруженням та розширенням матеріалу не проявляються під час процедури випробування. Тобто, станом на теперішній час реологічний підхід з розрахунку загальної



деформації, який використовується для проектування в ЕС2, базується виключно на регресійному аналізі. Значення деформацій, які відповідають міцності на стиск при заданих температурах, приведені без прозорого обґрунтування способу врахування пов'язаних ефектів між напруженням та розширенням матеріалу. Таким чином, криві  $\sigma$ - $\epsilon$  бетону в ЕС2 доцільно застосовувати лише для фази нагріву та не використовуються для фази охолодження. Тому розробка удосконаленого фізично обґрунтованого підходу, який враховує зазначені ефекти, цілком доцільна та актуальна задача. Саме залежність “напруження-деформація-температура”  $\sigma$ - $\epsilon$ - $T$  може бути використана для проектування бетонних конструкцій як під час фази нагріву, так і під час фази охолодження. Для врахування взаємопов'язаних ефектів між напруженням та розширенням у бетоні, який піддається одночасному нагріву та навантаженню, застосовується рівняння для розрахунку значення деформації, що відповідає міцності на стиск.

### Література

1. Резнік П.А. Про одну можливість оцінювання прогресуючого обвалення конструкцій при пожежі / П.А. Резнік, В.С. Шмуклер, Альмохамд Мохамад // *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Вип. 191. – С. 37-48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291>
2. Будівлі та споруди та їх поведінка в умовах пожежі: навчальний посібник / В. М. Андрієнко, С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, С.А. Єременко, О.М. Тищенко, О.В. Некора, О.М. Нуязін. – Київ: ІДУЦЗ, 2014. – 295 с.
3. Cowlard A. Fire safety design for tall buildings / A. Cowlard, A. Bittern, C. Abecassis-Empis, J. Torrero // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 62. – P. 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.053>
4. Terro M. Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire / M. Terro // *ACI Structural Journal*. – 1998. – Vol. 95. – P. 183-193.
5. Khoury G. Strain of concrete during first heating to 600°C under load / G. Khoury, B. Grainger, P. Sullivan // *Magazine of Concrete Research*. – 1985. – Vol. 37(132). – P. 131-144. <https://doi.org/10.1680/mac.1985.37.133.195>
6. Stern-Gottfried J. Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires / J. Stern-Gottfried, G. Rein, L. Bisby, J. Torero // *Fire Safety Journal*. – 2010. – Vol. 45(4). – P. 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.03.007>
7. Gernay T. Effect of transient creep strain model on the behavior of concrete columns subjected to heating and cooling / T. Gernay // *Fire Technology*. – 2012. – Vol. 48. – P. 313-329. DOI: [10.1007/s10694-011-0222-0](https://doi.org/10.1007/s10694-011-0222-0)
8. Holodnov O. Determination of the technical state of buildings and constructions after force and temperature influences / O. Holodnov, M. Gordiuk, M. Semynoh, I. Tkachuk // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2019. – Vol. 4/1(48). – P. 4-10. DOI: [10.15587/2312-8372.2019.179220](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.179220)
9. Fomin S. Scientific approach to fire resistance calculation of reinforced concrete beams and columns / S. Fomin, Y. Bondarenko, S. Butenko, S. Koliesnikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1021(012013). – 7 p. DOI: [10.1088/1757-899X/1021/1/012013](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012013)
10. Эффективные железобетонные конструкции: монография / В.Н. Бабаев, Ю.А. Климов, А.И. Лантух-Лященко, В.С. Шмуклер, А.И. Адилходжаев, В.И. Кондраченко. – Ташкент: “INFO CAPITAL GROUP”, 2019. – 416 с.
11. Yu Z. Experimental study on thermal expansion behavior of concrete under three-dimensional stress / Z. Yu, F. Zhang, M. Xiao, Y. Fujian // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 1. – P. 1-8. DOI: [10.1155/2021/5597918](https://doi.org/10.1155/2021/5597918)
12. Резнік П.А. Дослідження вогнестійкості залізобетонної плити нового типу / П.А. Резнік, Л.В. Гапонова // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – Вінниця: ВПУ, 2017. – Вип. 4 – С. 7-14.
13. Le Q. Understanding the effects of stress on the coefficient of thermal expansion / Q. Le, J. Torero, V. Dao // *International Journal of Engineering Science*. – 2019. – Vol. 141. – 20 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.05.016>
14. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design. – Brussels: European Committee for Standardization, 2004. – 99 p.
15. ENV 1992-1-2:1995. Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules. Structural fire design. – Brussels: European Committee for Standardization, 1995. – 85 p.
16. Schneider U. Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions / U. Schneider // *Fire and Materials*. – 1976. – Vol. 1(3). – P. 103-115. <https://doi.org/10.1002/fam.810010305>
17. Li Q. Effect of heating rate on the free expansion deformation of concrete during the heating process / Q. Li, M. Wang, H. Sun, G. Yu // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 34. – 8 p. DOI: [10.1016/j.job.2020.101896](https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101896)
18. Sun X. Numerical simulation of deformation and strength of reinforced concrete slabs under thermal-mechanical loads / X. Sun, Y. Lia, Z. Cen, D. Fang // *Key Engineering Materials*. – 2007. – Vol. 353. – P. 2676-2680. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.353-358.2676](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.353-358.2676)

### References

1. Reznik P., Shmukler V., Almokhamad Mokhamad (2020) On one possibility of the assessment of progressive collapse of structures in fire. *Collection of scientific works of the Ukrainian state university of railway transport*. Vol. 191. P. 37-48. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291>
2. Andriienko V., Pozdieiev S., Otrosh Yu., Yeremenko S., Tyshchenko O., Nekora O., Nuianzin O. (2014) Будівлі та споруди та їх поведінка в умовах пожежі: навчальний посібник. Kyiv: IDUTsZ, 295 s.
3. Cowlard A., Bittern A., Abecassis-Empis C., Torrero J. (2013) Fire safety design for tall buildings. *Procedia Engineering*. Vol. 62. P. 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.053>
4. Terro M. (1998) Numerical modeling of the behavior of concrete structures in fire. *ACI Structural Journal*. Vol. 95. P. 183-193.
5. Khoury G., Grainger B., Sullivan P. (1985) Strain of concrete during first heating to 600°C under load. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 37(132). P. 131-144. <https://doi.org/10.1680/mac.1985.37.133.195>
6. Stern-Gottfried J., Rein G., Bisby L., Torero J. (2010) Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. *Fire Safety Journal*. Vol. 45(4). P. 249-261. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.03.007>
7. Gernay T. (2012) Effect of transient creep strain model on the behavior of concrete columns subjected to heating and cooling. *Fire Technology*. Vol. 48. P. 313-329. DOI: [10.1007/s10694-011-0222-0](https://doi.org/10.1007/s10694-011-0222-0)

8. Holodnov O., Gordiuk M., Semynoh M., Tkachuk I. (2019) Determination of the technical state of buildings and constructions after force and temperature influences. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 4/1(48). P. 4-10. DOI:[10.15587/2312-8372.2019.179220](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.179220)
9. Fomin S., Bondarenko Y., Butenko S., Koliesnikov S. (2021) Scientific approach to fire resistance calculation of reinforced concrete beams and columns. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1021(012013). 7 p. DOI:[10.1088/1757-899X/1021/1/012013](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012013)
10. Babaev V., Klimov Yu., Lantuh-Lyashenko A., Shmukler V., Adilhodzhaev A., Kondrashenko V. (2019) *Effektivnye zhelezobetonnye konstrukcii: monografiya*. Tashkent: "INFO CAPITAL GROUP", 416 s.
11. Yu Z., Zhang F., Xiao M., Fujian Y. (2021) Experimental study on thermal expansion behavior of concrete under three-dimensional stress. *Advances in Civil Engineering*. Vol. 1. P. 1-8. DOI:[10.1155/2021/5597918](https://doi.org/10.1155/2021/5597918)
12. Reznik P.A., Gaponova L.V. (2017) Research of Fire Resistance of Reinforced Concrete Plate of New Type. *Visnyk of Vinnitsia Polytechnical Institute*, Vol. 4. P. 7-14.
13. Le Q., Torero J., Dao V. (2019) Understanding the effects of stress on the coefficient of thermal expansion. *International Journal of Engineering Science*. Vol. 141. 20 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.05.016>
14. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design. (2004) Brussels: European Committee for Standardization, 99 p.
15. ENV 1992-1-2:1995. Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules. Structural fire design. (1995) Brussels: European Committee for Standardization, 85 p.
16. Schneider U. (1976) Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions. *Fire and Materials*. Vol. 1(3). P. 103-115. <https://doi.org/10.1002/fam.810010305>
17. Li Q., Wang M., Sun H., Yu G. (2021) Effect of heating rate on the free expansion deformation of concrete during the

- heating process. *Journal of Building Engineering*. Vol. 34. 8 p. DOI:[10.1016/j.jobbe.2020.101896](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101896)
18. Sun X., Lia Y., Cen Z., Fang D. (2007) Numerical simulation of deformation and strength of reinforced concrete slabs under thermal-mechanical loads. *Key Engineering Materials*. Vol. 353. P. 2676-2680. DOI:[10.4028/www.scientific.net/KEM.353-358.2676](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.353-358.2676)

**Рецензент:** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних конструкцій В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

**Автор:** ФІРСОВ Павло Михайлович  
кандидат технічних наук, доцент  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [pavelfirsov1991@gmail.com](mailto:pavelfirsov1991@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9119-3968>

**Автор:** КРУЛЬ Юрій Миколайович  
кандидат технічних наук  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [krul.yuriy@gmail.com](mailto:krul.yuriy@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0069-4191>

**Автор:** ПОТАПОВ Сергій Анатолійович  
аспірант  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – [potapovs201405@gmail.com](mailto:potapovs201405@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2845-4930>

## ANALYSIS OF DETERMINATION METHODS OF STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE STRUCTURES UNDER TEMPERATURE INFLUENCES

P. Firsov, Yu. Krul, S. Potapov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*The scientific work is dedicated to the analysis of existing methods for calculating the total value of concrete deformation under the simultaneous influence of mechanical load and elevated temperatures. During the operation of buildings and structures, it has been proven that the influence of temperature loads, especially in combination with force loads, leads to a significant change in the operational qualities of both individual structural elements and buildings as a whole. The relationship between stress, deformation and temperature of materials should be clearly defined during research of the structures operation under the influence of high temperatures. A so-called "rheological approach" is used to account for these interrelated effects, and the related effects between stress and expansion behavior are taken into account by introducing load-induced thermal strain into the calculation. In the conducted analysis, the results of experimental studies of foreign scientists and normative values, given in EC2 and ENV-1992, were taken into account. It was established that the distribution of stresses and deformations in concrete structures cannot be correctly determined exclusively by applying the corresponding recommended Eurocode 2 curves. Values of deformations, corresponding to compressive concrete strength at specified temperatures, are given without transparent justification of the way of taking into account the related effects between stress and expansion of the material. Thus, the  $\sigma$ - $\varepsilon$  curves of concrete in EC2 should be used only for the heating phase, however, they are not used for the cooling phase. As further ways of improvement, on the basis of the existing EC2 methodology, the development of the mathematical "stress-strain-temperature" relationship is proposed for the research of interrelated effects between stress and expansion of concrete. To account for the interrelated effects between stress and expansion in concrete subjected to simultaneous heating and loading, an equation is proposed to calculate the strain value, corresponding to the compressive strength.*

**Keywords:** stress-strain state, concrete, temperature, calculation, analysis.