



ISSN 1819-432X print / ISSN 1993-3495 online

СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВО ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

ТОМ 3, N2, 2007, 115-124

УДК 625.731.8.001.2

ВИЗНАЧЕННЯ КРИВИЗНИ ТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗУСИЛЛЯ У ПОЗАЦЕНТРОВО СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПРИ ДІЇ МІСЦЕВОГО НАГРІВУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

С.С. Була

*Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С.Бандери, 12, 79013, м. Львів, Україна.
yuliyabusiness@mail.ru*

Отримана 2 квітня 2007; прийнята 18 квітня 2007

Анотація. У роботі наведені основні результати досліджень кривизни та температурного зусилля у позациентрово стиснутих залізобетонних елементах при дії місцевого нагріву зі сторони стиснутої або розтягнутої зони при різних рівнях навантаження. Описана методика випробувань досліджуваних конструкцій при дії місцевого нагріву та експлуатаційного навантаження. Представлено результати експериментальних досліджень та запропоновано теоретичні вирази для визначення температурного видовження та температурної кривизни позациентрово стиснутих залізобетонних конструкцій при дії місцевого нагріву. Досліджено зміну температурного зусилля та температурної кривизни в залежності від місцезнаходження ділянки нагріву та навантаження при якому відбувався місцевий нагрів зразків. В результаті досліджень отримано кількісні та якісні показники зміни температурної кривизни та температурного зусилля при дії місцевого нагріву на позациентрово стиснуті залізобетонні елементи. Приведений матеріал орієнтований на удосконалення методики розрахунку конструкцій при дії місцевого нагріву.

Ключові слова: місцевий нагрів, кривизна, температурне зусилля.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВИЗНЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО УСИЛИЯ ВО ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕСТНОГО НАГРЕВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

С.С. Була

*Национальный университет "Львовская политехника",
ул. С.Бандеры, 12, 79013, г. Львов, Украина.
yuliyabusiness@mail.ru*

Получена 2 апреля 2007; принята 18 апреля 2007.

Аннотация. В статье приведены основные результаты исследований кривизны и температурного усилия во внецентренно сжатых железобетонных элементов при воздействии местного нагрева со стороны сжатой или растянутой зоны при различных уровнях нагрузки. Описана методика испытаний опытных конструкций при воздействии местного нагрева и эксплуатационной нагрузки. Представлены результаты экспериментальных исследований и предложены теоретические выражения для определения температурного удлинения и температурной кривизны внецентренно сжатых железобетонных конструкций при воздействии местного нагрева. Исследовано изменение температурного усилия и температурной кривизны в зависимости от местоположения участка нагрева и нагрузки, при которой

происходил местный нагрев. В результате исследований получены количественные и качественные показатели изменения температурной кривизны и температурного усилия при воздействии местного нагрева на внецентренно сжатые железобетонные элементы. Приведенный материал ориентирован на усовершенствования методики расчета конструкций при воздействии местного нагрева.

Ключевые слова: местный нагрев, кривизна, температурное усилие.

DEFINITION OF CURVATURE AND TEMPERATURE FORCE IN NONCENTRAL PRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER LOCAL HEATING AND EXPLOITABLE LOADING

S.S. Bula

*National University "Lvivska polytechnika",
12 S.Bandery St., Lviv, Ukraine, 79013.
yuliyabusiness@mail.ru*

Received 2 April 2007; accepted 18 April 2007

The summary. The article gives main results about investigations of curvature and temperature strength in noncentral pressed reinforced concrete elements under different loading levels and local heating of pressed or stretched side. The method of testing experimental constructions under loading and local heating is described. There are presented the results of experimental investigations and theoretical equals for determining of temperature extending and temperature curvature in noncentral pressed reinforced concrete elements. The changing of temperature force and temperature curvature depending on heating placement and loading level are investigated. The results of investigations were quantitative and qualitative indices of temperature curvature and of temperature force changing under loading and local heating in noncentral pressed reinforced concrete elements. The presented investigation oriented to improving of calculating method of constructions under local heating.

Keywords: local heating, curvature, temperature strength.

Вступ

Зростаючі темпи впровадження нових технологій та збільшення потужностей металургійних підприємств, цехів хімічної, вугільної, склоробної промисловості призводять до ускладнення температурних режимів та нерідко до збільшення аварійних ситуацій. В результаті цього часто відбувається місцевий нагрів залізобетонних конструкцій. При цьому значна кількість несучих та огорожувальних конструкцій піддаються місцевому нагріву. Вплив місцевого нагріву на такі конструкції, зокрема на позацентрово стиснуті елементи, є маловивченим і потребує додаткових досліджень. Розрахунок нерівномірно нагрітих залізобетонних конструкцій за граничними станами проводиться згідно з СНиП 2.03.04.-84,

однак більш складні випадки місцевого нагріву нормами не регламентуються внаслідок недостатнього вивчення даного питання.

Метою роботи є дослідження кривизни та температурного зусилля у позацентрово стиснутих залізобетонних елементах при дії місцевого нагріву зі сторони стиснутої або розтягнутої зони при різних рівнях експлуатаційного навантаження.

Методика проведення експериментальних досліджень

Армування зразків показано на рис.1. В якості дослідних зразків прийняті залізобетонні колони з односторонніми консолями. Довжина залізобетонної колони прийнята 1200 мм, з прямокутним перерізом 200x140 у середній

частині та 300x140 мм на консолях. Призмова міцність бетону $R_b = 27.1$ МПа, початковий модуль пружності бетону $E_b = 28.1 \times 10^3$ МПа. В якості складових бетонної суміші було використано (на 1 м^3):

- портландцемент М400 Миколаївського заводу – 470 кг
- щебінь гранітний фракції 5-20 мм Клесівського кар'єру – 1280 кг
- пісок кварцовий Давидівського кар'єру ($M_k = 1.23$) – 440 кг
- вода водопровідна – 200 л

Схема випробування позациентрово стиснутих залізобетонних елементів на дію місцевого нагріву приведена на рис.2. Зразки-колони (8 шт) випробовувались на спільну дію місцевого нагріву та експлуатаційного навантаження. Випробування цих зразків проводили в два етапи. На першому етапі зразки поступово навантажували повздовжньою силою ступенями по $0.1N_{сг}$ до рівня $0.4N_{сг}$ або $0.6N_{сг}$, відповідно до програми досліджень. Рівні навантаження зразків приймалися виходячи з умов роботи конструкцій при експлуатаційних навантаженнях. При цьому фіксували повздовжні деформації бетону та арматури, прогини, появу та розкриття тріщин на кожній ступені. Після досягнення необхідної величини повздовжньої сили, навантаження зупиняли і стабілізували. На другому етапі до колони через перехідник приєднували пічку, яка попередньо була розігріта до температури 900°C – 1000°C . Джерело нагріву розміщували в розтягнутій або стиснутій зоні позациентрово стиснутого зразка, згідно з програмою досліджень. Повздовжні деформації бетону та арматури, прогини під час місцевого нагріву фіксували кожні 10 хв. Зміну температури спостерігали в режимі реального часу за допомогою вимірювального перетворювача ПВІ-0289, який паралельно архівував інформацію в пам'ять персонального комп'ютера. Час зчитування інформації з однієї термопари складав менше однієї секунди. Під час місцевого нагріву зразка контролювали показники кільцевого динамометра. Відразу після закінчення нагріву зразок доводили до руйнування поступово зростаючим навантаженням. При цьому фіксували руйнуюче навантаження.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень

В основі розрахунку за другою групою граничних станів при дії температури визначальними є температурні деформації, які в свою чергу залежать від коефіцієнта лінійної температурної деформації та температури нагріву [3]:

$$\varepsilon_t = \alpha_t t \quad (1)$$

Приріст температурної деформації пропорційний довжині ділянки, що нагрівається:

$$\Delta l = \alpha_t t \cdot l \quad (2)$$

Якщо припустити, що загальна довжина складається з елементарних відрізків, які мають різну температуру нагріву (t_1, t_2, \dots, t_n) і відповідно і приріст деформацій, то загальний приріст деформацій буде сумою відповідних елементарних приростів деформацій:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta l = & \alpha_t \cdot t_1 \cdot l_1 + \alpha_t \cdot t_2 \cdot l_2 + \\ & + \alpha_t \cdot t_3 \cdot l_3 + \dots + \alpha_t \cdot t_n \cdot l_n \end{aligned} \quad (3)$$

Тоді загальна відносна деформація видовження при місцевому нагріві:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta l / l_0 = & \alpha_t \cdot t_1 \cdot (l_1 / l_0) + \alpha_t \cdot t_2 \cdot (l_2 / l_0) + \\ & + \alpha_t \cdot t_3 \cdot (l_3 / l_0) + \dots + \alpha_t \cdot t_n \cdot (l_n / l_0) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_t^{loc} = & \varepsilon_t (l_1 / l_0) + \varepsilon_t (l_2 / l_0) + \\ & + \varepsilon_t (l_3 / l_0) + \dots + \varepsilon_t (l_n / l_0) \end{aligned} \quad (5)$$

На основі вищевикладеного, до існуючої методики визначення температурної кривизни згідно з нормами [4], автором запропоновано уточнення (див. додаток), що стосуються випадку місцевого нагріву залізобетонних конструкцій (рис.3).

Приведена температурна кривизна при місцевому нагріві у відповідності до норм [4] запишеться наступним чином:

$$(1/r)_{red,t}^{loc} = (1/r)_{l_1}^{loc} + [(1/r)_{l_2}^{loc} - (1/r)_{l_1}^{loc}] \varphi_m \quad (6)$$

При сумісній дії температури та експлуатаційного навантаження загальна кривизна елемента визначалась як сума відповідних кривизн $(1/r)_{red,t}^{loc}$ та $(1/r)_f$:

$$(1/r)^{loc} = (1/r)_f + (1/r)_{N_i}^{loc} \pm (1/r)_{red,t}^{loc} \quad (7)$$

Крім того, додатково враховували кривизну $(1/r)_{N_i}^{loc}$ від зусилля N_i , що виникало в

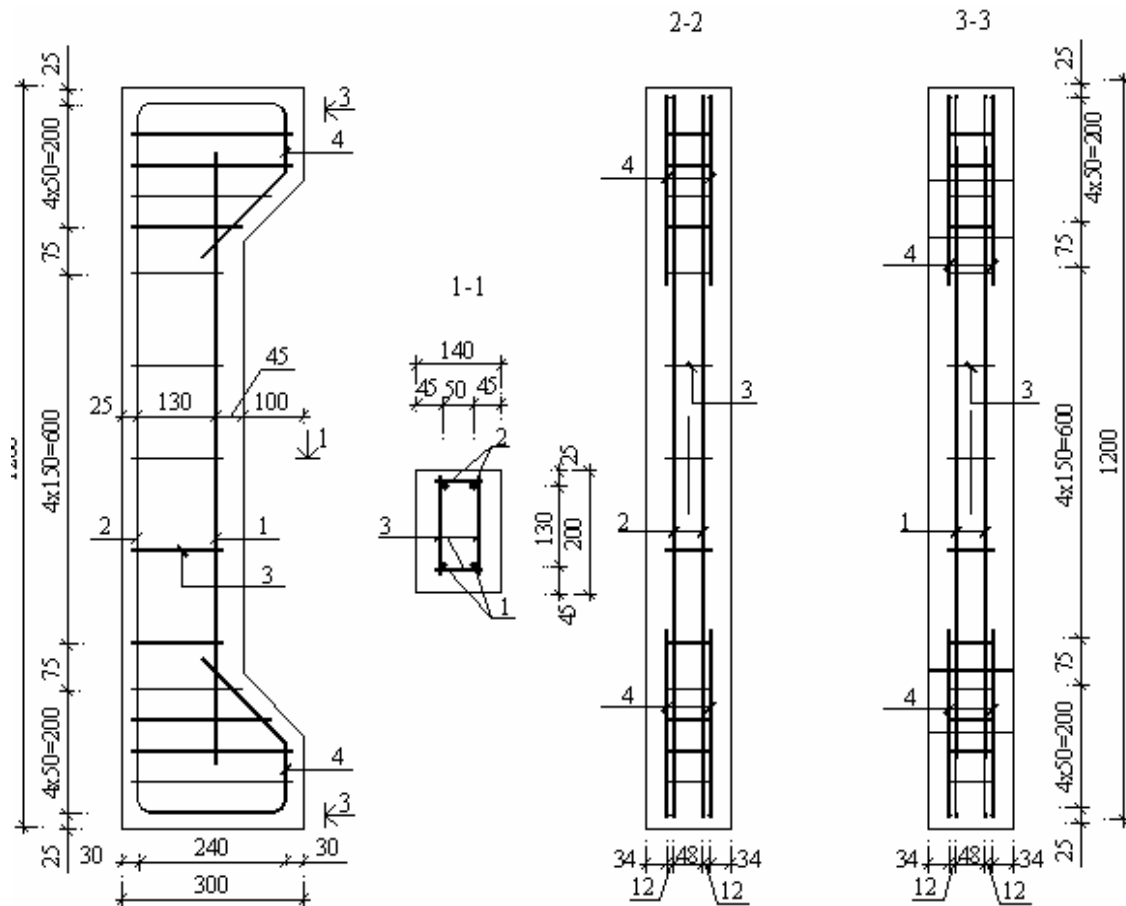


Рис. 1. Схема армування колони.
1- Ж8А-III, 2-Ж12А-III, 3-Ж4Вр-I, 4-Ж12А-III

стиснутій зоні від стримування зусиль температурного розширення експлуатаційним навантаженням. Знак „+” у (7) приймався при нагріві зі сторони розтягнутої зони, знак „-” – при нагріві зі сторони стиснутої зони.

Крім того, додатково враховували кривизну від зусилля N_p , що виникало в стиснутій зоні від стримування зусиль температурного розширення експлуатаційним навантаженням. Знак „+” у (7) приймався при нагріві зі сторони розтягнутої зони, знак „-” – при нагріві зі сторони стиснутої зони.

Значення кривизни від дії експлуатаційного навантаження визначали згідно зі змінами №1 до СНиП 2.03.01-84* [2] з врахуванням зміни фізико-механічних властивостей бетону та арматури при нагріві. Слід зазначити, що використання приведеної температури нагріву t_{red} на відміну від застосування в розра-

хунках приведеної деформації дає суттєві розбіжності з експериментальними результатами.

Експериментальні значення кривизни визначалися за середніми деформаціями розтягнутої арматури ε_s^{loc} та стиснутого бетону ε_b^{loc} :

$$(1/r)^{loc} = (\varepsilon_s^{loc} + \varepsilon_b^{loc})/h_0 \quad (8)$$

На рис.4 приводиться порівняння експериментальних та теоретичних значень кривизни осі досліджуваних позациентрово стиснутих колон.

Як видно з графіків, зразки, в яких нагрівалася розтягнута зона К1.2р, К2.2р, К1.1р, К2.1р мають більшу кривизну в порівнянні з такими, що нагрівалися зі сторони стиснутої зони К1.2с, К2.2с, К1.1с, К2.1с. На 90-й хв. нагріву різниця між цими зразками складала (18÷20)%. Це пов'язано з тим, що у першому випадку

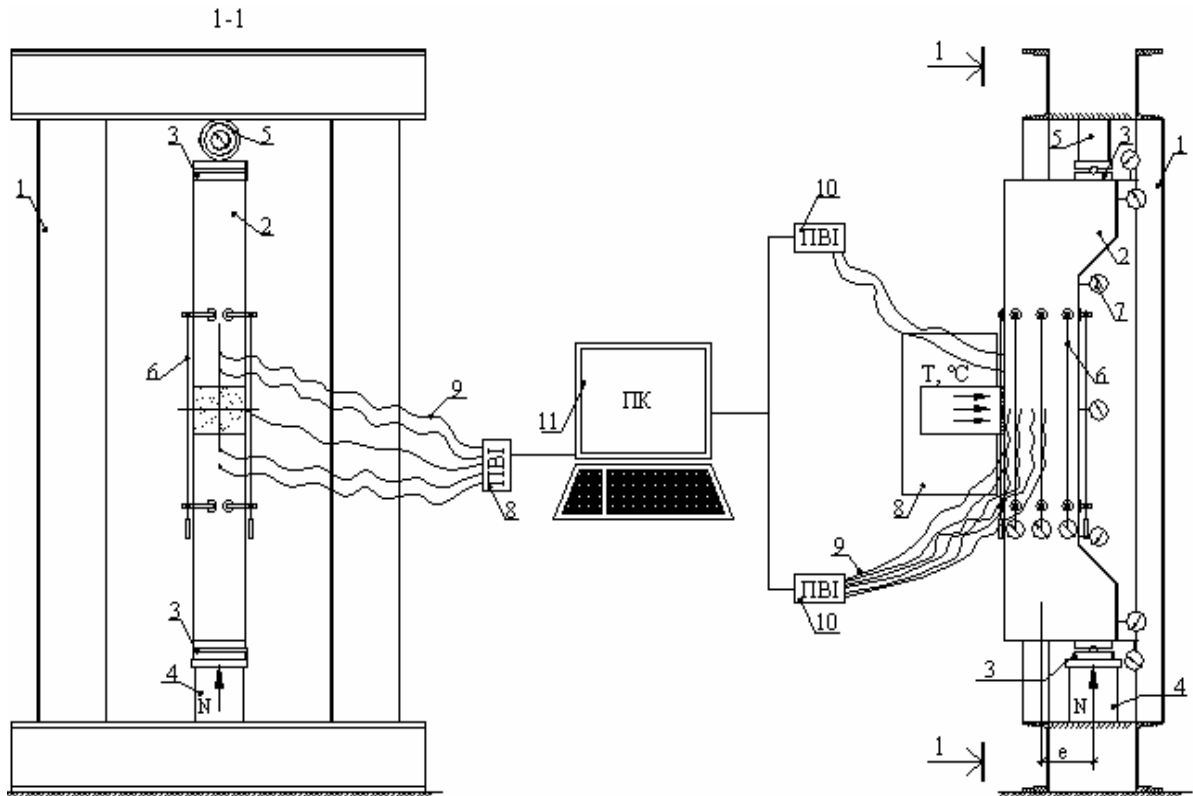


Рис.2. Схема проведення експериментальних досліджень.

1-випробувальний стенд, 2-залізобетонна колона, 3-опорний шарнір, 4 - гідравлічний домкрат, 5-кільцевий динамометр, 6-індикатор годинникового типу з ціною поділки 0.001 мм, 7- те ж саме, з ціною поділки 0.01 мм, 8- муфельна піч, 9-хромельалюмелеві термопари, 10-вимірювач перетворювальний ПВІ-0298, 11-персональний комп'ютер.

кривизна від дії температури та експлуатаційного навантаження діють в одному напрямку, а у другому – у різних, таким чином „компенсуючи” одна одну. Крім того, температурна кривизна при дії нагріву зі сторони розтягнутої зони має більші значення внаслідок інтенсивнішого прогріву арматури та більшого коефіцієнта її температурної деформації.

Приріст кривизни при дії місцевого нагріву та експлуатаційного навантаження у зразках, що нагрівалися під навантаженням $h=0.6$, є більшим в порівнянні з тими, що нагрівалися при навантаженні $h=0.4$, як при нагріві стиснутої, так і при нагріві розтягнутої зони. За весь час нагріву для зразків K1.1р, K2.1р та K1.1с, K2.1с приріст складав $8.97, 9.2 \text{ см}^{-1}$ та $6.3, 6.83 \text{ см}^{-1}$ відповідно. У зразках K1.2р, K2.2р та K1.2с, K2.2с він збільшився на $13.7, 14 \text{ см}^{-1}$ та $10.3, 8.7 \text{ см}^{-1}$ відповідно. Причиною цього є

збільшення деформативності бетону при збільшенні навантаження, при якому проводиться нагрів, а також збільшення пластичних деформацій арматури із збільшенням в ній рівня напружень.

Розрахункова кривизна осі зразків K1.2р, K2.2р, K1.1р, K2.1р при нагріві зі сторони розтягнутої зони має розбіжність з експериментальними даними не більше 11.5%. У зразках K1.2р, K2.2р, починаючи із 60-ї хв. нагріву, коли в цих зразках зафіксована текучість арматури, відбувається стрімкіше зростання кривизни. Експериментальні значення кривизни зразків K1.2с, K2.2с, K1.1с, K2.1с при нагріві із сторони стиснутої зони відрізнялися від теоретичних не більше 7.8%. В обох випадках теоретичні значення перевищують експериментальні.

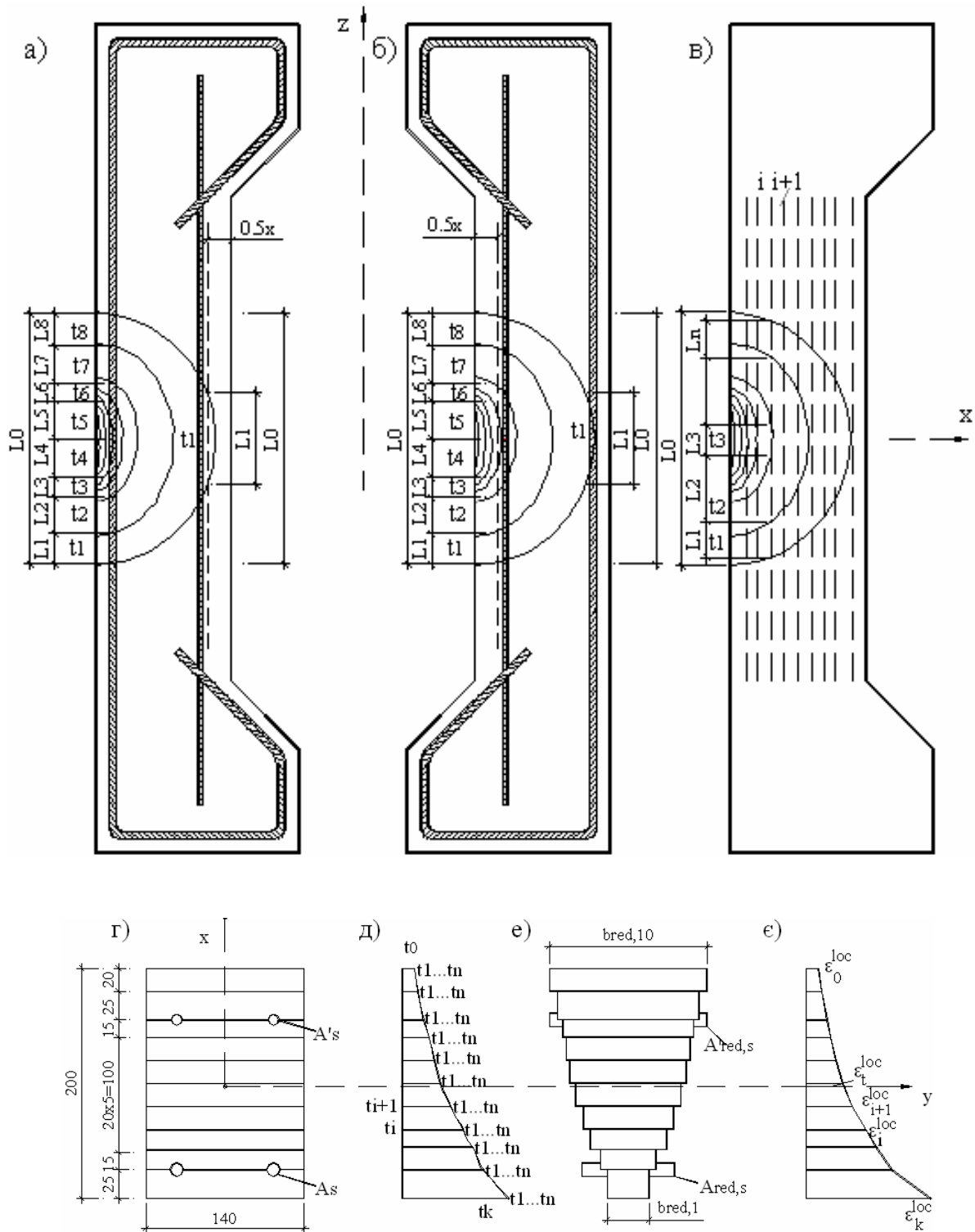
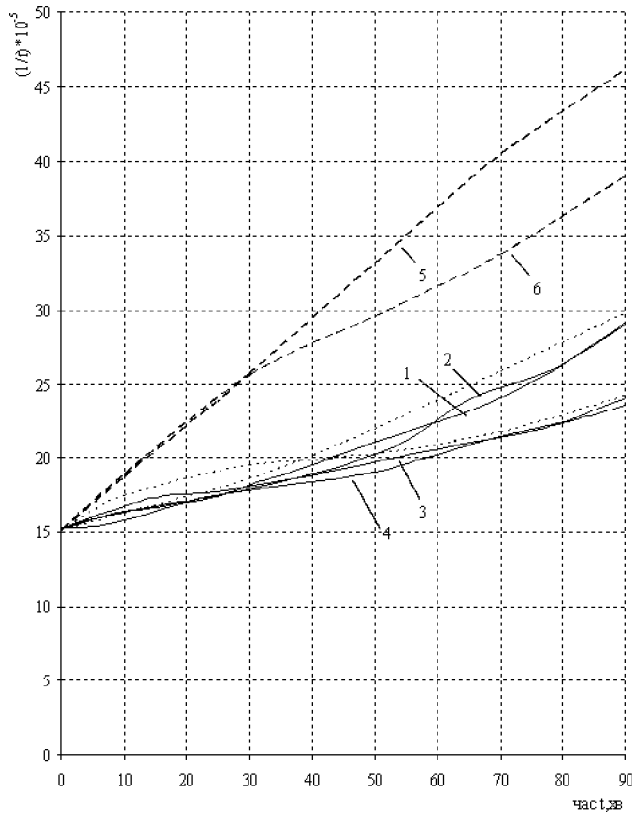
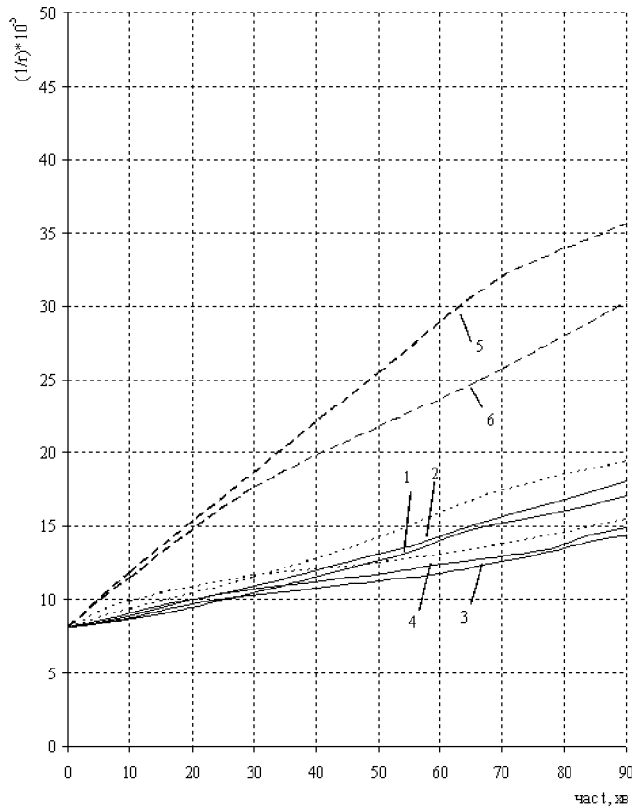


Рис.3. Схема розподілу елемента на елементарні ділянки.

а) визначення температурної деформації ϵ_i^{loc} при місцевому нагріві зі сторони розтягнутої зони при наявності тріщин в розтягнутій зоні; б) те ж саме, при нагріві стиснутої зони; в) те ж саме, при нагріві зі сторони розтягнутої зони при відсутності в ній тріщин; г) схема розподілу поперечного перерізу на частини; д) розподіл температури по перерізу; е) розподіл температурних деформацій по перерізу; е) приведенний переріз.



а) 1,2,3,4- для зразків К1.1р, К2.1р, К1.1с, К2.1с відповідно, теоретичні значення, 5,6 –для випадку загального нагріву розтягнутої та стиснутої зони відповідно.



б) 1,2,3,4- для зразків К1.2р, К2.2р, К1.2с, К2.2с відповідно, теоретичні значення, 5,6 –для випадку загального нагріву розтягнутої та стиснутої зони відповідно.

Рис. 4. Кривизна осі колон при дії місцевого нагріву та навантаження : а) $h=0.6$; б) $h=0.4$.

Експериментальні значення кривизни при дії місцевого нагріву на (37÷52)% менші за теоретично обчислені значення кривизни для випадку загального нагріву.

Під час нагріву зразків, стиснутих експлуатаційною силою (при обмеженні позовжніх деформацій), в них виникає позовжнє зусилля стиску N_t . Це зусилля сумується з експлуатаційним навантаженням N_f , що діє на елемент:

$$N_u \geq N_f \pm N_t \quad (9)$$

При обмеженні позовжніх деформацій позацентрово-стиснутих елементів при дії місцевого нагріву розрахункове температурне зусилля N_t від не проявлених температурних деформацій стиснутої зони $\varepsilon_{red,tx}^{loc}$ пропонується визначати на основі залежності для визначення деформацій згідно зі змінами №1 до СНиП 2.03.01-84* [2]:

$$N_t = \varepsilon_{red,tx}^{loc} / [(e_s \varphi_s / (z A_s E_s \beta_s \nu_s) - \varphi_s / (A_s E_s \beta_s \nu_s)) (y_s / (h_0 - x_t) - 1)] \quad (10)$$

де $\varphi_s, \varphi_s, x_t, y_s, z, \varepsilon_s$ – величини, визначені згідно зі змінами №1 до СНиП 2.03.01-84* [2] з урахуванням зміни фізико-механічних властивостей бетону під час нагріву через коефіцієнти $\beta_s, \nu_s, \varepsilon_{red,tx}^{loc}$ – температурне видовження елемента на рівні рівнодійної зусиль стиснутої зони бетону, відповідно до виразу на основі [4] та запропонованих уточнень до існуючої методики у випадку місцевого нагріву (див. додаток 1):

$$\varepsilon_{red,tx}^{loc} = \varepsilon_{t_1}^{loc} + (\varepsilon_{t_2}^{loc} - \varepsilon_{t_1}^{loc}) \varphi_m \quad (11)$$

Аналізуючи формулу (10), можна відзначити, що величина N_t залежить від величини існуючого зусилля в перерізі, тобто від рівня попереднього навантаження елемента експлуатаційним навантаженням та температури нагріву зразка на рівні осі стиснутої зони бетону. У зв'язку з тим, що величина N_t наперед невідома, обчислення проводили методом послідовних наближень.

На рис. 5 зображено зміну температурного зусилля N_t під час місцевого нагріву позацентрово стиснутих зразків зі сторони розтягнутої та стиснутої зони.

Значення загального експериментально-теоретичного зусилля N при дії місцевого нагріву та експлуатаційного навантаження виз-

начали на основі експериментально отриманих величин деформацій бетону, розтягнутої та стиснутої арматури згідно зі змінами №1 до СНиП 2.03.01-84* [2] з урахуванням коефіцієнтів β_s, ν_s :

$$N = \varepsilon / [(e_s \varphi_s / (z A_s E_s \beta_s \nu_s) - \varphi_s / (A_s E_s \beta_s \nu_s)) (y_s / (h_0 - x_t) - 1)] \quad (12)$$

Віднявши від отриманого значення зусилля від експлуатаційного навантаження N_f , отримали значення температурного зусилля N_t (див. залежність (9)).

У зразках, де нагрівали стиснуту зону, зростання температурного зусилля N_t відбувалося з перших хвилин нагріву і мало лінійний характер (ліва вісь, див. рис.5).

Після 50-ти хв. нагріву відбувається сповільнення його зростання. Цей процес продовжувався до кінця нагріву. Це пов'язано із зменшенням коефіцієнта температурної деформації бетону та збільшенням пластичних деформацій бетону. При нагріві розтягнутої зони поява температурного зусилля відбулася лише після 30-ї хв. нагріву, яке в подальшому прямолінійно зростало до кінця нагріву (права вісь, див. рис.5). Розбіжність експериментальних та теоретичних даних зразків (див. рис.5), що нагрівались, зі сторони стиснутої зони Δ_t не перевищує 12%. При нагріві розтягнутої зони ця розбіжність не більше 6%. Збільшення похибки із часом нагріву пов'язане з тим, що у залежності (10) коефіцієнти β_s, ν_s приймалися для температури на рівні рівнодійної зусиль стиснутої зони бетону. Розподіл температури при визначенні $\varepsilon_{red,tx}^{loc}$ необхідно приймати з урахуванням зміщення рівнодійної до нейтральної лінії при нагріві стиснутої зони, що ускладнює розрахунок.

Висновки

Результати експериментів показали, що кривизна позацентрово стиснутих зразків при дії місцевого нагріву зі сторони розтягнутої зони на 18–20% перевищувала кривизну зразків, нагрітих зі сторони стиснутої зони. Кривизна зразків, що випробовувалися при рівні попереднього навантаження $\eta=0.6$, була більшою на 37–38% за кривизну зразків, що нагрівались при попередньому навантаженні $\eta=0.4$.

Температурне зусилля N_t , що виникає при

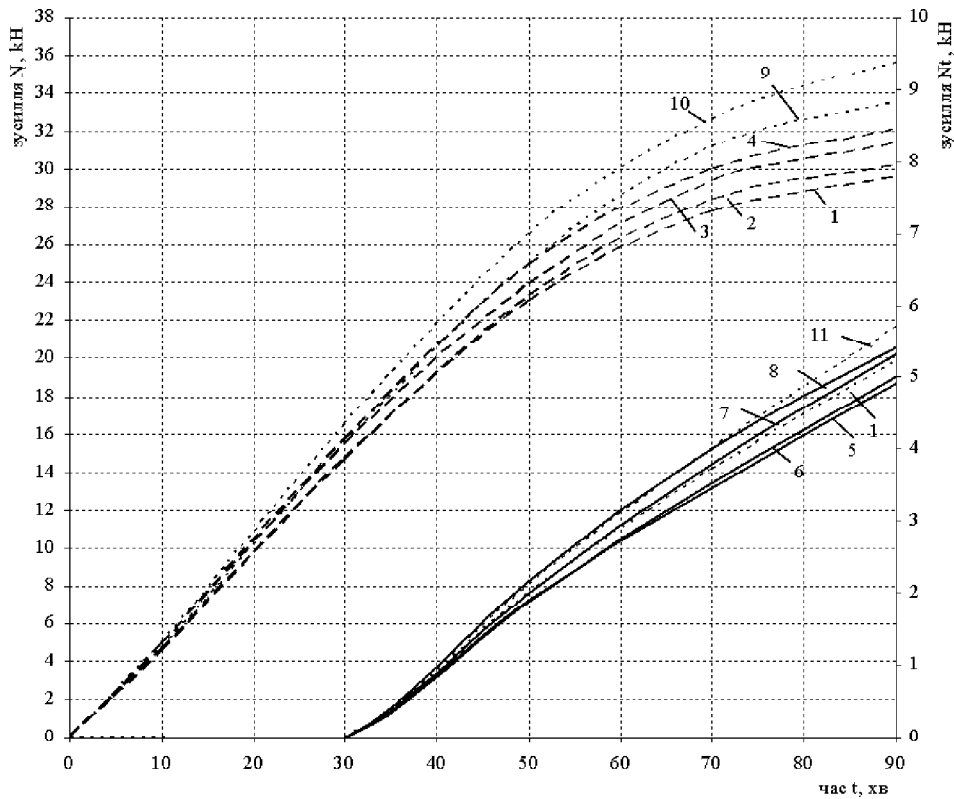


Рис. 5. Зміна температурного зусилля N_t в часі нагріву.

1,2,3,4 – для зразків K2.2c, K1.2c, K1.1c, K2.1c відповідно; 5,6,7,8 – для зразків K2.2p, K1.2p, K1.1p, K2.1p відповідно; 9,12 і 10,11 – теоретичні значення для $h=0.6$ і $h=0.4$.

----- для лівої осі, ————— для правої осі.

місцевому нагріві позациентрово стиснутих зразків зі сторони стиснутої зони є у 6.4 рази більшими в порівнянні із зразками, нагрітими зі сторони розтягнутої зони. Це пояснюється стримуванням деформацій температурного розширення при нагріві стиснутої експлуатаційним навантаженням зони. При нагріві розтягнутої зони зразка, що вільна від стискаючих зусиль, температурне зусилля N_t є незначним. Зафіксовано також дещо більші (до 9%) значення температурного зусилля N_t при нагріві зразків при $\eta=0.4$ у порівнянні із зразками, нагрітими при $\eta=0.6$. Це може бути пов'язано із більшим тріщиноутворенням і, відповідно, збільшенням коефіцієнта ψ_s та більшим розвитком пластичних деформацій в бетоні під дією більшого попереднього навантаження. Високий відсоток співпадання експериментальних та теоретичних результатів дозволяє застосування

уточненої методики для розрахунку позациентрово стиснутих елементів при дії місцевого нагріву.

Література

1. Демчина Б.Г. Огнестойкость монолитных неразрезных плит перекрытий по стальному профилюванному настилу. Дис.канд.техн.наук. Львов-1989р, 196с.
2. Зміна №1 до СНиП 2.03.01-84* (вид.1989р.) // Будівництво України, 1995, №6; 1996 №1. – додаток до журналу.
3. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. –М.: Стройиздат, 1998. –304с.
4. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. –М.,1985. –53с.

Додаток

Кривизна осі $(1/r)_i$ та видовження ε_i позацентрово-стиснутих залізобетонних колон при дії місцевого нагріву для ділянок без тріщин:

$$(1/r)_{i_2}^{loc} = \left(A'_{s,red} y'_s \varepsilon_s^{loc} + A_{s,red} y_s \varepsilon_s^{loc} + \sum A_{red,i} y_{bi} \varepsilon_{ii}^{loc} + \sum (1/r)_{ii}^{loc} I_{red,i} \right) / I_{red} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{i_2}^{loc} = \left(\sum A_{red,i} \varepsilon_{ii}^{loc} + A'_{s,red} \varepsilon_s^{loc} + A_{s,red} \varepsilon_s^{loc} \right) / A_{red} \quad , \text{ де } (14)$$

$$\varepsilon_{ii}^{loc} = \varepsilon_{i_1} (l_1/l_0) + \varepsilon_{i_2} (l_2/l_0) + \varepsilon_{i_3} (l_3/l_0) + \dots + \varepsilon_{i_n} (l_n/l_0) \quad (15)$$

$$(1/r)_{ii}^{loc} = (1/r)_{i_1} (l_1/l_0) + (1/r)_{i_2} (l_2/l_0) + (1/r)_{i_3} (l_3/l_0) + \dots + (1/r)_{i_n} (l_n/l_0) \quad (16)$$

$$\varepsilon_s^{loc} = \varepsilon_{s_{i_1}} (l_1/l_0) + \varepsilon_{s_{i_2}} (l_2/l_0) + \dots + \varepsilon_{s_{i_n}} (l_n/l_0) \quad (17)$$

$$\varepsilon_s^{loc} = \varepsilon'_{s_{i_1}} (l_1/l_0) + \varepsilon'_{s_{i_2}} (l_2/l_0) + \dots + \varepsilon'_{s_{i_n}} (l_n/l_0) \quad , \text{ де } (18)$$

$\varepsilon_{i_1}, \varepsilon_{i_2}, \varepsilon_{i_3}, \dots, \varepsilon_{i_n}$ – температурне видовження центра ваги i -тої частини бетонного перерізу при температурі центра ваги $t_p, t_2, t_3, \dots, t_n$ відповідно до (19) [4], $(1/r)_{i_1}, (1/r)_{i_2}, (1/r)_{i_3}, \dots, (1/r)_{i_n}$ – температурна кривизна i -тої частини бетонного перерізу при $t_p, t_2, t_3, \dots, t_n$ відповідно до (20) [4], $\varepsilon_{s_{i_1}}, \varepsilon_{s_{i_2}}, \dots, \varepsilon_{s_{i_n}}, \varepsilon'_{s_{i_1}}, \varepsilon'_{s_{i_2}}, \dots, \varepsilon'_{s_{i_n}}$ – видовження арматури s та s' при температурі $t_p, t_2, t_3, \dots, t_n$ відповідно до (21) [4].

Температурне видовження ε_i та кривизну осі $(1/r)_i$ позацентрово-стиснутих елементів з тріщинами в розтягнутій зоні визначали за наступними виразами:

$$\varepsilon_{i_1}^{loc} = \varepsilon_{i_1} (l_1/l_0) + \varepsilon_{i_2} (l_2/l_0) + \varepsilon_{i_3} (l_3/l_0) + \dots + \varepsilon_{i_n} (l_n/l_0) \quad (19)$$

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{i_1}^{loc} = \left(\frac{1}{r} \right)_{i_1} \frac{l_1}{l_0} + \left(\frac{1}{r} \right)_{i_2} \frac{l_2}{l_0} + \left(\frac{1}{r} \right)_{i_3} \frac{l_3}{l_0} + \dots + \left(\frac{1}{r} \right)_{i_n} \frac{l_n}{l_0} \quad (20)$$

$$(1/r)_{i_1}^{loc} = (1/r)_{i_1} (l_1/l_0) + (1/r)_{i_2} (l_2/l_0) + (1/r)_{i_3} (l_3/l_0) + \dots + (1/r)_{i_n} (l_n/l_0) \quad , \quad (21)$$

де $\varepsilon_{i_1}, \varepsilon_{i_2}, \varepsilon_{i_3}, \dots, \varepsilon_{i_n}$ – температурне видовження осі елемента при $t_p, t_2, t_3, \dots, t_n$ відповідно до (35) [4], $(1/r)_{i_1}, (1/r)_{i_2}, (1/r)_{i_3}, \dots, (1/r)_{i_n}$ – температурна кривизна осі елемента при $t_p, t_2, t_3, \dots, t_n$ відповідно до (36), (37) [4]. Величини $A_{red}, A_{red,i}, A_{s,red}, A_{s,red}, y_{bi}, y_s, y_s', I_{red}, I_{red,p}, y_{sh}, h_{i_1}, \alpha_{sm}$ приймають згідно вказівок [2]; α_{bt} приймалися для випадку завантаженого бетону, що пропонується у роботі Б.Г. Демчини [1]. Відповідні довжини $(l_p, l_2, l_3, \dots, l_n)$ та температура ділянок нагріву $(t_p, t_2, t_3, \dots, t_n)$ арматури та стиснутої зони бетону приймалися згідно результатів теплотехнічного розрахунку (див. рис. 3).

Була Сергій Степанович є молодшим науковим співробітником науково-дослідної лабораторії №23, кафедри "Будівельні конструкції та мости" в Національному університеті "Львівська політехніка". Наукові інтереси: дослідження залізобетонних конструкцій при дії місцевого нагріву.

Була Сергей Степанович является младшим научным сотрудником научно-исследовательской лаборатории №23, кафедры "Строительные конструкции и мосты" в Национальном университете "Львовская политехника". Научные интересы: исследование железобетонных конструкций при воздействии местного нагрева.

Bula Serhiy Stepanovich is a junior researcher of Research Laboratory №23 of Department "Building Constructions and Bridges" of Lviv Polytechnic National University. Scientific interests: Research of reinforced concrete elements under local heating.