

А.П. Крамарчук, Б.М. Ільницький*

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельних конструкцій та мостів,

*кафедра гідравліки та сантехніки

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОГИНІВ ЗГИНАНИХ СТАЛЕБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ДОДАТКОВОЮ АРМАТУРОЮ ВСТАНОВЛЕНОЮ ЗА РІЗНИХ РІВНІВ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА ПЕРЕВІРКА МЕТОДИКИ ЇХНЬОГО РОЗРАХУНКУ

© Крамарчук А.П., Ільницький Б.М., 2009

Наведено результати досліджень прогинів сталобетонних згинаних елементів, які після дії тривалих навантажень різних рівнів повністю і частково розвантажувались перед встановленням додаткової арматури.

The outcomes of the researches conducted on the bends of composite steel and concrete bending elements, which upon the effect of continuous loadings of various levels were wholly and partially unloaded prior to the adjustment of supplementary reinforcement, have been provided.

Постановка проблеми. Необхідність підсилення перекриттів в процесі експлуатації виникає не тільки під час реконструкції, але і з причини фізичного старіння конструкцій, викликаних різноманітними чинниками. Тривала у часі експлуатація конструкцій у змінних температурно-вологісних умовах знижує експлуатаційну надійність конструкцій, а в умовах впливу агресивного середовища до бетону і арматури значно прискорює втрату несучої здатності конструкцій. Підсилення залізобетонних перекриттів здійснюється не тільки для підвищення несучої здатності і експлуатаційної придатності за зміни діючих на них навантажень, а також за появи дефектів і пошкоджень в конструкціях, які знижують їх несучу здатність. Практика свідчить, що підсилення за рахунок збільшення армування (нарощуванням) є найбільш ефективним для збільшення міцності згинаних елементів. Тим більше, що конструкції підсилюються, як правило, після тривалого часу експлуатації, що сприяє зміцненню стиснутої зони за рахунок зростання міцності бетону, і є можливість довантаження стиснутої зони за рахунок додаткової арматури. Підсилення згинаних елементів проводиться, як правило, за діючих навантажень різних рівнів і додаткова арматура встановлюється за певних прогинів, що впливає на прогини елементів із встановленою додатковою арматурою. Згідно з нормами на підсилення конструкцій (ДБН В.3.1-1-2002) під час розрахунків підсилення конструкцій необхідно враховувати напружений стан конструкцій на час підсилення [3]. У той самий час рекомендується максимальне розвантаження до підсилення, щоб зменшити напруження в арматурі, бетоні і прогини на момент підсилення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню згинаних елементів, підсилених в розтягнутій зоні, присвячені роботи вчених: Онуфрієва Н.М., Барашикова А.Я, Боярчука Б.А., Бондаренко С.В., Вахненко П.Ф., Голишева О.Б., Шагіна О.Л., Горохова Е.В., Кривошеєва П.І., Лозового Ю.І., Хило Є.Р., Мальганова А.И., Литвинова А.Г. Значний внесок в розвиток технологій підсилення згинаних елементів розтягнутою арматурою та методики оцінки напруженого стану внесли учені НУ “Львівська політехніка”: Лозовий Ю.І., Клименко Ф.Є., Хило Є.Р., Попович Б.С. У роботах Клименка Ф.Є., Барабаша В.М., Васильєва А.П., Воронкова Р.В. показана перспективність сталобетонних конструкцій і їх технологічна зручність для підсилення, які можна виконати без зупинки технологічного процесу, а методи кріплення додаткової арматури

(зварювання, приклеювання) забезпечують сумісність роботи початкової і додаткової арматури. У роботах цих авторів показано, що найекономічнішим методом збільшення міцності і жорсткості згинаних елементів є підсилення розтягнутої зони додатковою арматурою. Усі вчені підкреслюють, що для економічного вирішення підсилення та прогнозованої оцінки напруженого стану згинаних елементів після підсилення, необхідно враховувати напружений стан елементів до підсилення та забезпечувати сумісну роботу основної та додаткової арматури. Звернено особливу увагу на необхідність визначення залишкового напруженого стану і його врахування під час розрахунку додаткової арматури підсилення. Автори звертають увагу на необхідність проведення досліджень і розробки методів розрахунку напруженого стану згинаних елементів із врахуванням залишкових напружень в бетоні і арматурі до встановлення додаткової арматури. Частина авторів пропонує під час розрахунку підсилення ненавантажених елементів враховувати основну і додаткову арматуру, а за підсилення в навантаженому стані міцність елемента визначати тільки за додатковою арматурою.

Мета та завдання досліджень. Завдання дослідження залишкових прогинів згинаних елементів після розвантаження із різного рівня дії тривалих навантажень має теоретичне і практичне значення. Оцінка величини залишкових прогинів після розвантаження дасть можливість точніше оцінити прогини елементів із додатковою арматурою і визначити експлуатаційну придатність згинаних елементів за прогинами. Завдання експерименту полягає у неперервних замірах деформацій розтягнутої арматури, стиснутої зони бетону та прогинів за навантаження, витримки під навантаження протягом 230 діб та після розвантаження і витримки протягом однієї години. Під час дослідження змінювались параметри: величина армування, рівень навантаження та рівень розвантаження. Сталебетонні ненапружені балки прольотом 2 м, перерізом 0,12-0,24 м із листовою арматурою завтовшки $d = 2$ і $d = 4$ мм навантажувались у віці бетону 140 діб із призмовою міцністю $R_{bn} = 19 \text{ МПа}$ та початковим модулем пружності $E_b = 29.1 \times 10^3 \text{ МПа}$. Початковий рівень навантаження приймався 0,56 і 0,76 від руйнуючого моменту, рівень розвантаження 0,31 від руйнуючого моменту та повне розвантаження. Контроль сил виконувався двома опорними динамометрами. Деформації стиснутої зони бетону і розтягнутої арматури, а також прогинів вимірювались стаціонарно встановленими індикаторами з ціною поділки 0,01 та 0,001 мм. За навантаження вимірювалось осідання балок на опорах. Детальніше програма і методика досліджень на тривалі навантаження подана у [6].

Експериментальні дослідження. У табл. 1 і на рис 1–6 показано експериментальні і теоретичні значення прогинів, які визначені по кривизні $f = \frac{1}{r} Sl^2$. За умовами навантаження

$S = 0.125$. Враховуючи, що $\frac{l}{h} = \frac{200}{24} = 8.33 < 10$, $\frac{l}{h_{red}} = \frac{200}{24.25} = 7.93 < 10$, в теоретичних

значеннях прогинів враховуємо вплив перерізуючих сил. Згідно зі СНиП 2.03.01-84* збільшення прогинів від дії перерізуючих сил визначимо за допомогою коефіцієнта

$$\kappa = \left[1 + \frac{1.5 \left(\frac{h}{l} \right)^2}{S} \right] = \left[1 + \frac{1.5 \left(\frac{24}{200} \right)^2}{0.125} \right] = 1.194.$$

Тоді прогини становлять: $f = \frac{1}{r} 0.125 \times 1.194 \times 200^2 = 0.06 \times 10^5 \frac{1}{r}$, см.

Оскільки прогини, пропорційні до кривизни, то надалі під час аналізу експериментальних і теоретичних значень вживатимемо термін “прогин”.

Прогини за навантаження і тривалої дії навантаження до встановлення додаткової арматури визначали за зміною №1 до СНиП 2.03.01-84* за формулою

$$f = 0.06 \times 10^5 \frac{M y_s}{z A_s E_s (h_0 - x)}, \quad (1)$$

де коефіцієнт y_s і параметри z і x визначали із врахуванням тривалості навантаження з $y_s(t)$, $j_{b2}(t)$. Під час комбінації короткочасних і тривалих навантажень повний прогин визначають як суму прогинів від окремих видів навантаження.

Як бачимо із рис 1–6, є невелика різниця (до 5 %) між прогинами, визначеними по висоті стиснутої зони x по зміні №1 до СНиП 2.03.01-84* і за рівнянням $x^2 + x(j_f + b) - bj = 0$. При

цьому у формулу $s_{sd} = (R_s - S_s) \frac{E_{sd}}{E_s}$ для визначення x і z підставлялись значення u , визначені за рівнем навантаження, а $u(t)$ – за характеристикою повзучості, бо у нас використовувався порівняно “старий” бетон.

У балках Б-1, Б-3 теоретичні значення прогинів є більші від експериментальних на 2,2 %, а в інших балках теоретичні значення прогинів менші на 1,5 – 8.5 %. Це можна пояснити тим, що залишкові теоретичні прогини у цих же балках менші, а також можливою недооцінкою впливу перерізаючих сил, бо $\frac{l}{h_{0d}} < 10$.

Залишковий прогин за повних розвантажень після тривалої дії навантаження визначають так:

$$f_0(t) = 0.06 \times 10^5 \frac{M(t)(h_0 - \frac{2}{3}x(t))y_s}{4.5z^2(t)A_s E_s (h_0 - x(t))}, \quad (2)$$

де M і $M(t)$ – моменти, що діють, за яких проводиться повне розвантаження і відповідно визначені для них величини y_s , $y_s(t)$, x , $x(t)$, z , $z(t)$.

За часткових розвантажень із моменту “ M ” до моменту “ $M_{роз}$ ” залишковий прогин визначали так:

$$f_{M_{роз}} = f_0 + (f_M - f_0) \frac{M_{роз}}{M}, \quad (3)$$

де f_0 визначається за 4.7, f_M за 4.6. Тривалий характер навантаження, після якого проводили часткове розвантаження у формулі (1), враховано коефіцієнтами $y_s(t)$, $j_{b2}(t)$ і величинами $z(t)$, $x(t)$.

Як бачимо із рисунків (1–6) величина залишкових прогинів під час розвантажень залежить від рівнів навантаження і розвантаження. Чим більший рівень завантаження, тим більші залишкові прогини. Криві прогинів під час розвантажень мають зворотніший вигин, ніж за завантаження, оскільки вони повторюють характер деформацій під час розвантаження розтягнутої арматури і стиснутої зони бетону. Експериментальні значення прогинів за розвантажень, більших від теоретичних на 1–26 % і менших на 1–3,2 %, що свідчить про прийнятність методики автора визначення залишкових прогинів під час розвантажень.

Прогин після встановлення додаткової арматури для будь-якого моменту, зокрема руйнівного, визначали як суму залишкового прогину до встановлення додаткової арматури, зокрема після повного чи часткового розвантаження та приросту прогину від додаткового моменту після встановлення додаткового армування.

Приріст прогину після встановлення додаткової арматури визначали за формулою $s_{sd} = (R_s - S_s) \frac{E_{sd}}{E_s}$ із врахуванням нового армування і геометричних характеристик перерізу:

$$\Delta f_d = 0.06 \times 10^5 \frac{\Delta M y_{sd}}{z_d (h_{0d} - x_d) (A_s E_s + A_{sd} E_{sd})}, \quad (4)$$

де ΔM – приріст моменту, що враховує рівень розвантаження перед встановленням додаткової арматури, і діючий момент. У формулі $M \leq R_b b x_d (h_{0d} - 0.5 x_d) + R_{sc} (h_{0d} - a')$ параметри $y_{s,d}$, h_{0d} , x_d , z_d визначали для умов короткочасного чи тривалого навантаження для арматури ($A_s + A_{sd}$).

Повний прогин елемента із додатковою арматурою для моменту " \bar{M} " при встановленні додаткової арматури без розвантаження за моменту " M " дорівнює:

$$f_{d\bar{M}} = f_M + \Delta f_{d(\bar{M}-M)}, \quad (5)$$

де f_M визначають за (4.6), а $\Delta f_{d(\bar{M}-M)}$ – за (4.10).

Повний прогин елемента із додатковою арматурою для моменту " \bar{M} " при встановленні додаткової арматури після часткового розвантаження із моменту " M " до моменту " $M_{роз}$ " дорівнює

$$f_{d\bar{M}} = f_{M_{роз}} + \Delta f_{d(\bar{M}-M_{роз})}, \quad (6)$$

де $f_{M_{роз}}$ визначали за (3), а Δf_{dM} – за (4).

Експериментальні і теоретичні значення прогинів, мм

Групи балок, коефіцієнт основного і додаткового армування	Марки балок	Момент завант. Момент розвант. $\frac{M}{M_{роз}}$ Нхсм	Рівень завант. $\kappa = \frac{M}{M_p}$ Рівень розвант. $\kappa = \frac{M_{роз}}{M_p}$	Значення прогинів				
				При навантаженні $\frac{f_e}{f_{теор}}$	При тривалій дії навантаження $\frac{f_e(t)}{f_{теор}(t)}$	Залишкові при розвантаженні, встановленні додаткової арматури $\frac{f_e^0, f_e^{M_{роз}}}{f_{теор}^0, f_{теор}^{M_{роз}}}$	При текучості початкової арматури $\frac{f_e}{f_{теор}}$	При руйнуванні $\frac{f_e}{f_{теор}}$
I $\mu=0.0084$ $\mu_d=0.0108$	Б-1	$\frac{8820}{4900}$	$\frac{0.56}{0.31}$	$\frac{2.4}{2.6}$	$\frac{3.2}{3.27}$	$\frac{2.4}{1.9}$	$\frac{8.5}{8.6}$	$\frac{11.2}{9.1}$
	Б-2	$\frac{8820}{0}$	$\frac{0.56}{0}$	$\frac{2.4}{2.6}$	$\frac{3.2}{3.27}$	$\frac{1.1}{0.95}$	$\frac{8.4}{8.3}$	$\frac{10.8}{8.1}$
II $\mu=0.0169$ $\mu_d=0.008$	Б-3	$\frac{17967}{0}$	$\frac{0.56}{0}$	$\frac{4.10}{4.06}$	$\frac{5.2}{5.2}$	$\frac{1.19}{1.0}$	$\frac{8.0}{7.7}$	$\frac{9.4}{8.9}$
	Б-4	$\frac{17967}{9800}$	$\frac{0.56}{0.31}$	$\frac{4.10}{4.06}$	$\frac{5.3}{5.2}$	$\frac{3.1}{3.2}$	$\frac{9.1}{9.0}$	$\frac{11.3}{9.7}$
	Б-5	$\frac{24501}{9800}$	$\frac{0.76}{0.31}$	$\frac{6.0}{5.96}$	$\frac{7.8}{7.31}$	$\frac{4.2}{3.7}$	$\frac{9.6}{10.0}$	$\frac{11.7}{10.5}$
	Б-6	$\frac{24501}{24501}$	$\frac{0.76}{0.76}$	$\frac{6.0}{5.96}$	$\frac{7.8}{7.31}$	$\frac{7.8}{7.31}$	$\frac{9.8}{9.6}$	$\frac{13.8}{12.1}$

Із рис. 1–6 зрозуміло, що прогини згинаних елементів після встановлення додаткової арматури розвиваються, оскільки в елементах із більшим відсотком армування, тобто жорсткість згинаних елементів збільшується. Про це свідчать криві зміни прогинів після встановлення додаткової арматури під час завантаження і витримки під навантаженням від 370 до 575 діб. Збільшення армування і навантаження веде до розвитку пластичних деформацій стиснутої зони, нейтральна вісь зміщується до розтягнутої зони, плече внутрішньої пари зменшується, зростають напруження в арматурі і прогини. Прогини за тривалого навантаження після встановлення додаткового армування визначали на основі величин, які залежать від тривалості навантаження і характеристики повзучості бетону, тобто $y_{sd}(t)$, $j_{b2}(t)$, і величин h_{0d} , $x_d(t)$, $z_d(t)$. Після

текучості початкової арматури приріст зовнішнього моменту сприймає лише додаткова арматура, різко зростають її деформації, деформації стиснутої зони та прогини. Експериментальні дані зміни прогинів після текучості початкової арматури підтверджують умову про момент втрати експлуатаційної придатності згинаним сталобетонним елементом за напружень, що дорівнюють межі текучості початкової арматури. Під час руйнування балок теоретичні значення прогинів, визначені за зміною №1 до СНиП 2.03.01-84*, менші на 9–17 %. Менші теоретичні значення прогинів під час руйнування можна пояснити тим, що в зміні №1 до СНиП 2.03.01-84* прийнята трикутна форма епюри напружень в бетоні стиснутої зони та гіпотеза плоских перерізів. А під час руйнування балки відбувається депланація плоских перерізів і форма епюри напружень в бетоні стиснутої зони наближається до прямокутної. Порівняльна таблиця свідчить про прийнятність методики визначення прогинів сталобетонних згинаних елементів із додатковою ненапруженою арматурою, встановленою за різних рівнів напруженого стану.

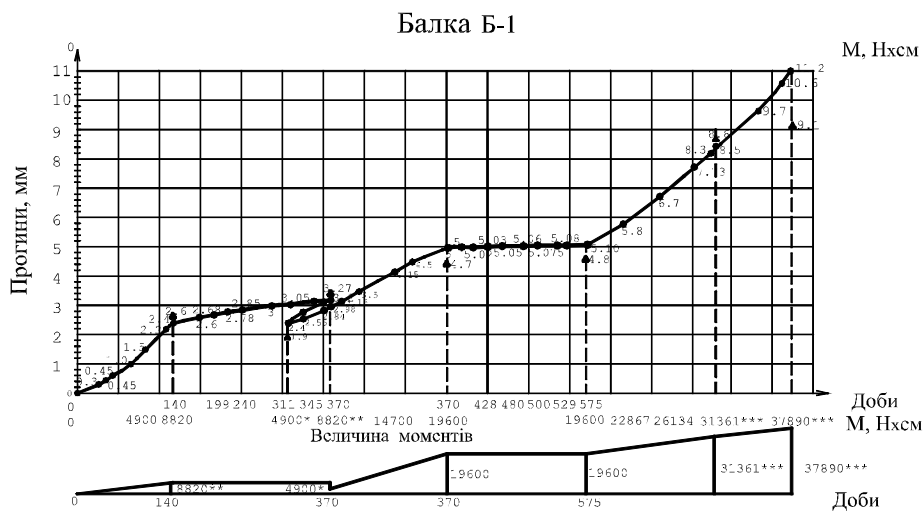


Рис. 1. Експериментальні і розрахункові значення прогинів балки Б-1 за тривалого навантаження: $\mu=0,0084$, $\mu_d=0,0084$. * Момент (розвантаження) встановлення додаткової арматури $\kappa=M/M_p=0,31$. ** Момент завантаження $\kappa=M/M_p=0,31$. *** Момент текучості початкової арматури. **** Руйнуючий момент. ▲ Теоретичні значення за x за зміною №1 до СНиП 2.03.01-84*

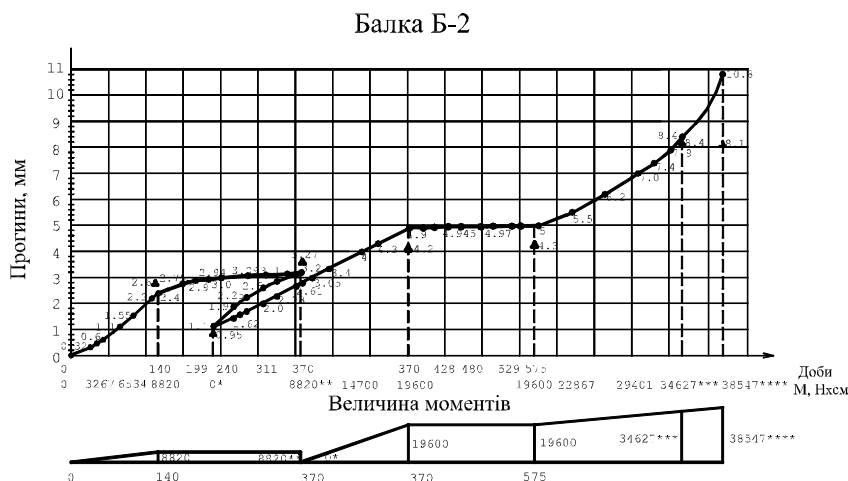


Рис. 2. Експериментальні і розрахункові значення прогинів балки Б-2 за тривалого навантаження: $\mu=0,0084$, $\mu_d=0,0104$. * Момент (розвантаження) встановлення додаткової арматури $\kappa=M/M_p=0$. ** Момент завантаження $\kappa=M/M_p=0,56$. *** Момент текучості початкової арматури. **** Руйнуючий момент. ▲ Теоретичні значення при x за зміною №1 до СНиП 2.03.01-84*

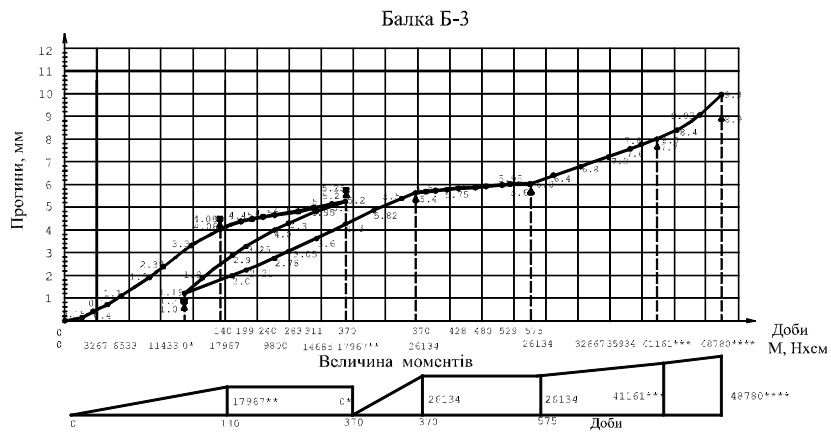


Рис. 3. Експериментальні і розрахункові значення прогинів балки Б-3 за тривалого навантаження: $\mu=0,0169$, $\mu_d=0,008$. * Момент (розвантаження) встановлення додаткової арматури $\kappa=M/M_p=0$. ** Момент завантаження $\kappa=M/M_p=0,56$. *** Момент текучості початкової арматури. **** Руйнуючий момент. ▲ Теоретичні значення за x за змінною №1 до СНиП 2.03.01-84*

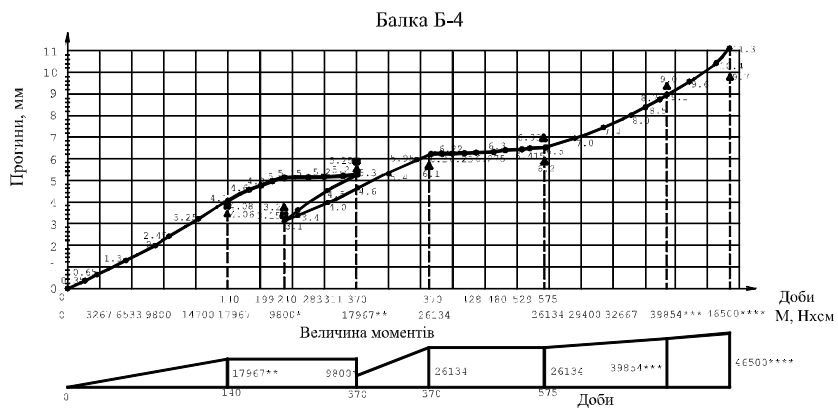


Рис. 4. Експериментальні і розрахункові значення прогинів балки Б-4 за тривалого навантаження: $\mu=0,0169$, $\mu_d=0,008$. * Момент (розвантаження) встановлення додаткової арматури $\kappa=M/M_p=0,31$. ** Момент завантаження $\kappa=M/M_p=0,56$. *** Момент текучості початкової арматури. **** Руйнуючий момент. ▲ Теоретичні значення за x за змінною №1 до СНиП 2.03.01-84*

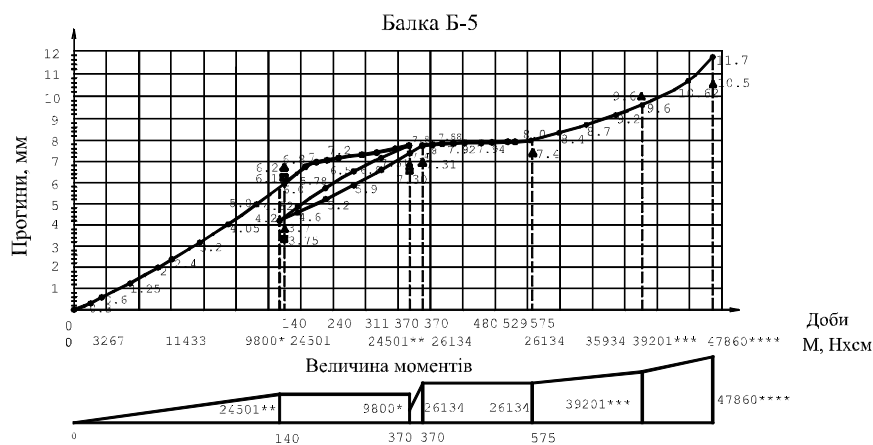


Рис. 5. Експериментальні і розрахункові значення прогинів балки Б-5 за тривалого навантаження: $\mu=0,0169$, $\mu_d=0,008$. * Момент (розвантаження) встановлення додаткової арматури $\kappa=M/M_p=0,31$. ** Момент завантаження $\kappa=M/M_p=0,76$. *** Момент текучості початкової арматури. **** Руйнуючий момент. ▲ Теоретичні значення за x за змінною №1 до СНиП 2.03.01-84*

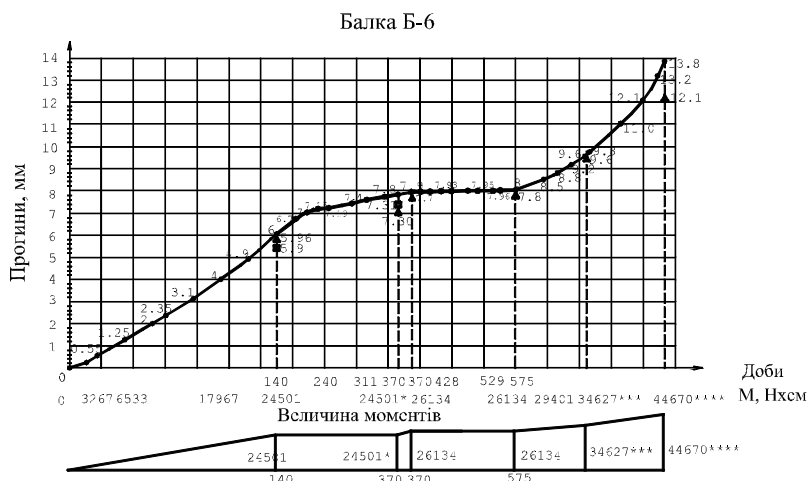


Рис. 6. Експериментальні і розрахункові значення прогинів балки Б-6 за тривалого навантаження: $\mu=0,0169$, $\mu_d=0,008$. * Момент (розвантаження) встановлення додаткової арматури $\kappa=M/M_p=0,76$. *** Момент текучості початкової арматури. **** Руйнуючий момент. ▲ Теоретичні значення за x за зміною №1 до СНиП 2.03.01-84

Висновки: 1. Визначення прогинів під час розвантажень має істотне значення для розрахунку деформацій підсилених балок додатковою арматурою, встановленою після розвантаження згинаного елемента .

2. Величина прогинів під час розвантажень залежить від рівня завантаження і рівня розвантаження та відсотка армування. Запропонована методика визначення залишкових прогинів під час розвантажень дає змогу врахувати вказані чинники.

3. Залишкові прогини за повних і часткових розвантажень рекомендується визначати за методикою автора, на основі залишкових деформацій в арматурі в перерізі над тріщиною.

4. Слід прагнути до найбільшого розвантаження згинаного елемента перед постановкою додаткової арматури, що збільшує жорсткість і момент експлуатаційної придатності згинаного елемента із додатковою арматурою.

5. Прогини згинаного елемента після постановки додаткової арматури визначаються як сума залишкових їх величин (в тому числі і після розвантажень) до постановки додаткової арматури і набутих елементом із новим армуванням і новими геометричними характеристиками.

1. Голишев А.Б., Ткаченко И.И. Проектирование усиленных несущих железобетонных конструкций производственных зданий и сооружений. – К.: ЛОГОС, 2001. – С. 3–97. 2. Климов Ю.А., Голишев А.Б. Изменение №1 к СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» // Будівництво України. – 1996. – №3. – С. 44–47. 3. Ремонт і підсилення несучих та огороджуючих будівельних конструкцій і основ промислових будинків і споруд. ДБН В.1.-1-2002 // Держкомітет України з будівництва і архітектури. – К., 2003. – С. 1–22. 4. Клименко Ф.Є. Сталебетонні конструкції із зовнішнім полосовим армуванням. – К., Будівельник, 1984. – С. 3–20. 5. Клименко Ф.Є., Крамарчук А.П. Міцність та деформативність сталебетонних згинаних елементів підсилених при різних рівнях напруженого стану додатковою ненапруженою арматурою // Зб. “Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація”. – 2004. – Вип. 6. – С. 107–118. 6. Крамарчук А.П. Вплив залишкового напруженого стану перед постановкою додаткової арматури на міцність сталебетонних згинаних елементів // Зб. “Будівельні конструкції, будівлі та споруди” // Вісник ДонДАБА. – 2004(2) 44. – С. 90–98.