

УДК 624.012

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПОПЕРЕДНЬОГО НАТЯГУ АРМАТУРИ НА УПОРИ (НА ФОРМУ)

DETERMINATION OF THE PRESTRESSING VALUE OF REINFORCEMENT ON THE ABUTMENT (ON THE MOULD)

**Бондарський О.Г., к.т.н., доц., Руський С.І., Ужегов С.О.,
Ужегова О.А., к.т.н., доц., (Луцький національний технічний
університет)**

**Bondarskyi O.H., Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Ruskyi S.I., Uzhehov S.O., Uzhehova O.A. Ph.D. in Engineering,
Associate Professor, (Lutsk National Technical University)**

У статті наведено особливості та порядок розрахунку величини попереднього натягу арматури на упори (на форму), запропоновано алгоритм, що базується на чинних нормативних документах.

In the article describes the features and order of calculation of the prestressing value of reinforcement on the abutment (on the mould), proposes an algorithm based on the existing normative documents – ДБН В.2.6.-98:2009 "Concrete and reinforced concrete constructions. The main provisions" [1] and ДСТУ Б В. 2.6-156:2010 "Heavyweight concrete and reinforced concrete constructions. Design rules" [2], which entered into force in Ukraine since 2011-06-01 and the European standards Eurocode-2. By the given algorithm, was performed the calculation of the prestressing value of the rebar reinforcement of the hollow core slab and the comparison of calculation results in accordance with the normative documents of different years.

Ключові слова: розрахунок, натяг, втрати, напруження.

Keywords: calculation, tension, losses, stress.

Більшість збірних згинальних залізобетонних виробів, виготовляють з натягом арматури на упори (на форму). Розрахунок попереднього натягу виконують відповідно до [2, п. 3.3.2].

Сила попереднього натягу, яка прикладається до арматури, P_{max} , не повинна перевищувати величини [2, (3.23)]:

$$P_{max} = A_p \times \sigma_{p,max},$$

де A_p – площа перерізу попередньо напруженої арматури;

$\sigma_{p,max}$ – максимальні напруження, прикладені до попередньо напруженої арматури. Мають виконуватись умови:

$$\sigma_{p,max} \leq 0,8f_{pk}; \quad \sigma_{p,max} \leq 0,9f_{p0,1k}; \quad \sigma_p > 0,3f_{p0,1k}.$$

Тоді початкове зусилля обтиску бетону становитиме

$$P_o = A_p \times \sigma_p.$$

Для попередньо напружених конструкцій з натягом арматури на упори (на форму) властиві два види втрат. Це миттєві втрати (перші втрати) попереднього натягу, які виникають відразу – в момент натягу арматурних стержнів (дротів, канатів), а також залежні від часу втрати (другі втрати) попереднього натягу як результат усадки, повзучості бетону і довготривалої релаксації напруженої арматури.

Миттєві (перші) втрати попереднього напруження визначають за [2, п. 3.3.5]. Втрати при напруженні арматури можуть виникнути до передачі попереднього напруження на бетон внаслідок релаксації розтягнутої арматури протягом періоду, що проходить між натягуванням арматури і обтиском бетону. Ці втрати визначають залежно від виду арматури та способу її натягу за формулами:

для арматури класів A600, A800, A1000:

при механічному натягу: $\Delta P_r = (0,1 \sigma_{p,max} - 20) A_p$;

при електротермічному натягу: $\Delta P_r = 0,03 A_p \sigma_{p,max}$;

для арматури класів Bp1200 – Bp1500, K1400, K1500:

при механічному натягу: $\Delta P_r = A_p \left(0,22 \frac{\sigma_{p,max}}{f_{p0,1k}} - 0,1 \right) \sigma_{p,max}$;

при електротермічному натягу: $\Delta P_r = 0,05 A_p \sigma_{p,max}$.

Якщо при обчисленнях ΔP_r отримують зі знаком "-", приймають $\Delta P_r = 0$.

Теплова обробка збірних залізобетонних виробів також викликає зниження попереднього натягу в арматурі. Ці втрати обчислюють за виразом:

$$\Delta P_\theta = 0,5 A_p E_p \alpha_c (T_{max} - T_o),$$

де A_p – поперечний переріз напруженої арматури;

E_p – модуль пружності напруженої арматури;

α_c – коефіцієнт лінійного температурного розширення бетону

(за відсутності даних приймають $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} C^{-1}$ [1, п.3.1.2.4]);
 $T_{max} - T_o$ – різниця між максимальною і початковою температурами бетону поблизу напруженої арматури (за відсутності точних даних приймають $\Delta T = T_{max} - T_o = 65^\circ C$).

Безпосередньо під час натягування арматури виникають втрати внаслідок тертя в місцях перегинів (при зігнутих дротах або канатах), деформації сталевих форм (упорів) при неодноточасному натягуванні арматури на форму. Ці втрати обчислюють за виразом:

$$\Delta P_3 = \frac{(n-1)\Delta l}{2nl} E_p A_p,$$

де n – число стержнів (груп стрижнів), які натягуються неодноточасно;

Δl – зближення упорів по лінії зусилля натягу, яке визначається з розрахунків деформації форми;

l – відстань між зовнішніми гранями упорів.

Якщо нема даних про конструкцію форми і технологію виготовлення, то приймають $\Delta P_3 / A_p = 30$ МПа. При електротермічному способі натягу арматури втрати від деформації форми не враховують, тобто $\Delta P_3 = 0$.

Втрати зусилля в арматурі внаслідок миттєвої деформації бетону обчислюють за виразом:

$$\Delta P_{el} = A_p E_p \sum \left[\frac{j \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right],$$

де $\Delta \sigma_c(t)$ – зміна напруження у центрі ваги арматури, прикладеного в момент часу t ;

j – коефіцієнт, який дорівнює $(n-1)/2n$;

n – кількість успішно напружених ідентичних пучків. Для спрощення може прийматися як $1/2$; 1 – для змін, викликаних діями, прикладеними після попереднього напруження.

Втрати в анкерах, що виникають при заклинюванні в каналах анкерних пристроїв протягом здійснення заанкерування, після натягування і внаслідок деформації власне анкерів, визначають за формулою:

$$\Delta P_4 = \frac{\Delta l}{l} E_p A_p,$$

де Δl – обтиснення анкерів або зміщення стрижня в затискачах анкерів (якщо нема точних даних, то приймають $\Delta l = 2$ мм);

l – відстань між зовнішніми гранями упорів.

При електротермічному способі натягу арматури втрати від деформації анкерів не враховують, бо вони повинні бути враховані при визначенні повного видовження арматури, тобто $\Delta P_4 = 0$.

Сума миттєвих (перших) втрат попереднього напруження становить:

$$\Delta P = \Delta P_r + \Delta P_\theta + \Delta P_3 + \Delta P_{el} + \Delta P_4.$$

Втрати попереднього напруження, які залежать від часу (другі втрати), на відстані x при дії постійних навантажень визначають за [2, п. 3.3.6]:

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \Delta \sigma_{p,c+s+r} = A_p \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \sigma_{c, QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2 \right) [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)]}$$

де $\Delta \sigma_{p,c+s+r}$ – абсолютне значення зміни напружень в арматурі внаслідок повзучості і усадки та релаксації на відстані x в момент часу t ;

ε_{cs} – обчислене значення деформації усадки, абсолютна величина; включає деформації усадки при висиханні ε_{cd} і деформації внутрішньої усадки ε_{ca} ; залежить від класу бетону, відносної вологості навколишнього середовища, розмірів елемента, приблизно може становити $\varepsilon_{cs} \approx 0,00035 \dots 0,0005$;

E_p – модуль пружності напруженої сталі;

E_{cm} – середній модуль пружності бетону;

$\Delta \sigma_{pr}$ – абсолютна величина зміни напружень в арматурі на відстані x в момент часу t , викликана релаксацією напруженої арматури. Вона визначається при напруженнях

$$\sigma_p = \sigma_p(G + P_{mo} + \varphi_2 Q),$$

де $\sigma_p(G + P_{mo} + \varphi_2 Q)$ – початкові напруження в арматурі, викликані попереднім напруженням, постійними та квазіпостійними впливами;

$\varphi(t, t_0)$ – коефіцієнт повзучості в момент часу t при часі прикладання навантаження t_0 ; у розрахунках рекомендують приймати

$$\varphi(\infty, t_0);$$

$\sigma_{c, QP}$ – напруження в бетоні, прилеглому до арматури, внаслідок дії власної ваги, попереднього напруження та інших відповідних квазіпостійних впливів. Величина може бути наслідком частково власної ваги і початкового напруження або повного сполучення дії $\sigma_p(G + P_{mo} + \varphi_2 Q)$, залежно від стадії роботи конструкції;

A_p – площа всієї напруженої арматури на відстані x ;
 A_c – площа перерізу бетону;
 I_c – момент інерції перерізу бетону;
 z_{cp} – відстань між центром ваги перерізу бетону і арматурою.

Таблиця 1

Алгоритм розрахунку величини попереднього натягу арматури на упори (на форму)

Вихідні дані	
<p>клас бетону C; середнє значення початкового модуля пружності бетону E_{cm}, МПа; коефіцієнт повзучості $\varphi(t, t_o) = \varphi(\infty, t_o)$; клас попередньо напружуваної арматури; характеристичне значення опору арматури розтягу f_{pk}, МПа; умовна межа текучості арматури з величиною залишкових деформацій 0,1% $f_{p0,1k}$, МПа; площа перерізу напруженої арматури A_p, мм² (визначено за розрахунком на міцність нормальних перерізів); модуль пружності напруженої арматури E_p, МПа; коефіцієнт лінійного температурного розширення бетону $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} C^{-1}$; різниця між максимальною і початковою температурами при теплообробці – $\Delta T = T_{max} - T_o = 65^\circ C$; кількість напружених стержнів (пучків) n; ексцентриситет сили попереднього натягу e_{op}, мм; відстань від нижньої грані до центру ваги перерізу y, мм; площа зведеного перерізу A_{red}, мм²; момент інерції зведеного перерізу I_{red}, мм⁴; обтиснення анкерів або зміщення стрижня в затискачах анкерів $\Delta l = 2$ мм; відстань між зовнішніми гранями упорів l, мм; абсолютна величина деформації усадки бетону ε_{cs}; максимальний згинальний момент від експлуатаційного навантаження M_{ser}, кНм; площа перерізу бетону A_c, мм²; момент інерції перерізу бетону I_c, мм⁴; відстань між центром ваги перерізу бетону і арматурою z_{cp}, мм.</p>	
1	<p>Максимальні напруження, прикладені до попередньо напруженої арматури</p> $\sigma_{p,max} \leq 0,8f_{pk}; \quad \sigma_{p,max} \leq 0,9f_{p0,1k}.$
2	<p>Прийняти початкові напруження в арматурі за умови:</p> $\sigma_{p,max} \geq \sigma_p > 0,3f_{p0,1k}.$
3	<p>Початкове зусилля обтиску бетону $P_o = A_p \times \sigma_p$.</p>
Миттєві (перші) втрати	

	Втрати внаслідок релаксації розтягнутої арматури:	
	стерженьова арматура класів А600, А800, А1000	дротова і канатна арматура класів Вр1200 – Вр1500, К1400, К1500
	при механічному натягу:	
4	$\Delta P_r = (0,1 \sigma_{p,max} - 20) A_p ;$	$\Delta P_r = A_p \left(0,22 \frac{\sigma_{p,max}}{f_{p0,1k}} - 0,1 \right) \sigma_{p,max} ;$
	при електротермічному натягу:	
4`	$\Delta P_r = 0,03 A_p \sigma_{p,max} ;$	$\Delta P_r = 0,05 A_p \sigma_{p,max} .$
5	Якщо при обчисленнях ΔP_r отримано зі знаком "-", то приймають $\Delta P_r = 0$.	
6	Втрати внаслідок теплової обробки: $\Delta P_\theta = 0,5 A_p E_p \alpha_c (T_{max} - T_o)$.	
	Втрати внаслідок тертя у місцях перегинів деформації сталевих форм:	
7	при механічному натягу $\Delta P_3 = A_p \times 30 \text{ МПа};$	
7`	при електротермічному натягу $\Delta P_3 = 0$.	
8	Коефіцієнт $j = (n - 1)/2n$.	
9	Зміна напруження у центрі ваги арматури, прикладеного в момент часу t : $\Delta \sigma_c(t) = P_o / A_{red} + P_o e_{op} y / I_{red} .$	
10	Втрати зусилля в арматурі внаслідок миттєвої деформації бетону: $\Delta P_{el} = A_p E_p \sum \left[\frac{j \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right] .$	
	Втрати в анкерах:	
11	при механічному натягу $\Delta P_4 = \frac{\Delta l}{l} E_p A_p ;$	
11`	при електротермічному натягу $\Delta P_4 = 0$.	
12	Сума миттєвих (перших) втрат попереднього напруження: $\Delta P = \Delta P_r + \Delta P_\theta + \Delta P_3 + \Delta P_{el} + \Delta P_4$.	
	<i>Втрати попереднього напруження, які залежать від часу (другі втрати)</i>	
13	Напруження у бетоні внаслідок дії власної ваги та попереднього напруження: $\sigma_{c,QP} = \Delta \sigma_c(t) - M_{ser} y / I_{red} .$	
14	Абсолютна величина зміни напружень в арматурі внаслідок релаксації: $\Delta \sigma_{pr} = \Delta P_r / A_p .$	

15	<p>Абсолютне значення зміни напружень в арматурі внаслідок повзучості і усадки та релаксації:</p> $\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs}E_p + 0,8\Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}}\varphi(t,t_o)\sigma_{c,qp}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}}\frac{A_p}{A_c}\left(1 + \frac{A_c}{I_c}z_{cp}^2\right)[1 + 0,8\varphi(t,t_o)]}.$
16	<p>Другі втрати: $\Delta P_{c+s+r} = A_p\Delta\sigma_{p,c+s+r}.$</p>
17	<p>Сила обтиску бетону з урахуванням усіх миттєвих (перших) втрат і залежних від часу (других) втрат попереднього натягу:</p> $P = P_o - \Delta P - \Delta P_{c+s+r}, \text{ кН}.$

За наведеним алгоритмом виконано розрахунок величини попереднього натягу стержньової арматури порожнистої плити перекриття. При таких вихідних даних: бетон C25/30; $E_{cm}=32500 \text{ МПа}$; $\varphi(t,t_o) = \varphi(\infty,t_o) = 1,8$; арматура A800; $f_{pk} = 840 \text{ МПа}$; $f_{p0,1k} = 765 \text{ МПа}$; $A_p = 904,3 \text{ мм}^2$; $E_p = 190000 \text{ МПа}$; $\alpha_c = 1 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$; $\Delta T = T_{max} - T_o = 65^\circ \text{C}$; $n = 8$; $e_{op} = 7,2 \text{ см}$; $y = 10,8 \text{ см}$; $A_{red} = 1897 \text{ см}^2$; $I_{red} = 111293 \text{ см}^4$; $\varepsilon_{cs} = 0,0004$; $M_{ser} = 54 \text{ кНм}$; $A_c = 1844,1 \text{ см}^2$; $I_c = 108476,8 \text{ см}^4$; $z_{cp} = 7,4 \text{ см}$, отримано результати:

початкові напруження в арматурі прийнято $\sigma_p = 660 \text{ МПа}$;
 початкове зусилля обтиску бетону $P_o = 597 \text{ кН}$;
 перші втрати попереднього напруження $\Delta P = 90,7 \text{ кН}$;
 другі втрати попереднього напруження $\Delta P_{c+s+r} = 90,6 \text{ кН}$;
 сила обтиску бетону з урахуванням усіх втрат $P = 415,7 \text{ кН}$.

Сума втрат досягає 30,4%.

Виконання розрахунку втрат попереднього напруження за нормами СНІП 2.03.01-84* за аналогічними вихідними даними дає сумарні втрати 25,8%.

Розбіжність між результатами розрахунку втрат попереднього напруження за різними нормами становить 4,6%.

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення / Мінрегіонбуд України: ДБН В.2.6-98:2009. – Чинні від 01.06.11. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

2. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування / Мінрегіонбуд України: ДСТУ Б В.2.6.-156: 2010 – Чинний від 01.06.11. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с. – Національний стандарт України.

3. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 48 с.

4. Eurocode-2: Design of concrete structures. – Part 1-1: General rules and rules for building: EN 1992-1-1. – [Final draft, december, 2004]. – Brussels: CEN, – 2004. – 225 p. – Європейський стандарт.

5. Залізобетонні конструкції: Підручник / А.Я.Барашиков, Л.М.Буднікова, Л.В.Кузнецов та ін.; За ред. А.Я. Барашикова.– К.: Вища шк., 1995. – 591 с. іл.

6. Железобетонные конструкции. Курсовое и дипломное проектирование / Под ред. проф. Барашикова А. Я. – К.: Вища школа, 1987. – 416 с.

7. Мурашко Л.А., Колякова В.М., Сморгалов Д.В. Розрахунок за міцністю перерізів, нормальних та похилих до поздовжньої осі, згинальних залізобетонних елементів за ДБН В.2.6-98:2009: Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2012. – 62 с.

8. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие / Под ред. А.Б.Голышева.– К.: Будівельник, 1990.– 544 с.

9. Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий: /Под ред. Вахненко П.Ф. – К.: Будівельник, 1987. – 424 с.

10. Клімов Ю.А. Сучасні методи розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами другої групи: Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2001. – 46 с.

11. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунком за СНиП 2.0301-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтов та ін.; за заг. ред. В.С. Шмуклера. – Харків: Золоті сторінки, 2015. – 208 с.