

УДК 624.01

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.1.20>

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПЕРЕДАЧЕЮ СИЛ ПОПЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ НА БЕТОННУ СУМІШ

Чеканович М.Г. – кандидат технічних наук,
професор кафедри будівництва, архітектури та дизайну
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9110-4109

Розглянуті та проаналізовані відомі у світовій будівельній практиці способи попереднього напруження залізобетонних конструкцій на упори та на затверділий бетон. Виявлені резерви підвищення міцності конструкцій, виготовлених за такими способами.

Розглянуто запропонований автором спосіб попереднього напруження залізобетонних конструкцій на бетонну суміш, який дозволяє значно зміцнити бетон і відповідно до його застосування збільшити міцність конструкцій.

Виявлено парадоксальну з традиційної точки зору річ – напруга в арматурі конструкцій є, а відповідних деформацій пружного стиснення бетону немає, хоч арматура і закріплена в бетоні за рахунок зчеплення.

Проведені дослідження деформаційних властивостей бетонної суміші і бетону в умовах стиску. Встановлено, що традиційний погляд на залізобетон як на матеріал, що складається з бетону (штучного кам'яного матеріалу) і арматурної сталі, неповною мірою відображає дійсність щодо запропонованого способу напруження.

З'ясовано, що у разі натягу арматури й передачі сил попереднього напруження обтискується не бетон як кам'яний матеріал, а бетонна суміш, тобто суміш його компонентів (щебінь, пісок). А оскільки бетону власне ще немає, то зусилля попереднього натягу сприймають здебільшого тверді компоненти суміші (за технологією вода має можливість видалятися із суміші у разі обтиску). Таким чином, деформації стиснення компонентів бетонної суміші повною мірою відповідають зусиллю в арматурі. Всесвітній закон збереження енергії та закон Гука, звичайно, охоплюють наведені конструкції з натягом арматури на бетонну суміш. Тут маємо справу з явищем переходу зовнішньої енергії обтиску у внутрішню енергію зв'язку у разі фазового переходу бетонної суміші до твердого стану.

Розроблені основні підходи до розрахунку залізобетонних конструкцій з натягом арматури на бетонну суміш, що враховують передачу сил попередньої напруги на бетонну суміш, зміцнення бетону конструкції пресуванням.

Ключові слова: міцність, підсилення, деформації, бетонна суміш, спосіб на упори, спосіб на бетон, спосіб на бетонну суміш.

Chekanovych M.H. Features of calculation of building structures with transfer of prestressing forces onto concrete mix

The study considers and analyzes pre-tensioning and post-tensioning methods of prestressing reinforced concrete structures known in the world construction practice. It identifies reserves for increasing the strength of structures made using these methods.

The paper examines the author's method of prestressing reinforced concrete structures onto concrete mix that allows for significant strengthening of concrete and, depending on structures, provides their increased durability.

A paradoxical thing has been revealed – there is stress in the reinforcement of the structure, but there are no corresponding deformations of the elastic compression of concrete, although the reinforcement is fixed in the concrete by adhesion.

The paper investigated deformation properties of concrete mix and concrete under the conditions of compression. It has determined that the traditional understanding of reinforced concrete as a material consisting of concrete (artificial stone material) and reinforcing steel does not fully reflect the reality as to the proposed method of prestressing.

It was found that when the reinforcement is tensioned and the prestressing forces are transferred, it is not concrete as a stone material that is compressed, but the concrete mix, i.e.

the mix of its components (crushed stone, sand). Since there is no concrete yet, the prestressing forces are received mostly by solid components of the mix (according to the technology, water has the ability to be removed from the mix by compression).

Thus, compression deformations of the components of concrete mix fully correspond to the force in the reinforcement. The law of conservation of energy and Hooke's law, of course, also apply to the following structures with during-tensioning onto the concrete mix. Here we deal with the phenomenon of the transition of the external compression energy into the internal bond energy during the phase transition of the concrete mix to the solid state.

The paper develops major approaches to the calculation of reinforced concrete structures with during-tensioning onto the concrete mix; the approaches take into account the transfer of prestressing forces to the concrete mix, strengthening the concrete of the structure by pressing.

Key words: strength, reinforcement, deformation, concrete mix, pretension, post-tension, during-tension.

Вступ. Поряд з широко відомими способами попередньої напруги залізобетонних будівельних конструкцій на упори та на затверділий бетон останнім часом впроваджується у практику будування способів виготовлення конструкцій з натягом арматури на бетонну суміш. Пріоритет останнього належить автору [6]. Застосування запропонованого способу сприяє підвищенню міцності будівельних конструкцій, а розробка методів розрахунку забезпечує надійність проєктних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі у світовій будівельній практиці попередньо напружені залізобетонні конструкції виготовляють за двома способами на упори – *pretension* та на затверділий бетон – *post-tension* [1–4]. Обидва способи передбачають передачу зусилля попереднього напруження арматури на затверділий, міцний бетон. Тут попереднє напруження не зміцнює бетон і майже не впливає на міцність конструкції загалом. Для такого підходу детально розроблені норми розрахунку конструкцій [2–5]. Водночас автором розроблений новий спосіб попереднього напруження «на бетонну суміш» – *during-tension*, який дозволяє зміцнити бетон майже удвічі і відповідно до його застосування збільшити міцність конструкцій. Для цього способу методика розрахунку не досить розроблена, що стримує його використання на практиці, що може сповільнювати подальший прогрес у будівництві в цьому напрямі.

Постановка проблеми. Для поширення нової технології виготовлення залізобетонних елементів будівель і споруд, яка себе зарекомендувала на практиці як така, що значно підвищує міцність і довговічність конструкцій, необхідно мати надійні методи розрахунку. Якщо розглянути діючі зараз будівельні норми й правила для залізобетонних конструкцій [3–5], то виявиться, що цілий ряд явищ не вкладаються в їх межі. Тому виникла потреба розглянути й дати рекомендації щодо розрахунку будівельних конструкцій з натягом арматури на бетонну суміш.

Метою дослідження є розробка основ методики розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій, попередньо напружених за новим способом *during-tension* з передачею сил попередньої напруги на бетонну суміш.

Виклад основного матеріалу дослідження. Уже перші лабораторні досліді, проведені кафедрою будівництва, архітектури та дизайну ХДАЕУ на власній експериментальній базі з виготовлення та випробування залізобетонних балок, виявили парадоксальну з традиційної точки зору річ – напруга в арматурі є, а відповідних деформацій пружного стиснення бетону немає, хоч арматура і закріплена в бетоні за рахунок зчеплення. Випробування залізобетонних балок підтвердило, що перша тріщина з'являється у зоні чистого вигину раніше, ніж цього треба було сподіватися. Тобто у разі заданої попередньої напруги арматури тріщина повинна з'явитися в бетоні за значно більших деформацій розтягування. Співставлення

з конструкціями, виготовленими за традиційним способом на упори з тим самим зусиллям попереднього натягу арматури, підтвердило, що якби картина напружено-деформованого стану співпадала в обох способах, то перша тріщина повинна з'явитися за більших деформацій розтягу в запропонованому способі.

Усе вищенаведене зовсім не доводить, що величина моменту тріщиноутворення $M_{\text{срц}}$ обтисненої балки обов'язково нижча за традиційно виготовлену, бо ж обтиснений бетон має підвищену міцність, але за деформаціями бетону моменту появи тріщини відповідає значно більше його значення. Можливе заперечення, що внаслідок обтиснення бетонної суміші зменшилась його деформативність розтягування. За результатами випробування обтиснених і звичайних призм на вигин встановлено, що таке зменшення деформацій розтягування не перевищує 7×10^5 , а тому суттєво не впливає на величину моменту тріщиноутворення.

Так у чому ж тут справа? Деформації розтягування арматури ϵ , а деформації пружного стиснення бетону, на який закріплена арматура, малі і не відповідають зусиллю в арматурі. Може не діє закон Гука? А як же закон збереження енергії? На перший погляд парадокс.

Але якщо детальніше розглянути це питання, то виявиться, що традиційний погляд на залізобетон як на матеріал, що складається з бетону (штучного кам'яного матеріалу) й арматурної сталі, неповною мірою відображає дійсність щодо запропонованого способу напруження.

З'ясувати все це можна, повернувшись до виготовлення конструкцій. У разі натягу арматури й передачі сил попереднього напруження обтискуємо не бетон як кам'яний матеріал, а бетонну суміш, тобто суміш його компонентів (щебінь, пісок). А оскільки бетону власне ще немає, то зусилля попереднього натягу сприймають здебільшого тверді компоненти суміші (за технологією вода має можливість видалятися із суміші у разі обтиску). Таким чином, деформації стиснення компонентів бетонної суміші повною мірою відповідають зусиллю в арматурі. Всесвітній закон збереження енергії та закон Гука, звичайно, охоплюють і наведені конструкції з натягом арматури на бетонну суміш. Тут маємо справу з явищем переходу зовнішньої енергії обтиску у внутрішню енергію зв'язку у разі фазового переходу бетонної суміші до твердого стану.

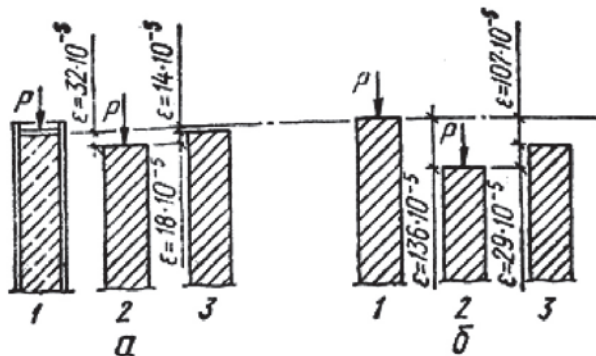


Рис. 1. Схема деформування зразків бетону, навантажених силою $P = 100$ кН у важелевих пристроях: а – за технологією на суміші; б – за технологією на упори; 1 – через півтори години після навантаження; 2 – після витримки під навантаженням протягом 28 діб; 3 – після розвантаження

Далі за технологією відбувається тверднення бетонної суміші і «народження» бетону як штучного кам'яного матеріалу. Як відомо, в'язучий матеріал при цьому об'єднує компоненти в єдиний штучний матеріал. Оскільки тверді компоненти вже мали початкову напругу, то в напруженому стані вони й об'єднуються цементним каменем. До того часу, поки залізобетонний елемент знаходиться у формі, вплив попередньої напруги арматури суттєво не впливає на напружений стан цементного каменю. Після зняття форм з конструкції відбувається відоме явище розпресування. У бетонних елементах при цьому з'являються деформації і напруги розтягування в цементному камені. У залізобетонних конструкціях, виготовлених за наведеним способом, попередня напруга уздовж арматури стримує деформації розпресування. З практики деформації розпресування залежать від величини пресуючої сили і, як правило, не перевищують деформації усадки бетону.

На рис. 1 показано результати експериментальних досліджень деформативності бетону з центральним обтиском у режимі навантаження розроблених автором конструкцій і за традиційним способом на упори, моделювання виконувалося на зразках-призмах розмірами 10 x 10 x 40 см, завантажених у типових важелевих пристроях.

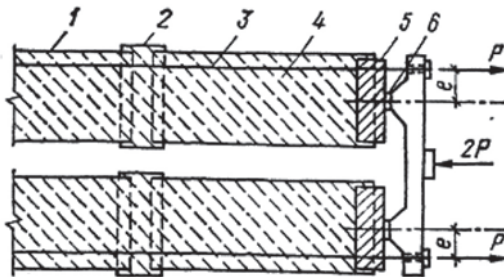


Рис. 2. Попереднє обтиснення залізобетонних конструкцій за способом «на суміш»:
1 – секції металевої форми; 2 – деформаційний шов; 3 – арматура;
4 – бетонна суміш; 5 – рухомий торець; 6 – силова траверса

Як видно з рис. 1, пружні деформації бетону в результаті попередньої напруги за запропонованим способом майже на 40 відсотків нижчі, ніж у традиційному варіанті. При цьому втрати попередньої напруги арматури, викликані процесами у бетону, значно нижчі у способі «на суміш». Але, як з'ясовано вище, останнє не гарантує підвищення тріщиностійкості.

Виготовлення залізобетонних балок за способом на суміш передбачає центральний їх обтиск у формі у разі тверднення та позакентрове після зняття форми з готової конструкції (рис. 2). Якщо вважати, що початковий центральний обтиск компенсується внутрішніми зв'язками бетону після тверднення, а в подальшому деформаціями усадки, то першим членом відомої формули

$$\sigma_{cp} = \frac{P}{A_{red}} + \frac{P \cdot e_{op}}{h_0} \cdot y - \frac{M}{W_{red}}; \quad (1)$$

з деяким наближенням можна знехтувати та прийняти $\frac{P}{A_{red}} = 0$

При $\sigma_{cp} = f_{ct,ser}$

$$M_{cr} = P \cdot e_{op} + f_{bt,ser} \cdot W_{red}; \quad (2)$$

де P – сила попереднього обтиснення; e_{op} – відстань від центру ваги приведенного перерізу до P ; $f_{ct,ser}$ – міцність обтисненого бетону на розтяг; W_{red} – момент опору приведенного перерізу з урахуванням арматури.

Формула (2) дає можливість порахувати момент появи тріщини M_{cr} для балок, у яких передбачено повну передачу сил попередньої напруги арматури на суміш.

За умовами нового способу є можливість підвищити тріщиностійкість передачею певної частини зусилля попереднього натягу арматури на бетон після його тверднення. Так би мовити ступінчаста передача попередньої напруги.

Якщо технологія передбачає два ступеня передачі сили попередньої напруги на суміш P_1 та на затверділий бетон P_2

$$N = \sum_{i=0}^n P_i = P_1 + P_2 ; \quad (1)$$

тоді момент тріщиноутворення буде

$$M_{cr} = P_1 \cdot e_{op} + P_2 \cdot (e_{op} + r) + f_{ct,ser} \cdot W_{red} ; \quad (3)$$

або

$$M_{cr} = e_{op} \cdot (P_1 + P_2) + P_2 \cdot r + f_{ct,ser} \cdot W_{red} ; \quad (4)$$

Підставляючи N , одержимо

$$M_{cr} = N \cdot e_{op} + P_2 \cdot r + f_{ct,ser} \cdot W_{red} ; \quad (5)$$

Формула (5) може використовуватись для знаходження моменту появи тріщини M_{cr} у балках з частковою передачею сил попередньої напруги на бетонну суміш.

Порівняння випадків за формулами (2) і (5) показує, що часткова передача сил попередньої напруги дозволяє підвищити тріщиностійкість балок на величину

$$\Delta M_{cr} = P_2 \cdot r$$

Слід мати на увазі, що характеристики бетону суттєво залежать від величини, тому у разі проектування конструкцій необхідно використовувати методи оптимізації.

Як і очікувалося, структурні зміни в обтисненому бетоні знайшли відображення в результатах випробування зразків. Стиснення призм механічним пресом високої жорсткості дозволило випробування провадити за заданими деформаціями для визначення відповідного навантаження. Було одержано дані залежності $\sigma - \epsilon$ навіть після максимуму діаграми. На зразок встановлювалося вісім механічних тензометрів, з яких чотири давали дані про поперечні деформації, а решта – про поздовжні. Прикладом УК-10ПІМ в експерименті на кожному ступені навантаження реєстрували час проходження ультразвуку. Результати досліджень показано на рис. 3.

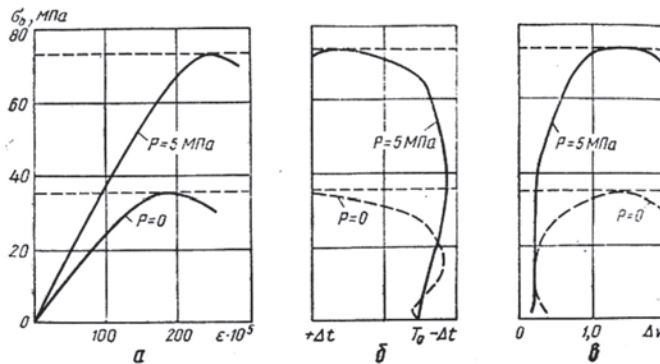


Рис. 3. Результати випробування бетонних призм:

а – залежність $\sigma - \epsilon$; б – крива зміни часу поширення ультразвукового імпульсу;

в – залежність $\sigma - \Delta t_v$. Суцільною лінією позначено призми з попередньо обтисненого, а пунктиром – зі звичайного бетону

На рис. 3, б крива зміни часу поширення ультразвукових імпульсів крізь бетонний зразок свідчить, що на початковій стадії навантаження у звичайному бетоні відбувається зменшення щільності стійких структур бетону, тоді як в обтисненому бетоні щільність наростає, що свідчить про більш однорідну і стійку структуру такого бетону. Наведені дані залежності диференційного коефіцієнта поперечної деформації $\Delta_v = \Delta\varepsilon_2/\Delta\varepsilon_1$ від навантаження (рис. 3, в) підтверджують структурні зміни в обтисненому бетоні і узгоджуються з даними графіка на рис. 3, б.

Діаграми $\sigma - \varepsilon$ на рис. 3, а для звичайного й обтисненого бетону одного складу можуть бути описані поліномами виду $\sigma_b = \Sigma K_i \varepsilon_i$, де у випадку стиснення досить п'ятого порядку. Коефіцієнти K_i в обтисненому бетоні залежать від величини тиску p , тому $K_i = f(p)$. Знаючи коефіцієнти поліному діаграми $\sigma - \varepsilon$, неважко знайти параметри: $f_c, f_{cu}, f_{ct}, E_b, E_{fc}, \varepsilon_{cu}$.

За наведеним способом виготовлення конструкцій обтиск бетонної суміші виконується за рахунок сил попереднього натягу арматури, тобто

$$p = \frac{P}{A_c} = \sum_{i=1}^n \sigma_{sp,i} \mu_{sp,i}; \quad (6)$$

де σ_{sp} – попереднє напруження i -го стержня, передане на суміш;

μ_{sp} – коефіцієнт армування.

Виходячи з цього, коефіцієнти полінома $\sigma_b = \Sigma K_i \varepsilon_i$, які описують діаграму $\sigma_c - \varepsilon_c$, залежать від величини напруги і кількості арматури

$$K_i = f\left(\sum_{i=1}^n \sigma_{sp,i} \mu_{sp,i}\right). \quad (7)$$

Таким чином, функціональний зв'язок параметрів бетону з передньою напругою у способі, який включає передачу сил передньої напруги на суміш, слід віднести до його особливості. Розрахунок величини підвищення міцності у наведених конструкціях може виконуватися за відомими залежностями [1; 7].

Висновки і пропозиції.

Попередньо напружені залізобетонні конструкції з передачею сил попередньої напруги на бетонну суміш можуть мати підвищену тріщиностійкість у разі часткової передачі сил попередньої напруги на суміш, більшу несучу здатність за рахунок структурних змін у обтисненому бетоні. Розрахунок таких конструкцій обов'язково повинен враховувати перехід зовнішньої енергії обтиску у внутрішню енергію зв'язку бетону у разі переходу його від суміші твердого стану, а також вплив сумарного зусилля напруги арматури на характеристики бетону. При цьому втрати попередньої напруги у самій арматурі враховують для уточнення параметрів конструкції.

Впровадження у виробництво залізобетонних конструкцій натягом арматури на бетонну суміш дозволяє підвищити їх міцність до 40–50% і за рахунок цього суттєво зменшити витрати будівельних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Бабич С.М., Бабич В.С. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок: навчальний посібник. 2-ге видання, перероблене і доповнене. Рівне: НУВГП, 2017. С. 10–64.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Основные положения. Действителен от 2011-06-01. Киев, 2011. 71 с. (Государственные строительные нормы Украины).
3. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Правила проектирования. Действителен от 2011-06-01. Киев, 2011. 166 с. (Национальный стандарт Украины).

4. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, p. 30–82.
5. British Standards Institute, (2000). Structural Use of Steelwork in Building, Part 1: Code of Practice for Design – Rolled and Welded Sections, BS 5950-1:2000.
6. Способ изготовления предварительно напряженных железобетонных изделий: А. с. 1747632 СССР, МКИ Е 04 G 21/12. / М.Г. Чеканович. № 1248389; заявл. 26.02.90; опубл. 15.07.92, Бюл. № 26. 6 с.
7. Чеканович М.Г., Янін О.Є. Розрахунок будівельних конструкцій : навчальний посібник. Видання 2-ге, доповнене і перероблене. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. С. 57–77.

REFERENCES:

1. Babich, Ye.M., Babich, V.Ye. (2017). *Rozrakhunok i konstruyuvannya zalizobetonnikh balok* [Calculation and design of reinforced concrete beams]. Rivne. NUVGP. 10–64 [in Ukrainian].
2. DBN V.2.6-98:2009. (2011). *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii iz tyazhelogo betona. Osnovnye polozheniya (Gosudarstvennyye stroitel'nyye normy Ukrainy)* [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Basic provisions. (State building codes of Ukraine)]. Kyiv. 71s. [in Russian].
3. DSTU B V.2.6-156:2010. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii iz tyazhelogo betona. Pravila proektirovaniya (Gosudarstvennyi standart Ukrainy)* [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules (National standard of Ukraine)]. Kyiv. 166 s. [in Russian].
4. Eurocode 2: *Design of concrete structures*. Part 1-1: General rules and rules for buildings, p. 30–82 [in English].
5. British Standards Institute, (2000). *Structural Use of Steelwork in Building*, Part 1: Code of Practice for Design – Rolled and Welded Sections, BS 5950-1:2000 [in English].
6. Chekanovich, M.G. (1992). *Sposob izgotovleniya predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh izdelij (avtorskoye svidetel'stvo 1747632 SSSR, MKI E 04 G 21/12. № 1248389)* [Method for manufacturing prestressed concrete products (certificate of authorship 1747632 USSR, MKI E 04 G 21/12. № 1248389)]. Byul. No. 26. 6 s. [in Russian].
7. Chekanovych, M.H., Yanyin, O.Ye. (2021). *Rozrakhunok stroytel'nykh konstruksiy* [Calculation of building structures]. Kherson: OLDY-PLYUS. 57–77 [in Ukrainian].