

УДК 624.046.012:624.046

СПРОЩЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ, ЩО ЗГИНАЮТЬСЯ

БАМБУРА А.М.^{1*}, *д.т.н., проф.*САЗОНОВА І. Р.^{2*}, *інж., ст.н.с.*

^{1*}Відділ надійності конструкцій будівель і споруд, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 249-37-44, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Відділ надійності конструкцій будівель і споруд, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», вул. Преображенська, 5/2, 03037, Київ, Україна, тел. +38 (044) 249-38-88, e-mail: rostislavovna@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-8226-3589

Анотація. Мета. Метою даної роботи є розробка аналітичного апарату для спрощеного визначення площі звичайної та попередньо напруженої арматури в розтягнутій зоні згинного елемента прямокутного перерізу при одношаровому армуванні. **Методика.** При згині залізобетонного елемента прямокутного перерізу з армуванням у розтягнутій зоні в один шар можна виконати попереднє призначення армування. Попереднє тому, що рівняння рівноваги є системою нелінійних рівнянь і її рішення в граничному стані не завжди відповідає максимальній несучій здатності. Діаграма "момент-кривизна" в ряді випадків має екстремум (є низхідна гілка), який знаходиться далеко від граничного стану. При попередньому визначенні армування за раціональний граничний стан прийнято одночасну реалізацію граничних деформацій в стиснутій (ϵ_{cu}) і розтягнутій (ϵ_{s0}) зонах. Аналіз рівнянь рівноваги отриманих за деформаційним методом показав, що для конструкцій, що згинаються, є можливість визначити армування в граничному стані за обома рівняннями. **Результати.** Запропоновано методику та алгоритм для спрощеного визначення площі звичайної та попередньо напруженої розтягнутої арматури для прямокутного перерізу. Для оцінки точності отриманих аналітичних залежностей виконані розрахунки з визначення площі звичайної та попередньо напруженої арматури в розтягнутій зоні при одношаровому армуванні. Порівняння результатів розрахунків за спрощеною методикою з прямим розрахунком за деформаційним методом показав, що похибка в попередньому визначенні площі арматури не перевищує 8,5 %. За представленим алгоритмом для спрощеного визначення площі розтягнутої арматури для прямокутного перерізу приведені приклади розрахунку балки з звичайною та попередньо напруженою арматурою. **Наукова новизна.** Отримано аналітичні залежності та методику для спрощеного визначення площі звичайної та попередньо напруженої арматури в розтягнутій зоні при одношаровому армуванні. **Практична значимість.** Рекомендовані прості залежності дозволяють визначити площу армування конструкцій, що працюють на згин, незалежно від того, яка діаграма деформування бетону використовується. Отримані залежності дозволяють визначити площу як звичайної, так і попередньо напруженої арматури.

Ключові слова: залізобетонний елемент, деформаційний метод, прямокутний переріз, площа арматури, аналітичні залежності, попереднє напруження.

УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

БАМБУРА А.Н.^{1*}, *д.т.н., проф.*САЗОНОВА И. Р.^{2*}, *инж., ст.н.с.*

^{1*}Отдел надежности конструкций зданий и сооружений, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 249-37-44, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Отдел надежности конструкций зданий и сооружений, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», ул. Преображенская, 5/2, 03037, Киев, Украина, тел. +38 (044) 249-38-88, e-mail: rostislavovna@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-8226-3589

Аннотация. Цель. Целью данной работы является разработка аналитического аппарата для упрощенного определения площади обычной и предварительно напряженной арматуры в растянутой зоне изгибаемого элемента прямоугольного сечения при однорядном армировании. **Методика.** При изгибе железобетонного элемента прямоугольного сечения с армированием в растянутой зоне в один ряд можно выполнить предварительное назначение армирования. Предварительное потому, что уравнения равновесия являются системой нелинейных уравнений и ее решение в предельном состоянии не всегда соответствует максимальной несущей способности. Диаграмма "момент-кривизна" в ряде случаев имеет экстремум (есть ниспадающая ветвь), который находится далеко от предельного состояния. При предварительном определении

армирования за рациональное предельное состояние принято одновременную реализацию предельных деформаций в сжатой (ϵ_{cu}) и растянутой (ϵ_{s0}) зонах. Анализ уравнений равновесия, полученных с использованием деформационного метода, показал, что для изгибаемых конструкций есть возможность определить армирование в предельном состоянии по обоим уравнениями. **Результаты.** Предложены методика и алгоритм для упрощенного определения площади обычной и предварительно напряженной растянутой арматуры для прямоугольного сечения. Для оценки точности полученных аналитических зависимостей выполнены расчеты по определению площади обычной и предварительно напряженной арматуры в растянутой зоне при однослойном армировании. Сравнение результатов расчетов по упрощенной методике с прямым расчетом по деформационному методу показал, что погрешность в предварительном определении площади арматуры не превышает 8,5%. По представленному алгоритму для упрощенного определения площади растянутой арматуры для прямоугольного сечения приведены примеры расчета балки с обычной и предварительно напряженной арматурой. **Научная новизна.** Получены аналитические зависимости и методика для упрощенного определения площади обычной и предварительно напряженной арматуры в растянутой зоне при однослойном армировании. **Практическая значимость.** Рекомендуются простые зависимости позволяют определить площадь армирования изгибаемых конструкций независимо от того, какая диаграмма деформирования бетона используется. Полученные зависимости позволяют определять площадь как обычной, так и предварительно напряженной арматуры.

Ключевые слова: железобетонный элемент, деформационный метод, прямоугольное сечение, площадь арматуры, аналитические зависимости, предварительное напряжение.

CONCERNING OF CALCULATION OF THE REINFORCED CONCRETE PRESTRESSED CONTAINMENTS OF NUCLEAR POWER PLANTS

BAMBURA A.M.^{1*}, *Doctor in Technical science, professor*
SAZONOVA I. R.^{2*}, *Engineer, senior scientist*

^{1*} Department of building and structures reliability, State enterprise «The State research and development Institute of building constructions», 5/2, Preobrazhenska Str., Kyiv, 03037, Ukraine, tel. +38 (044) 249-37-44, e-mail: abambura@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1402-3345

^{2*} Department of building and structures reliability, State enterprise «The State research and development Institute of building constructions», 5/2, Preobrazhenska Str., Kyiv, 03037, Ukraine, тел. +38 (044) 249-38-88, e-mail: rostislavovna@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-8226-3589

Annotation. Goal. The purpose of this work is to develop an analytical apparatus for a simplified determination of the area of ordinary and pre-stressed fittings in the stretched zone of the bent element of a rectangular section with single-layer reinforcement. **Techniques.** When bending a reinforced concrete element of a rectangular section with reinforcement in a stretched zone in one layer it is possible to carry out the initial purpose of reinforcement. Previously, the equilibrium equation is a system of nonlinear equations and its solution in the boundary state does not always correspond to the maximum bearing capacity. The "moment-curvature" diagram in some cases has an extremum (there is a descending branch), which is far from the boundary state. At the preliminary determination of reinforcement for a rational boundary state, simultaneous implementation of boundary deformations in compressed (ϵ_{cu}) and stretched (ϵ_{s0}) zones was made. The analysis of the equilibrium equations obtained by the deformation method showed that for bending structures it is possible to determine the reinforcement in the boundary state for both equations. **Results.** A methodology and algorithm for a simplified determination of the area of a conventional and pre-stressed stretched armature for a rectangular cross section is proposed. In order to evaluate the accuracy of the analytical dependencies obtained, calculations were made to determine the area of the ordinary and pre-stressed fittings in the stretched zone with single-layer reinforcement. Comparison of the results of calculations with the simplified method with direct calculation according to the deformation method showed that the error in the preliminary determination of the area of the armature does not exceed 8.5%. According to the presented algorithm, for the simplified determination of the area of stretched reinforcement for a rectangular cross-section, examples are given of calculating a beam with a conventional and prestressed reinforcement. **Scientific novelty.** The analytical dependencies and the methodology for the simplified determination of the area of the usual and pre-stressed reinforcement in the stretched zone with single-layer reinforcement are obtained. **Practical significance.** The recommended simple dependencies allow you to determine the reinforcement area of the bending structures, regardless of which deformation pattern the concrete is used. The obtained dependencies allow to determine the area of both conventional and pre-stressed fittings.

Keywords: Reinforced concrete element, deformation method, rectangular section, reinforcement area, analytical dependences, pre-stressing.

Вступ

В українських будівельних нормах [1, 2] розрахунок залізобетонних конструкцій при дії згинального моменту та поздовжніх сил слід виконувати на основі розрахункової моделі нормального перерізу з використанням деформационного методу. За критерій появи

граничного стану, що розглядається, приймають досягнення деформаціями стиснутого бетону або розтягнутої арматури у перерізі граничних значень відносних деформацій з відповідних діаграм їх стану. Найбільш точно можна визначити площу раціонального армування для різних форм розрахункового перерізу при довільній кількості шарів арматури і довільному поєднанні арматурних

стрижнів різної природи і з різними властивостями (сталеві, на основі скла, базальту, вуглецю, ненапружена і попередньо напружена) прямим підбором із використанням рівняння рівноваги за деформаційним методом [3, 6]. Але в практиці проектування часто виникає потреба на швидку оцінити несучу здатність конструкції або визначити розрахунковим шляхом початкове значення необхідної площі армування залізобетонних елементів, наприклад для попереднього визначення розмірів конструкцій на стадії проекту або при техніко-економічному порівнянні варіантів будівлі. Тому отримання залежностей для спрощеного визначення площі армування прямокутного розрахункового перерізу конструкції при одношаровому армуванні в розтягнутій зоні є актуальним.

Мета

Метою даної роботи є розробка аналітичного апарату і методики спрощеного розрахунку для визначення площі звичайної та попередньо напруженої арматури в розтягнутій зоні при одношаровому армуванні.

Методика

Аналіз рівнянь рівноваги прямокутного розрахункового перерізу (1) та (2) показав, що не важко отримати залежності для приблизного визначення робочого армування елементів що згинаються. При цьому, важливо дотримуватись при розміщенні стрижнів арматури у розтягнутій зоні в один шар вимог щодо конструювання, згідно з розділом 7 [2]. Приблизно тому, що рівняння рівноваги (1) та (2) [2, формули (4.3), (4.4)] є системою нелінійних рівнянь і її рішення в граничному стані не завжди відповідає максимальній несучій здатності. Діаграма стану перерізу “момент-кривизна” в ряді випадків має екстремум (є низхідна гілка), який знаходиться далеко від граничного стану.

$$\frac{bf_{cd}}{\square} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma_{cu}^{k+1} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\square^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma_{cu}^{k+2} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0; \quad (2)$$

де: b – ширина перерізу, м;

f_{cd} – розрахункове значення міцності бетону на стиск, МПа;

$\aleph = \frac{1}{\rho} = \frac{(\epsilon_{c(1)} - \epsilon_{c(2)})}{h}$ кривизна вигнутої осі в перерізі;

$\epsilon_{c(1)}$ – деформації бетону стиснутої фібри;

$\epsilon_{c(2)}$ – осереднені деформації розтягнутої фібри бетону;

$\gamma = \frac{\epsilon_{c(1)}}{\aleph}$ – допоміжна величина;

$x_1 = \epsilon_{c(1)} / \aleph$ – висота стиснутої зони;

$\bar{\aleph} = \aleph / \epsilon_{c1}$ – відносна кривизна;

A_{si} – площа арматури в i -му шарі;

σ_{si} – напруження в арматурі в i -го шару;

z_{si} – відстань i -го стрижня або прошарку арматури від найбільш стиснутої грані перерізу;

a_k – коефіцієнти поліному, що описує нелінійну залежність між напруженнями та деформаціями стиску [1, Додаток Д].

За раціональний граничний стан прийнято одночасну реалізацію граничних деформацій стиснутого бетону (ϵ_{cu}) і розтягнутої арматури на межі текучості (ϵ_{s0}).

З аналізу залежностей (1), (2) витікає, що не важко визначити армування перерізу в граничному стані (рис. 1) за обома залежностями. Для цього необхідно виконати наступні перетворення зазначених рівнянь:

$$\frac{bf_{cd}}{\square} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma_{cu}^{k+1} + f_{yd} A_{si} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{bf_{cd}}{\square^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma_{cu}^{k+2} + f_{yd} A_s (x_1 - d_0) = M; \quad (4)$$

де: M – згинальний момент;

f_{yd} – розрахункове значення міцності арматури на границі текучості;

d_0 – робоча висота поперечного перерізу;

$\gamma_{cu} = \frac{\epsilon_{cu1}}{\epsilon_{c1}}$; $\square = \frac{\epsilon_{cu1} - \epsilon_{s0}}{d_0}$; $\bar{\square} = \frac{\epsilon_{cu1} - \epsilon_{s0}}{d_0 \epsilon_{c1}}$; $x_1 = \frac{\epsilon_{cu1}}{\bar{\square}}$.

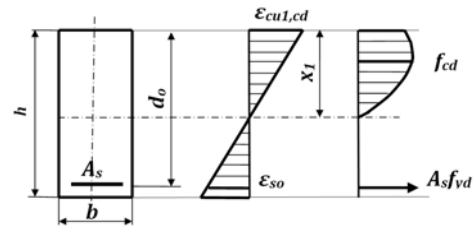


Рис. 1. Напружено-деформований стан прямокутного перерізу в граничному стані/

Stress-deformed state rectangular cross-section in the limiting state

При згині більш достовірні результати дає використання рівняння моментів (2), а рівняння (1) може бути використане для оцінки рівноваги перерізу.

Таким чином, з залежності (4) отримуємо:

$$A_s = \frac{M - \frac{bf_{cd}}{\square^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma_{cu}^{k+2}}{f_{yd}(x_1 - d_0)}, \quad (5)$$

Вираз $f_{cd(ck)} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma_{cu}^{k+2}$ в залежності (5) фактично є момент епюри стиснутого бетону відносно нейтральної осі і являє собою константу для кожного класу міцності бетону в залежності за якою групою граничних станів виконується розрахунок, його величини можуть бути представлені в табличній формі, що дозволить виконувати розрахунки за допомогою звичайного калькулятора

Окрім цього, деформаційний метод дозволяє в першому наближенні, виходячи з граничного деформованого стану (рис. 1), отримати величину

одного шару армування прямокутного перерізу незалежно від того, яка діаграма стану бетону використовується.

Аналіз формули (5) показав, що другий член чисельника цієї залежності є моментом стиснутої зони відносно нейтральної осі перерізу. Відомо, що при рішенні системи рівнянь рівноваги відносно нейтральної осі, момент стиснутої зони чисельно рівний моменту розтягнутої арматури. Таким чином, момент розтягнутої арматури відносно нейтральної осі складає половину зовнішнього моменту, тому в першому наближенні залежність для визначення площі розтягнутої арматури має вигляд:

$$A_s = \frac{-M}{2f_{yd}(x_1 - d_0)} \quad (6)$$

Для отримання площі арматури за залежністю (6), необхідно мати висоту стиснутої зони x_1 . Висоту стиснутої зони визначають з розгляду раціонального граничного деформованого стану перерізу за залежністю:

$$x_1 = \frac{d_0 \varepsilon_{cu1,cd}}{(\varepsilon_{cu1,cd} + \varepsilon_{s0,d})} \quad (7)$$

За рівнянням рівноваги сил у перерізі (3), аналізуємо необхідність зміни міцності бетону або встановлення арматури в стиснутій зоні.

Залежності (6) та (7) можуть бути використані і при необхідності спрощеного визначення площі попередньо напруженої арматури (рис. 2).

В даному випадку, за граничний стан приймаємо досягнення граничних деформацій стиснутим бетоном, а деформації арматури при цьому $\Delta \varepsilon_{sp} = \varepsilon_{p0} - \varepsilon_{s0,sp}$ (в українських будівельних нормах прийнято таке правило знаків: для стиску як бетону, так і арматури знак додатний, для розтягу - від'ємний).

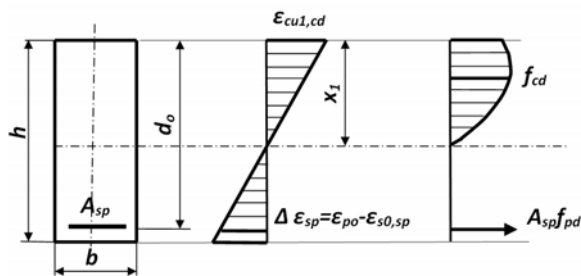


Рис. 2. Напружено - деформований стан прямокутного перерізу з попередньо напруженою арматурою/

Strained - deformed state of a rectangular cross section with pre-stressed fittings

Отримане значення розрахункової площі арматури буде декілька більше за необхідне для забезпечення достатньої несучої здатності розрахункового перерізу, тому що не враховано роботу попередньо напруженої арматури на другій ділянці діаграми при $\varepsilon_{sp} > \varepsilon_{p0}$. Але при наступній перевірці прямим розрахунком не важко буде

уточнити та підібрати більш раціональне значення площі попередньо напруженої арматури при забезпеченні вимог за другою групою граничних станів.

Для розрахунку площі попередньо напруженої арматури використовують залежність (6). При цьому висоту стиснутої зони визначають за залежністю:

$$x_1 = \frac{d_0 \varepsilon_{cu1,cd}}{(\varepsilon_{cu1,cd} + \Delta \varepsilon_{sp})} \quad (8)$$

$$\text{де: } \Delta \varepsilon_{sp} = \varepsilon_{p0} - \varepsilon_{s0,sp}$$

Для розрахунків реальних конструкцій, бажано щоб величина $\Delta \varepsilon_{sp} = \varepsilon_{p0} - \varepsilon_{s0,sp}$ не перевищувала значення 0,00210 для стрижнів діаметром менше 25 мм. При цьому, необхідно виконати перевірку відповідності вимогам за другою групою граничних станів. Так, ширину розкриття тріщин при $\Delta \varepsilon_{sp} > 0,00210$ необхідно визначати розрахунком, і, як правило, вона буде перевищувати допустиму. Величину різниці деформацій $\Delta \varepsilon_{sp}$ можливо регулювати рівнем попереднього напруження або шляхом зменшення його втрат.

Виходячи з наведеного вище пропонуємо такий алгоритм для спрощеного визначення площі розтягнутої арматури для прямокутного перерізу:

1. Необхідні вихідні дані – величини зовнішнього моменту (M_{Ed}), геометрії перерізу, захисного шару, класу бетону та класу арматури.

2. Визначаємо параметри:

f_{cd} , $\varepsilon_{cu1,cd}$, $\varepsilon_{c1,cd}$, f_{yd} , $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$, $d_0 = \square - c_{nom}$ та x_1 за залежностями (7) або (8);

3. Для визначення раціональної площі розтягнутої арматури, необхідна перевірка величини висоти стиснутої зони $x_1 \leq 0.6d_0$. Якщо висота стиснутої зони значно більше $0.6d_0$, необхідно збільшити клас бетону і виконати пп 1, 2. Якщо збільшення класу бетону не призводить до потрібного результату, необхідно призначити розрахункову стиснуту арматуру. В цьому випадку площа розтягнутої арматури визначається за залежністю:

$$A_{s2} = \frac{-M + A_{s1} f_{yd1} (x_1 - z_{s1})}{2f_{yd2} (x_1 - d_0)} \quad (9)$$

де: A_{s1} A_{s2} - площа стиснутої і розтягнутої арматури відповідно;

f_{yd1} , f_{yd2} - розрахункові значення міцності стиснутої і розтягнутої арматури на границі текучості відповідно;

z_{s1} - відстань стиснутої арматури від найбільш стиснутої грані перерізу.

4. Визначаємо необхідну площу арматури за залежністю (6);

5. Визначаємо кількість стрижнів, з дотриманням вимог щодо конструювання розділу 7 [2]. Відповідно коригуємо відстань від центру шарів стрижнів до найбільш стиснутої грані (z_{s1} , d_0);

6. З метою отримання повної діаграми стану та несучої здатності перерізу виконуємо прямий

розрахунок за системою рівнянь для другої форми рівноваги (1) та (2) ([2], формули (4.3), (4.4));

7. Виконуємо співставлення несучої здатності із зовнішнім моментом (M_{Ed}). У випадку, коли несуча здатність M_u менша за M_{Ed} , необхідно збільшити площу армування. В випадку, коли несуча здатність більша за M_{Ed} , необхідно виконати оцінювання точності рішення. Якщо це перевищення є меншим ніж 5%, можна вважати, що необхідна точність рішення досягнута. На цьому розрахунку закінчено.

Результати

Для оцінки точності отриманих вище аналітичних залежностей було виконано розрахунки з визначення площі звичайної та попередньо напруженої арматури в розтягнутій зоні при одношаровому армуванні. Порівняння результатів розрахунків за спрощеним методом з "точним" показав, що похибка в попередньому визначенні площі арматури не перевищує 8,5 %.

По наведеному вище алгоритму для попереднього визначення площі розтягнутої арматури для прямокутного перерізу приведені приклади розрахунку балки з звичайною та попередньо напруженою арматурою.

Приклад підбору армування з звичайною арматурою:

1. Вихідні дані: Залізобетонна балка перекриття довжиною 9 м з розмірами перерізу: $b=300$ мм, $h=600$ мм; клас міцності бетону C25/30; клас арматури A500C ($E_s=200000$ МПа, $f_{yd}=416,6$ МПа). Приймаємо, що з урахуванням всіх втрат попереднє напруження в арматурі становить 400 МПа. Захисний шар для нижнього шару арматури $25+10=35$ мм. Граничний розрахунковий момент $M_{Ed}=506$ кН·м.

2. Визначаємо параметри: $f_{cd}=17$ МПа; $\varepsilon_{cu1,cd}=0,00382$; $\varepsilon_{cl,cd}=0,0018$; $f_{yd}=416,6$ МПа; $E_s=200000$ МПа;

$$\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{416,6}{200000} = 0,002083;$$

$$d_0 = h - c_{nom} - \frac{\phi}{2} = 0,6 - (0,025 + 0,01) - \frac{0,025}{2} = 0,5525 \text{ м};$$

$$x_1 = \frac{d_0 \varepsilon_{cu1,cd}}{\varepsilon_{cu1,cd} + \varepsilon_{s0,d}} = \frac{0,5525 \cdot 0,00328}{(0,00328 + 0,002083)} = 0,338 \text{ м}.$$

3. Перевіряємо величину висоти стиснутої зони $x_1 \leq 0,6d_0$. Висота стиснутої зони приблизно дорівнює $0,6d_0$ ($0,338 \approx 0,6 \cdot 0,5525 = 0,332$).

4. Визначаємо необхідну площу арматури за залежністю (6):

$$A_s = \frac{-M}{2f_{yd}(x_1 - d_0)} = \frac{-0,506}{2 \cdot 416,6(0,338 - 0,5525)} = 0,0028 \text{ м}^2.$$

5. Визначаємо кількість стрижнів, з дотриманням вимог щодо конструювання розділу 7 [1]. Відповідно коригуємо відстань від центру шарів стрижнів до найбільш стиснутої грані (z_{si} , d_0):

Призначаємо в нижній зоні $6\phi 25$ A500C ($A_s = 29,45 \text{ см}^2 = 0,002945 \text{ м}^2$). Для першого шару в розтягнутій зоні назначаємо $3\phi 25$ A500C, для другого шару $3\phi 25$ A500C, верхнє армування (в стиснутій зоні) конструктивне $2\phi 12$ A500C. Захисний шар для першого шару арматури $25+10=35$ мм, для другого шару $-35+25+26=86$ мм, для верхньої арматури - 29 мм.

На рис. 3 показано поперечний переріз балки з розташуванням шарів арматури.

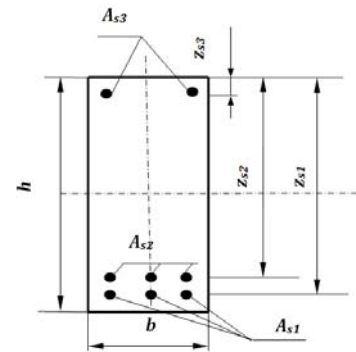


Рис.3. Переріз балки/

Beam section

В таблиці 1 приведені необхідні для розрахунку вихідні дані.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку/
Output data for calculation

Номери шарів арматури	Площа арматури кожного шару A_{si} , м ²	Відстань від шару арматури до найбільш стиснутої грані перерізу z_{si} , м
1	0.001473	0.5525
2	0.001473	0.5015
3	0.000226	0.035

6. Виконуємо прямий розрахунок за системою рівнянь для другої форми рівноваги (1) та (2) ([1], формули (4.3), (4.4)).

Результати розрахунку балки представлені в таблиці 2 та на рисунку 4.

Таблиця 2

Результати розрахунку балки/
Results of calculation of beam

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	x_l , м	σ_{s1}	σ_{s2}	σ_{s3}
1	0.000328	-0.000557	0.222	-100.4	-82.4	55
2	0.000656	-0.001049	0.231	-188.6	-153.9	111
3	0.000984	-0.001476	0.2401	-264.4	-214.4	168
4	0.001312	-0.001836	0.250	-328.0	-263.9	225
5	0.00164	-0.002132	0.261	-379.2	-302.5	283
6	0.001968	-0.002427	0.268	-416.6	-341.1	342
7	0.002296	-0.002755	0.273	-416.6	-385.2	400
8	0.002624	-0.003066	0.276	-416.6	-416.6	435
9	0.002952	-0.003476	0.275	-416.6	-416.6	435
10	0.00328	-0.003772	0.279	-416.6	-416.6	435

Примітки: $\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$ та $\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$ деформації на стиснутій та розтягнутій грані відповідно.

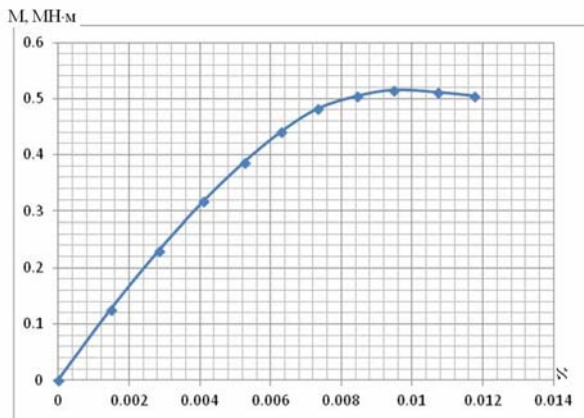


Рис. 4 - Діаграма стану перерізу залізобетонної балки/

The diagram will be the cross section of a reinforced concrete beam

Несуча здатність балки $M = 516$ кН·м.

7. Виконуємо співставлення несучої здатності із зовнішнім моментом (M_{Ed}):

Визначена несуча здатність балки $M = 516$ кН·м перевищує зовнішній момент $M_{Ed} = 506$ кН·м всього на 2%, що менше 5%, це означає, що необхідна точність розрахунку забезпечена.

Приклад підбору армування з попередньо напруженою арматурою:

1. Вихідні дані: Залізобетонна балка перекриття довжиною 9 м з розмірами перерізу: $b = 300$ мм, $h = 600$ мм; клас міцності бетону C25/30; попередньо напружена стрижнева арматура класу A800. Приймаємо, що з урахуванням всіх втрат попереднє напруження в арматурі становить 400 МПа. Захисний шар для нижнього шару арматури $25 + 10 = 35$ мм. Граничний розрахунковий момент $M_{Ed} = 506$ кН·м.

2. Визначаємо параметри: $f_{cd} = 17$ МПа; $\varepsilon_{cu1,cd} = 0,00382$; $\varepsilon_{cl,cd} = 0,0018$; $f_{p0,1k} = 765$ МПа, $f_{pk} = 840$ МПа; $E_p = 190000$ МПа; $f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} = \frac{765}{1.2} = 637.5$ МПа; $\varepsilon_{s,0sp} = \frac{400}{190000} = 0.0021$;

$$\varepsilon_{pd,0} = \frac{f_{pd,0}}{E_p} = \frac{637.5}{190000} = 0.003355;$$

$$\Delta\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{pd,0} - \varepsilon_{s,0sp} = 0.003355 - 0.0021 = 0.001255;$$

$$d_{p0} = h - c_{nom} - \frac{\phi}{2} = 0.6 - (0.025 + 0.01) - \frac{0.025}{2} = 0.5525 \text{ м.}$$

За залежністю (8) визначаємо висоту стиснутої зони:

$$x_1 = \frac{d_0 \varepsilon_{cu1,cd}}{(\varepsilon_{cu1,cd} + \Delta\varepsilon_{sp})} = \frac{0.5525 \times 0.00328}{0.00328 + 0.001255} = 0.400 \text{ м.}$$

3. Перевіряємо величину висоти стиснутої зони $x_1 \leq 0.6d_0$. Висота стиснутої зони більше $0.6d_0$ ($0.400 > 0.6 \cdot 0.5525$) необхідно збільшити клас бетону.

Приймаємо бетон класу C35/45: $f_{cd} = 25$ МПа; $\varepsilon_{cu1,cd} = 0.00272$.

За залежністю (8) визначаємо висоту стиснутої зони:

$$x_1 = \frac{d_0 \varepsilon_{cu1,cd}}{(\varepsilon_{cu1,cd} + \Delta\varepsilon_{sp})} = \frac{0.5525 \times 0.00272}{0.00272 + 0.001255} = 0.375 \text{ м.}$$

Висота стиснутої зони більша за $0.6d_0$. В представленому прикладі збільшення класу міцності бетону мало вплинуло на значення висоти стиснутої зони. В такому випадку призначимо розрахункову стиснуту арматуру $2\phi 12$ A500C ($A_s = 2.26$ см², $f_{yd} = 435$ МПа).

4. За залежністю (9) обчислюємо приблизне значення площі попередньо напруженої арматури:

$$A_s = \frac{-0.506 + 0.000226 \cdot 435 \cdot (0.375 - 0.035)}{2 \times 637.5 \cdot (0.375 - 0.5525)} = 0.0021 \text{ м}^2.$$

5. Приймаємо нижнє армування $4\phi 25$ A800 ($A_p = 19.64$ см²) і верхню стиснуту арматуру $2\phi 12$ A500C ($A_s = 2.26$ см²). Захисний шар для верхньої арматури - 29 мм.

6. Виконуємо прямий розрахунок за деформаційним методом. Результати розрахунку балки представлені в таблиці 3 та на рисунку 5.

Таблиця 3

Результати розрахунку попередньо напруженої балки/
Results of calculation of pre-stressed beam

Номер точки	$\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$	$\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$	x_1 , м	σ_{s1}	σ_{s2}
1	0.000360	-0.0000065	0.589	-394.7	64.48
2	0.000656	-0.000328	0.4	-446.59	113.7
3	0.000984	-0.0007216	0.346	-510.44	168.0
4	0.001312	-0.0010824	0.328	-568.64	222.7
5	0.00164	-0.0014432	0.319	-626.83	277.4
6	0.001968	-0.0019024	0.305	-639.15	331.0
7	0.002296	-0.0024272	0.291	-641.38	383.8
8	0.002624	-0.0029192	0.284	-643.46	435
9	0.002952	-0.00328	0.284	-644.95	435
10	0.00328	-0.0035424	0.288	-646.00	435

Примітки: $\varepsilon_{c(1)}^{(i)}$ та $\varepsilon_{c(2)}^{(i)}$ деформації на стиснутій та розтягнутій грані відповідно.

Несуча здатність балки $M = 553$ кН·м (рис. 5).

7. Виконуємо співставлення несучої здатності із зовнішнім моментом (M_{Ed}):

Визначена несуча здатність балки $M = 553$ кН·м перевищує зовнішній момент $M_{Ed} = 506$ кН·м на 9,3%, що більше 5%. Враховуючи те, що площа $4\phi 25$ перевищує площу $4\phi 22$ на 22,5%, а технологічно краще напружувати стрижні одного діаметру, можна вважати що вказане перевищення, тим більше в запас, цілком допустимо. Це означає, що необхідну точність розрахунку забезпечено.

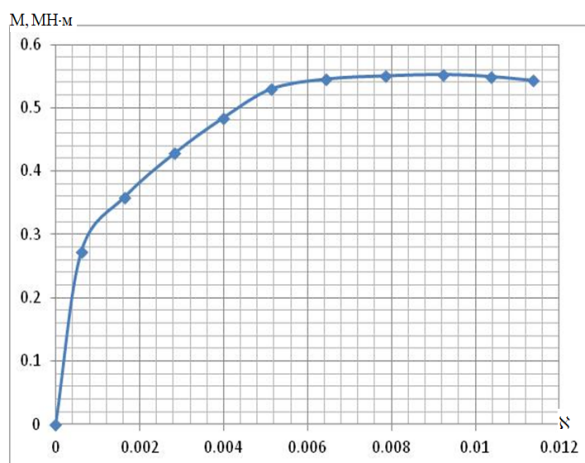


Рис. 5 - Діаграма стану перерізу залізобетонної балки/

The diagram will be the cross section of a reinforced concrete beam

Наукова новизна і практична значимість

Отримано аналітичні залежності і методику розрахунку для приблизного визначення площі звичайної та попередньо напруженої арматури в

розтягнутій зоні прямокутного перерізу при одношаровому армуванні.

Розроблено алгоритм для попереднього визначення площі розтягнутої арматури для прямокутного перерізу.

Висновки

1. Аналіз системи рівнянь для визначення несучої здатності елементів прямокутного перерізу при згині дозволив заключити, що початкову величину площі армування розтягнутої зони можливо визначити аналітичним шляхом.

2. Аналіз розрахунків, виконаних прямим розрахунком за деформаційним методом і за спрощеною методикою визначення площі арматури прямокутного перерізу з одним шаром армування, показав, що вони дають практично один і той же результат.

3. Рекомендовані прості залежності дозволяють визначити площу армування незалежно від того, яку діаграму деформування бетону ми використовуємо в розрахунках. А також визначити значення площі попередньо напруженої арматури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6.-98:2009– Офіц. вид. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.google.com/file/d/0B6RpAgaD6t-iUjMtVjlvbTR5MXM/edit> – Перевірено: 17.08.2017.
2. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010– Офіц. вид. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.google.com/file/d/0B6RpAgaD6t-iXzRXT2hNdVFZSmM/edit> – Перевірено: 17.08.2017.
3. Бамбура А.М. Деформаційна модель та алгоритм визначення напружено-деформованого стану розрахункового перерізу залізобетонних елементів. / А.М. Бамбура, О.Б. Гурківський, М.С. Безбожна, О.В. Дорогова. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. №50. – Днепропетровск., ПГАСА, 2009. – С. 19-25.
4. Попов А. Н. Хатунцев А. А. Пространственный деформационный нелинейный расчет железобетонных изгибаемых конструкций методом конечных элементов. / А.Н. Попов, А.А. Хатунцев. // Интернет-журнал «Науковедение» №5 2013. – Москва, 2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступа: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiklfC6iN7VAhVCQpoKHdPCDYYQFghvMAk&url=http%3A%2F%2Fnaukovedenie.ru%2FPDF%2F107tn513.pdf&usg=AFQjCNH79fPiRkNgYwPd_R_-5j50ulAvBA – Назва з екрану. – Перевірено: 17.08.2017.
5. Симбиркин В. Н., Матковский В. В. К расчету напряженно-деформированного состояния и прочности элементов железобетонных конструкций по нормальным сечениям. / В.Н. Матковский, В.В.Симбиркин. // Строительная механика и расчет сооружений – Москва: 2010. – №4. -С. 20-26.
6. Bambura A., Gurkivskiy O., Bezbozhna M. To assessment of bearing capacity and deformability of the reinforced concrete structures on the basis of material deformation real diagrams and deformation approach// Keep Concrete Attractive: Proceedings of the fip Symposyum – Budapest. – Hungary, 23-25 May 2005. – V.II – pp. 742-747.

REFERENCES

1. Konstruktsiï budinkiv i sporud. Stalevi konstruktsiï. Normie proektuvannya, vigotovlennya i montazh [Buildings and works structures. Steel structures. Designe norms, producing and installation]: . DBN V.2.6.-163: 2010 - Official issue. - Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011, 202 p. [Electron resource]. - Access: <https://docs.google.com/file/d/0B6RpAgaD6t-iUjMtVjlvbTR5MXM/edit> - Checked: 17.08.2017. (in Ukrainian).
2. Konstruktsiï budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiï. Osnovni polozennya [Buildings and works structures. Concrete and reinforced concrete. General provisions]: DBN V.2.6. 98: 2009- Official issue. - Kyiv: Minregionbud Ukraine, 2011, 202 p. [Electron resource]. - Access: <https://docs.google.com/file/d/0B6RpAgaD6t-iXzRXT2hNdVFZSmm/edit> - Checked: 17.08.2017. (in Ukrainian).
3. Bambura A., Gurkivskiy O., Bezbozhna M., & Dorohova O. Deformatsiina model ta alhorytm vyznachennia napryuzhenodeformovanoho stanu rozrakhunkovoho pererizu zalizobetonnykh elementiv [Deformation model and algorithm for the determination of the stress-strain state of the design cross-section of reinforced concrete elements]. Stroitelstvo, materialovedenie, mashynostroenie. [Construction, materials sciences and engineering industry]. 2003, no50, pp. 19-25. Dnepropetrovsk: PHASA (in Ukrainian).
4. Popov A.N., Hatunzev A.A. Prostranstvennyy deformatsyonny nelyneynyy raschet zhelezobetonnykh yzhybaemykh konstruktsyy metodom konechnykh elementov. [Spatial deformation nonlinear calculation of reinforced concrete bent designs by the method of final elements]. Ynternet-zhurnal "Naukovedenye" [Internet-journal "Science of science"]. Moscow, 2013, no.5 - Access: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiklfC6iN7VAhVCQpoKHdPCDYQFghvMAk&url=http%3A%2F%2Fnaukovedenie.ru%2FPDF%2F107tvn513.pdf&usg=AFQjCNH79fPiRkNgYwpd_R_-5j50ulAvBA . - Checked: 17.08.2017. (in Russian).
5. Simbirkin V.N., Matkovskij V.V. K raschetu napryazhenno-deformirovannoho sostoyaniya y prochnosty elementov zhelezobetonnykh konstruktsyy po normal'nym sechenyiam. [To calculate the stress-strain state and strength of elements of reinforced concrete structures in normal sections]. Stroytel'naya mekhanyka y raschet sooruzheny [Construction Mechanics and Building Design] - Moscow: 2010, no. 4, pp. 20-26. (in Russian).
6. Bambura A., Gurkivskiy O., & Bezbozhna M. (2005). To assessment of bearing capacity and deformability of the reinforced concrete structures on the basis of material deformation real diagrams and deformation approach // Proceedings from Keep Concrete Attractive: The fip Symposium 23-25 May 2005, pp. 742-747. Budapest. (in English).

Стаття надійшла до редколегії 21.08.2017 р.