



Национальний університет
та природокористування
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Рівненський державний технічний університет

Є.М. Бабич, Ю.О. Крусь, О.М. Кухнюк

**РОЗРАХУНОК ЗГИНАЛЬНИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ДІЇ
МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**
Рекомендації

Рекомендовано до друку Вченою
радою Рівненського державного
технічного університету
(протокол № 2 від 23.02.2001 р.)

Рівне
Видавництво Рівненського державного
технічного університету
2001

Бабич Є.М., Крусь Ю.О., Кухнюк О.М.

Б 12 Розрахунок згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових навантажень: Рекомендації. – Рівне: Вид-во РДТУ, 2001. – 31 с.

Наведені рекомендації до розрахунку міцності, тріщиностійкості та деформацій згинальних залізобетонних елементів, що піддаються дії малоциклових навантажень. Розрахунковий апарат базується на математичних моделях впливу малоциклових навантажень на зміну механічних характеристик бетону та арматури і сучасній методиці розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами першої та другої груп.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів будівельних спеціальностей, інженерно-технічних працівників проектних організацій.

Табл. 1. Іл. 6. Бібліогр.: 25 найм.

ББК 38.53



1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Дані рекомендації можуть бути використані для розрахунку згинальних залізобетонних елементів із важкого бетону прямокутного профілю без попереднього напружування арматури, що піддаються малоцикловим знакосталім статичним навантаженням.

1.2. Згинальні елементи таврового, двотаврового та інших профілів можна розраховувати за методикою СНіП 2.03.01-84* із використанням коефіцієнтів умов роботи бетону, арматури й конструкцій вцілому, які наведені в цих рекомендаціях.

1.3. Розрахунок згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових навантажень обумовлюється наступними причинами:

- при дії повторних навантажень, залежно від їхнього рівня, характеристики та кількості циклів стискаючих навантажень бетон може знаходитись в трьох стадіях: 1 – ущільнення структури, коли ширина петлі пластичного гістерезису зі збільшенням кількості циклів зменшується (стадія зміцнення); 2 – стабілізація, яка характеризується відносно сталою шириною петлі гістерезису (стадія стабілізації); 3 – розущільнення, коли ширина петлі гістерезису збільшується та відбувається прогресуюче збільшення деформацій з наступним руйнуванням бетону (стадія розміцнення);

- повторні навантаження при обмеженні максимальних напружень у матеріалі покращують механічні характеристики бетону та арматури;

- повторні навантаження негативно впливають на ширину розкриття тріщин і на прогини згинальних елементів.

1.4. Приймається, що стабілізація деформацій, ширини розкриття тріщин, впливу на механічні характеристики матеріалів відбуваються після 10...15 циклів повторних навантажень.

2. МАЛОЦИКЛОВІ НАВАНТАЖЕННЯ ТА ЇХНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. Зовнішні навантаження поділяються на постійні та змінні. До змінних відносяться: монотонно-змінні (зростаючі та спадаючі); циклічні (статичні та динамічні). За знаком зусиль, що виникають в елементах, циклічні навантаження поділяються на знакосталі та знаковмінні.

2.2. До малоциклових відносяться циклічні (повторні) навантаження, кількість повторень яких не перевищує 2×10^6 циклів, у реальних умовах – декілька сот або тисяч циклів.

2.3. Циклічні статичні навантаження (спадаючі або зростаючі) викликають зміну напружень у бетоні зі швидкістю $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/сек.

2.4. До малоциклових статичних навантажень відносяться: снігові, вітрові, температурні впливи; корисні навантаження в цивільних будівлях; наван-

таження на трибуни стадіонів і спортивних споруд; навантаження від суден; навантаження під час ремонтів і реконструкцій будівель і споруд; вага обладнання в період пуско-налагоджувальних робіт; навантаження від різкого порушення технологічних процесів; сейсмічні та вибухові впливи.

2.5. Основні параметри та поняття малоциклових навантажень і характеристики пружно-пластичних матеріалів, що їх сприймають:

- малоциклова втомленість (або циклічна довговічність) – настання граничного стану (втомленісного пошкодження або руйнування) у матеріалі за циклічної зміни пластичної деформації;

- малоциклова пристосованість – стабілізація (призупинення росту) пластичної деформації у матеріалі при дії малоциклового навантаження;

- малоциклова міцність – найбільші напруження, за яких не відбувається руйнування матеріалу при заданій кількості циклів малоциклового навантаження;

- закон навантаження – функція, яка характеризує зміну навантаження в часі;

- цикл напружень (деформацій) – сукупність послідовних значень напружень (деформацій) упродовж одного періоду їхньої зміни;

- частота циклів – відношення кількості циклів напружень (деформацій) до інтервалу часу їхньої дії;

- період циклу – тривалість одного циклу напружень (деформацій);

- максимальне напруження (деформація) циклу – найбільше за алгебричним значенням напруження (деформація) циклу;

- мінімальне напруження (деформація) циклу – найменше за алгебричним значенням напруження (деформація) циклу;

- амплітуда напружень (деформацій) – найбільше числове позитивне значення змінної складової циклу напружень (деформацій);

- знакозмінний цикл напружень (деформацій) – цикл напружень (деформацій), що змінюється за значенням і знаком;

- знакосталий цикл напружень (деформацій) – цикл напружень (деформацій), що змінюється лише за абсолютним значенням;

- віднульовий цикл напружень (деформацій) – знакосталий цикл напружень (деформацій), що змінюється від нуля до максимального або мінімального значення;

- коефіцієнт асиметрії циклу напружень (деформацій) – відношення мінімального значення напружень (деформацій) до максимального;

- матеріали, в яких із заданою амплітудою деформацій відповідні напруження збільшуються (зменшуються), називають матеріалами, що циклічно зміцнюються (розміцнюються).

2.6. Навантаження, що змінюються в часі ступенево, у загальному вигляді можуть бути описані такою функцією:



$$P(t) = \sum_{k=0}^n P_k [u(t - \tau_k) - u(t - \tau_{k+1})], \quad (1)$$

- де $P(t)$ – навантаження в момент часу t ;
 P_k – навантаження k -го імпульсу;
 k – номер імпульсу (циклу);
 n – кількість імпульсів (циклів);
 $u(t)$ – одинична функція Хевісайда;
 τ_k – момент прикладання k -го імпульсу.

3. МАЛОЦИКЛОВА ВТОМЛЕНІСТЬ БЕТОНУ

3.1. Рівень малоциклової втомленості бетону можна визначити за формулою, яка має вигляд

$$\eta_{b, \text{cyc}} = 1 - p \frac{n_{\text{cyc}}^q - 1}{n_{\text{cyc}}^q}, \quad (2)$$

- де $\eta_{b, \text{cyc}} = \sigma_{b, \text{cyc}}^{cr} / R_b$ – відносний рівень малоциклової втомленості бетону;
 R_b – призмova міцність бетону;
 $\sigma_{b, \text{cyc}}^{cr}$ – абсолютна межа (границя) малоциклової втомленості бетону (співпадає з межею малоциклової пристосованості);
 n_{cyc} – кількість циклів до руйнування бетону (малоциклова довговічність);
 p і q – сталі коефіцієнти, які визначаються з умов мінімуму квадратичних відхилень дослідних і теоретичних даних міцності при дії малоциклових навантажень.

3.2. За відсутності дослідних значень коефіцієнти p і q можна приймати для важкого бетону такими: $p=0,15$; $q=0,33$.

3.3. Відносну межу малоциклової втомленості важкого бетону при стиску можна приймати рівною $\eta_{b, \text{cyc}}^{cr} = 0,85$; при розтягу – $\eta_{bt, \text{cyc}}^{cr} = 0,7$.

4. КОЕФІЦІЄНТИ УМОВ РОБОТИ

4.1. Коефіцієнти умов роботи бетону враховують вплив малоциклових навантажень на зміну його механічних характеристик за умови, коли режими навантажень не можуть призводити бетон до малоциклової втомленості.

4.2. Коефіцієнт умов роботи важкого бетону за міцністю на стиск $\gamma_{b, \text{cyc}}$ при дії малоциклових навантажень за довірчої ймовірності 95% можна визначити за формулою



$$\gamma_{b,cyc} = R_{b,cyc} / R_b = 1,0767 + 0,03 X_1 - 0,04 X_2 + 0,04 X_3 + 0,0027 X_1^2 + 0,0077 X_2^2 - 0,0022 X_3^2 - 0,0125 X_1 X_2 + 0,0125 X_1 X_3 - 0,0075 X_2 X_3, \quad (3)$$

де R_b – міцність бетону при одноразовому осьовому стиску;
 $R_{b,cyc}$ – те ж саме, при дії малоциклових навантажень;

$$X_1 = \frac{\eta_i - 0,65}{0,15}; \quad X_2 = \frac{\rho - 0,3}{0,3}; \quad X_3 = \frac{n - 6}{5}; \quad (4)$$

$\eta_i = \sigma_{b,max} / R_b$ – верхній відносний рівень малоциклових навантажень;

$\rho = \sigma_{b,min} / \sigma_{b,max}$ – характеристика циклу повторних навантажень;

n – кількість циклів навантажень;

$\sigma_{b,min}$ і $\sigma_{b,max}$ – відповідно максимальні та мінімальні напруження стиску в циклах навантажень.

4.3. Коефіцієнт умов роботи бетону за міцністю на розтяг при дії малоциклових навантажень необхідно приймати рівним $\gamma_{bt,cyc} = 0,7$.

4.4. Зміну початкового модуля пружності бетону при стиску при дії малоциклових навантажень можна врахувати такою залежністю:

$$E_{b,cyc} = \gamma_{E_b,cyc} E_b = (0,8515 - 0,0128 X_1 + 0,0195 X_2 - 0,0268 X_3 + 0,0065 X_1^2 + 0,0160 X_2^2 + 0,0269 X_3^2 + 0,0008 X_1 X_2 + 0,0014 X_1 X_3 + 0,0017 X_2 X_3) E_b, \quad (5)$$

де $E_{b,cyc}$ – початковий модуль пружності бетону при дії малоциклових навантажень;

E_b – початковий модуль пружності бетону при першому одноразовому тискаючому навантаженні;

$\gamma_{E_b,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи бетону за модулем пружності при стиску при дії малоциклових навантажень;

$X_1; X_2; X_3$ – те ж саме, що у формулі (4).

4.5. Зміна граничних поздовжніх деформацій стиску бетону при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

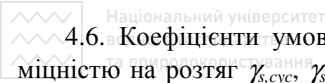
$$\varepsilon_{bu,l,cyc} = \gamma_{\varepsilon_{bu,l,cyc}} \varepsilon_{bu,l} = (0,7148 - 0,0566 X_1 + 0,1012 X_2 - 0,0543 X_3 - 0,0028 X_1^2 + 0,0251 X_2^2 + 0,0248 X_3^2 - 0,0052 X_1 X_2 + 0,0165 X_1 X_3) \varepsilon_{bu,l}, \quad (6)$$

де $\varepsilon_{bu,l,cyc}$ – граничні поздовжні деформації стиску бетону при дії малоциклових навантажень;

$\varepsilon_{bu,l}$ – граничні поздовжні деформації стиску бетону при першому одноразовому навантаженні;

$\gamma_{\varepsilon_{bu,l,cyc}}$ – коефіцієнт умов роботи бетону за граничними поздовжніми деформаціями стиску при дії малоциклових навантажень;

$X_1; X_2; X_3$ – те ж саме, що у формулі (4).



4.6. Коефіцієнти умов роботи поздовжньої та поперечної арматури за міцністю на розтяг $\gamma_{s,cyc}$, $\gamma_{sw,cyc}$ і $\gamma_{s,inc;cyc}$ установлюються згідно з експериментальними дослідженнями, а за їхньою відсутністю допускається приймати $\gamma_{s,cyc} = \gamma_{sw,cyc} = \gamma_{s,inc;cyc} = 1,0$.

4.7. Зміну модуля пружності при розтягу поздовжньої та поперечної арматури слід ураховувати відповідними коефіцієнтами $\gamma_{E_s,cyc}$ і $\gamma_{E_{sw},cyc}$ отриманими експериментально. За відсутності експериментальних досліджень допускається приймати $\gamma_{E_s,cyc} = \gamma_{E_{sw},cyc} = 1$.

4.8. Зміна граничних деформацій розтягу поздовжньої арматури при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

$$\epsilon_{su,cyc} = \gamma_{\epsilon_{su},cyc} \epsilon_{su} = (2,4976 - 0,3250 X_1 + 0,1280 X_2 + 0,7590 X_3 - 0,4596 X_1^2 - 0,5878 X_2^2 + 0,1120 X_3^2 - 0,0096 X_1 X_2 - 0,1832 X_1 X_3 - 0,0925 X_2 X_3) \epsilon_s, \quad (7)$$

де $\epsilon_{su,cyc}$ – граничні деформації розтягу поздовжньої арматури при дії малоциклових навантажень;

ϵ_{su} – граничні деформації розтягу поздовжньої арматури при першому одноразовому навантаженні;

$\gamma_{\epsilon_{su},cyc}$ – коефіцієнт умов роботи поздовжньої арматури за граничними деформаціями розтягу при дії малоциклових навантажень;

$$X_1 = \frac{\eta_t - 0,65}{0,15}; \quad X_2 = \frac{d - 12}{2}; \quad X_3 = \frac{n - 6}{5}, \quad (8)$$

тут d – діаметр поздовжньої робочої арматури.

4.9. Вплив малоциклових навантажень на зміну прогинів згинальних залізобетонних елементів визначається за формулою

$$f_{cyc} = \gamma_{f,cyc} f = (1,2433 + 0,1419 X_1 - 0,0054 X_2 + 0,1338 X_3 + 0,1076 X_1^2 + 0,1451 X_2^2 - 0,1238 X_3^2 - 0,0458 X_1 X_2 + 0,0525 X_1 X_3 + 0,0150 X_2 X_3) f, \quad (9)$$

де f_{cyc} – прогини при дії малоциклових навантажень;

f – прогини при першому одноразовому навантаженні;

$\gamma_{f,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи згинальних залізобетонних елементів за прогинами при дії малоциклових навантажень;

$X_1; X_2; X_3$ – те ж саме, що у формулі (8).

4.10. Вплив малоциклових навантажень на зміну ширини розкриття тріщин, нормальних і похилих до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів, визначається відповідно за формулами:

для нормальних тріщин

$$a_{crc,cyc}^{norm} = \gamma_{a_{crc}^{norm},cyc} a_{crc}^{norm} = (2,0533 - 0,3504 X_1 - 0,4758 X_2 + 0,2215 X_3 + 0,2466 X_1^2 - 0,2167 X_2^2 - 0,2433 X_3^2 + 0,0177 X_1 X_2 + 0,0177 X_1 X_3 - 0,2188 X_2 X_3) a_{crc}^{norm}; \quad (10)$$



$$a_{crc,cyc}^{inc} = \gamma_{a_{crc,cyc}^{inc}} a_{crc}^{inc} = (1,9433 - 0,5008 X_1 - 0,0487 X_2 + 0,1878 X_3 + 0,5089 X_1^2 + 0,3945 X_2^2 + 0,0565 X_3^2 - 0,1827 X_1 X_2 + 0,4044 X_1 X_3 + 0,5900 X_2 X_3) a_{crc}^{inc}, \quad (11)$$

де $a_{crc,cyc}^{norm}$ і $a_{crc,cyc}^{inc}$ – ширина розкриття відповідно нормальних і похилих тріщин при дії малоциклових навантажень;

a_{crc}^{norm} і a_{crc}^{inc} – ширина розкриття відповідно нормальних і похилих тріщин при першому одноразовому навантаженні;

$\gamma_{a_{crc,cyc}^{norm}}$ і $\gamma_{a_{crc,cyc}^{inc}}$ – коефіцієнти умов роботи залізобетонних елементів відповідно за нормальними й похилими тріщинами при дії малоциклових навантажень;

$X_1; X_2; X_3$ – те ж саме, що у формулі (8).

5. РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ПЕРЕРІЗІВ, НОРМАЛЬНИХ ДО ПОЗДОВЖНЬОЇ ОСІ ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

5.1. Розрахунок міцності перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинального залізобетонного елемента, при дії малоциклових навантажень можна виконувати, виходячи з двох фізичних моделей напружено-деформованого стану, що відрізняються, в основному, формою епюри напружень у бетоні стиснутої зони: у першій моделі епюра напружень приймається прямокутною; у другій – криволінійною.

5.2. У першій моделі напружено-деформованого стану приймаються такі передумови:

- напруження в бетоні стиснутої зони рівномірно розподілені, а їхні значення досягають значень $R_{b,cyc}$ – розрахункового опору бетону при осьовому стиску з урахуванням малоциклових навантажень ($R_{b,cyc} = \gamma_{b,cyc} R_b$);

- у розтягнутій арматурі напруження досягають розрахункового опору арматури розтягу ($R_{s,cyc} = \gamma_{s,cyc} R_s$);

- висота стиснутої зони бетону не перевищує граничного значення;

- нормальні до поздовжньої осі елемента перерізи під дією зовнішніх сил і внутрішніх зусиль знаходяться в рівновазі (рис. 1).

5.3. Розрахунок міцності перерізів з урахуванням передумов, наведених у 5.2, виконується з умови

$$M \leq \gamma_{b,cyc} R_b b x_{cyc} (h_0 - 0,5 x_{cyc}), \quad (12)$$

при цьому висота стиснутої зони x_{cyc} визначається з рівняння

$$\gamma_{s,cyc} R_s A_s = \gamma_{b,cyc} R_b b x_{cyc}. \quad (13)$$

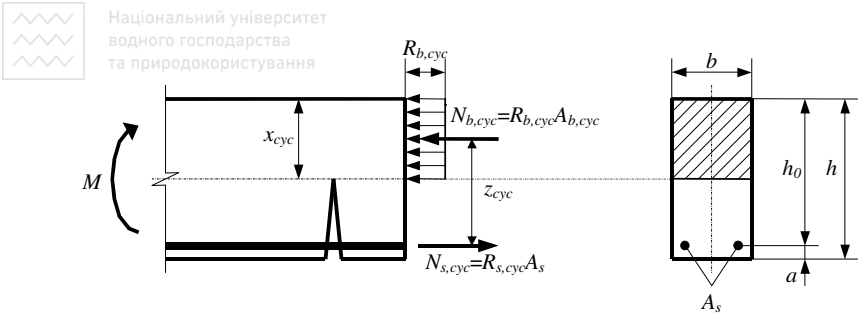


Рисунок 1 – Схема зусиль у нормальному перерізі елемента при розрахунку його за міцністю при дії малоциклових навантажень по першій фізичній моделі напружено-деформованого стану

5.4. У другій фізичній моделі напружено деформованого стану прийнято, що в поперечному перерізі елюра напружень має криволінійний характер, деформації по висоті перерізу розподіляються лінійно, бетон деформується за висхідною кривою, а деформування арматури відповідає діаграмі Прандтля (рис. 2).

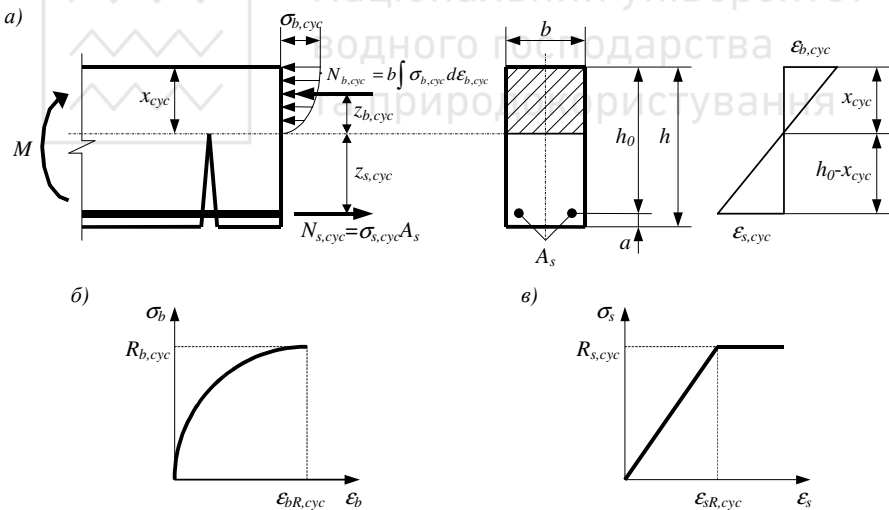


Рисунок 2 – Схема деформацій, напружень і зусиль у нормальному перерізі елемента (а) при розрахунку його за міцністю при дії малоциклових навантажень по другій фізичній моделі напружено-деформованого стану і прийняті діаграми поздовжнього деформування бетону (б) та арматури (в)

5.5. Залежність між напруженнями $\sigma_{b,cyc}$ і деформаціями $\epsilon_{b,cyc}$ у бетоні при дії малоциклових навантажень може бути представлена у вигляді (див. рис. 2,б):



$$\sigma_{b,cyc} = \gamma_{b,cyc} R_b \left(\frac{\varepsilon_{b,cyc}}{\varepsilon_{bR,cyc}} \right)^{V_{bR,cyc}}, \quad (14)$$

де $\gamma_{b,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи бетону за міцністю на стиск при дії малоциклових навантажень;
 $\varepsilon_{bR,cyc}$ і $V_{bR,cyc}$ – відповідно гранична поздовжня деформація і граничне значення коефіцієнта пружності бетону при стиску при дії малоциклових навантажень;

5.6. Значення $\gamma_{b,cyc}$ і $\varepsilon_{bR,cyc}$, які входять у формулу (14), можна приймати згідно з (4) і (5) відповідно, прийнявши $\varepsilon_{bR,cyc} = \varepsilon_{bu,l,cyc}$, або за формулою

$$\varepsilon_{bR,cyc} = \frac{\gamma_{b,cyc} R_b}{E_{bR,cyc}}, \quad (15)$$

де $E_{bR,cyc} = 0,9 E_{b,cyc}$ ($E_{b,cyc}$ – те ж саме, що у формулі (5)).

5.7. Розрахунок міцності перерізів з урахуванням передумов, наведених в 5.4, виконується з умови

$$M \leq \frac{\omega_{cyc}}{\omega_{cyc} + I} \gamma_{b,cyc} R_b b x_{cyc}^2 \left(\frac{\varepsilon_{b,cyc}}{\varepsilon_{bR,cyc}} \right)^{V_{bR,cyc}} + A_s \gamma_{E_s,cyc} E_s \frac{\varepsilon_{b,cyc}}{x_{cyc}} (h_0 - x_{cyc})^2, \quad (16)$$

при цьому висота стиснутої зони бетону визначається з рівняння

$$\omega_{cyc} \gamma_{b,cyc} R_b b x_{cyc} \left(\frac{\varepsilon_{b,cyc}}{\varepsilon_{bR,cyc}} \right)^{V_{bR,cyc}} = A_s \gamma_{E_s,cyc} E_s \frac{\varepsilon_{b,cyc}}{x_{cyc}} (h_0 - x_{cyc}), \quad (17)$$

де ω_{cyc} – повнота епюри напружень у бетоні стиснутої зони при дії малоциклових навантажень, яка обчислюється за формулою

$$\omega_{cyc} = \frac{I}{V_{bR,cyc} + I}. \quad (18)$$

6. РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ПЕРЕРІЗІВ, ПОХИЛИХ ДО ПОЗДОВЖНЬОЇ ОСІ ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

6.1. Розрахунок міцності перерізів, похилих до поздовжньої осі згинального залізобетонного елемента, при дії малоциклових навантажень необхідно виконувати на дію поперечної сили по похилій смузі між похилими тріщинами та на дію поперечної сили по похилій тріщині.

6.2. Розрахунок елементів на дію поперечної сили з метою забезпечення міцності по похилій смузі між похилими тріщинами при дії малоциклових навантажень необхідно виконувати за умови

$$Q \leq 0,3 \varphi_{w1,cyc} \varphi_{b1,cyc} \gamma_{b,cyc} R_b b h_0, \quad (19)$$



Национальний університет

де Q – максимальна поперечна сила від дії зовнішнього навантаження;

$\varphi_{b1,cyc}$ – коефіцієнт, який для важкого бетону визначається за формулою

$$\varphi_{b1,cyc} = 1 - 0,01\gamma_{b,cyc}R_b; \quad (20)$$

$\varphi_{w1,cyc}$ – коефіцієнт, який враховує вплив хомутів, перпендикулярних до поздовжньої осі елемента, та обчислюється за виразом

$$\varphi_{w1,cyc} = 1 + 5\alpha_{sw,cyc}\mu_{sw} \leq 1,3, \quad (21)$$

тут $\alpha_{sw,cyc}$ – коефіцієнт приведення для арматури хомутів при дії малоциклових навантажень, який визначається за формулою

$$\alpha_{sw,cyc} = \frac{\gamma_{E_w,cyc}E_{sw}}{\gamma_{E_b,cyc}E_b}; \quad (22)$$

μ_{sw} – коефіцієнт поперечного армування хомутами (для елементів без поперечного армування хомутами $\mu_{sw}=0$), який обчислюється за виразом

$$\mu_{sw} = \frac{A_{sw}}{bs_w}. \quad (23)$$

У формулах (22) і (23):

E_b і E_{sw} – початкові (при першому навантаженні) модулі пружності відповідно бетону та арматури хомутів;

$\gamma_{E_b,cyc}$ і $\gamma_{E_w,cyc}$ – див. 4.4 і 4.7;

s_w – крок хомутів уздовж елемента.

6.3. Розрахунок згинальних елементів на дію поперечної сили по похилій тріщині (рис. 3) при дії малоциклових навантажень необхідно виконувати за умови

$$Q \leq Q_{b,cyc} + Q_{sw,cyc} + Q_{s,inc;cyc}, \quad (24)$$

де $Q_{sw,cyc}$ і $Q_{s,inc;cyc}$ – поперечні зусилля, які сприймають відповідно хомути та похилі стержні, що їх перетнула похила тріщина, при дії малоциклових навантажень;

$Q_{b,cyc}$ – поперечне зусилля, яке сприймає бетон стиснутої зони при дії малоциклових навантажень.

6.4. Поперечне зусилля, яке сприймає бетон при дії малоциклових навантажень, визначається за формулою

$$Q_{b,cyc} = \frac{2\gamma_{bt,cyc}R_{bt}bh_0^2}{c}, \quad (25)$$

де $\gamma_{bt,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи бетону за міцністю на розтяг при дії малоциклових навантажень;

R_{bt} – розрахунковий опір бетону осьовому розтягу при одноразовому навантаженні;

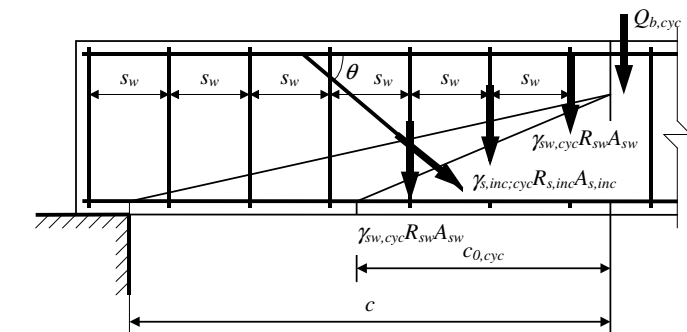


Рисунок 3 – Схема зусиль у похилому перерізі елемента при розрахунку його за міцністю на дію поперечної сили при дії малоциклових навантажень

6.5. Для елементів із поперечною арматурою у вигляді хомутів, нормальних до поздовжньої осі елемента і встановлених із постійним кроком у межах розглядуваного похилого перерізу, довжина проекції найбільш небезпечної тріщини на поздовжню вісь елемента $c_{0,cyc}$ при дії малоциклових навантажень визначається з мінімуму виразу $(Q_{b,cyc} + Q_{sw,cyc})$ і дорівнює

$$c_{0,cyc} = \sqrt{\frac{2\gamma_{bt,cyc} R_{bt} b h_0^2}{q_{sw,cyc}}}, \quad (26)$$

де $q_{sw,cyc}$ – поперечна сила, яку сприймають поперечні стержні (хомути) при дії малоциклових навантажень, віднесена до одиниці довжини елемента, визначається за формулою

$$q_{sw,cyc} = \frac{\gamma_{sw,cyc} R_{sw} A_{sw}}{s_w}; \quad (27)$$

$\gamma_{sw,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи поперечної арматури (хомутів) за міцністю на розтяг при дії малоциклових навантажень (див. 4.6);

R_{sw} – розрахунковий опір поперечної арматури (хомутів) на розтяг;

A_{sw} – площа перерізу поперечних стержнів (хомутів) в одній нормальній до поздовжньої осі елемента площині.

6.6. Значення поперечної сили, яку сприймають хомути в межах найбільш небезпечної похилої тріщини при дії малоциклових навантажень, визначається за формулою

$$Q_{sw,cyc} = \sum \gamma_{sw,cyc} R_{sw} A_{sw} = c_{0,cyc} q_{sw,cyc}. \quad (28)$$



6.7. Значення поперечної сили, яку сприймають похилі (відігнуті) стержні в межах небезпечної похилої тріщини при дії малоциклових навантажень, визначається за формулою

$$Q_{s,inc;cyc} = \sum \gamma_{s,inc;cyc} R_{s,inc} A_{s,inc} \sin \theta, \quad (29)$$

де θ – кут нахилу відігнутих стержнів у розрахунковому перерізі до поздовжньої осі елемента (див. рис. 3)

$A_{s,inc}$ – площа перерізу похилих (відігнутих) стержнів, розташованих в одній похилій до поздовжньої осі елемента площині, що перетинає розрахунковий похилий переріз елемента.

7. РОЗРАХУНОК ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН

Залізобетонні елементи розраховуються на утворення тріщин:

- нормальних до поздовжньої осі елемента;
- похилих до поздовжньої осі елемента.

Розрахунок на утворення тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента

7.1. Розрахунок на утворення тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень можна виконувати, виходячи з двох фізичних моделей напружено-деформованого стану нормального перерізу, що відрізняються формами епюр напружень у бетоні стиснутої та розтягнутої зон: перша модель – форми епюр напружень прямолінійні (у стиснутій зоні – трикутна, у розтягнутій – прямокутна); друга модель – форми епюр напружень криволінійні.

7.2. За першої фізичної моделі для згинальних елементів зусилля, що сприймаються нормальними до поздовжньої осі перерізами перед утворенням тріщин при дії малоциклових навантажень, визначаються, виходячи з таких основних передумов (рис. 4):

– перерізи після деформування залишаються плоскими, тобто деформації по висоті елемента змінюються за лінійним законом;

– найбільше відносне подовження крайнього розтягнутого волокна бетону при дії малоциклових навантажень дорівнює $2\gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser} / (\gamma_{E_b,cyc} E_b)$ ($R_{bt,ser}$ – розрахунковий опір бетону при одноразовому розтягу для граничних станів другої групи; $\gamma_{bt,cyc}$ – те ж саме, що у формулі (25); E_b – початковий модуль пружності бетону при одноразовому стиску, який відповідає пружним деформаціям бетону, що виникають при першому одноразовому навантаженні; $\gamma_{E_b,cyc}$ – те ж саме, що у формулі (5));

– напруження в бетоні стиснутої зони визначаються з урахуванням пруж-

них деформацій бетону за трикутної епюри напружень;

– напруження в бетоні розтягнутої зони розподілені рівномірно та дорівнюють $\gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser}$, тобто епюра напружень у розтягнутій зоні бетону приймається прямокутною при $\sigma_{bt,cyc} = \gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser}$;

– напруження в арматурі дорівнюють алгебричній сумі напружень, що відповідають приросту напружень оточуючого бетону, і напружень, спричинених усадкою та повзучістю бетону.

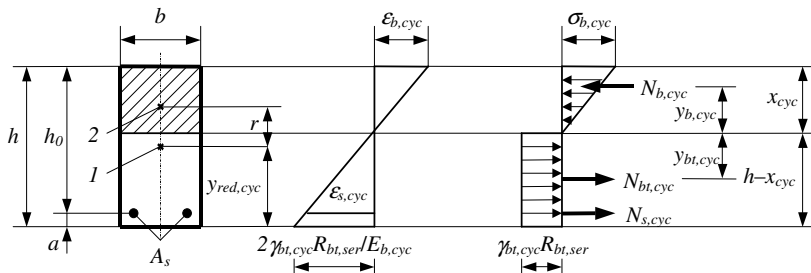


Рисунок 4 – Схеми зусиль, напружень і деформацій у поперечному перерізі елемента при розрахунку його на утворення тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень:

1 – центр ваги приведенного перерізу; 2 – ядро точки

7.3. За другою фізичною моделлю до розрахунку водяться криволінійні епюри стискаючих і розтягаючих напружень у бетоні. При цьому залежність між стискаючими напруженнями $\sigma_{b,cyc}$ і відповідними деформаціями $\epsilon_{b,cyc}$ у бетоні при дії малоциклових навантажень визначається за формулою (14). Для розтягаючих напружень $\sigma_{bt,cyc}$ і відповідних деформацій $\epsilon_{bt,cyc}$ може бути застосована залежність в аналогічному формалізованому вигляді

$$\sigma_{bt,cyc} = \gamma_{bt,cyc} R_{bt} \left(\epsilon_{bt,cyc} / \epsilon_{btR,cyc} \right)^{V_{btR,cyc}}, \quad (30)$$

де ϵ_{btR} і $V_{btR,cyc}$ – відповідно гранична поздовжня деформація і граничне значення коефіцієнта пружності бетону при розтягу при дії малоциклових навантажень.

Однак, до отримання достатніх експериментальних даних про роботу бетону при розтягу в умовах малоциклових навантажень у цих рекомендаціях розглядається перша фізична модель і відповідні їй передумови (див. 7.2).

7.4. Розрахунок згинальних елементів на утворення тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень виконується за умови

$$M \leq M_{erc,cyc}, \quad (31)$$

де M – момент зовнішніх сил, розташованих по один бік від розглядуваного перерізу;



$M_{crc,cyc}$ – момент, що сприймається перерізом елемента, нормальним до поздовжньої осі елемента, при утворенні тріщин при дії малоциклових навантажень і визначається за формулою

$$M_{crc,cyc} = \gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser} W_{pl,cyc}, \quad (32)$$

тут $W_{pl,cyc}$ – момент опору приведенного перерізу елемента для крайнього розтягнутого волокна з урахуванням непружних деформацій розтягнутого бетону при дії малоциклових навантажень, обчислюється за виразом

$$W_{pl,cyc} = \frac{2(I_{b0,cyc} + \alpha_{s,cyc} I_{s0,cyc})}{h - x_{cyc}} + S_{bt,cyc}, \quad (33)$$

$I_{b0,cyc}, I_{s0,cyc}$ – моменти інерції перерізів відповідно стиснутої зони бетону та поздовжньої розтягнутої арматури відносно нульової лінії (нейтральної осі) при дії малоциклових навантажень;

$S_{bt,cyc}$ – статичний момент перерізу розтягнутої зони бетону відносно тієї самої осі при дії малоциклових навантажень;



$\alpha_{s,cyc}$ – коефіцієнт приведення для поздовжньої розтягнутої арматури при дії малоциклових навантажень, який визначається за формулою

$$\alpha_{s,cyc} = \frac{\gamma_{E_s,cyc} E_s}{\gamma_{E_b,cyc} E_b}, \quad (34)$$

де E_b і E_s – початкові (при першому навантаженні) модулі пружності відповідно стиснутого бетону та поздовжньої розтягнутої арматури;

$\gamma_{E_b,cyc}$ і $\gamma_{E_s,cyc}$ – див. 4.4 і 4.7.


Положення нульової лінії при дії малоциклових навантажень визначається з умови рівності нулю суми проєкцій на вісь елемента усіх поздовжніх зусиль, яка остаточно має такий вигляд

$$S_{b0,cyc} + \alpha_{s,cyc} S_{s0,cyc} = \frac{(h - x_{cyc}) A_{bt,cyc}}{2}, \quad (35)$$

де $S_{b0,cyc}, S_{s0,cyc}$ – статичні моменти перерізів відповідно стиснутої зони бетону та поздовжньої розтягнутої арматури відносно нульової лінії при дії малоциклових навантажень;

$A_{bt,cyc}$ – площа перерізу розтягнутої зони бетону при дії малоциклових навантажень.

Застосовані у формулах (33) і (35) геометричні характеристики прямокутних перерізів згинальних елементів при дії малоциклових навантажень обчислюються за формулами:



Национальний університет
виробничого господарства
та природокористування

$$\left. \begin{aligned} I_{b0,cyc} &= \frac{bx_{cyc}^3}{3}; & I_{s0,cyc} &= A_s(h - x_{cyc} - a)^2; & S_{bl,cyc} &= \frac{b(h - x_{cyc})^2}{2}; \\ S_{b0,cyc} &= \frac{bx_{cyc}^2}{2}; & S_{s0,cyc} &= A_s(x_{cyc} - a); & A_{bl,cyc} &= b(h - x_{cyc}). \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Значення $W_{pl,cyc}$ допускається визначати за наближеною формулою

$$W_{pl,cyc} = \gamma W_{red,cyc}, \quad (37)$$

де γ – коефіцієнт, який враховує вплив непружних деформацій бетону розтягнутої зони; залежить від форми поперечного перерізу елемента (визначається за таблицями, наведеними у посібниках до [24]; для елементів прямокутного перерізу приймається $\gamma=1,75$);

$W_{red,cyc}$ – момент опору приведенного перерізу елемента для крайнього розтягнутого волокна при дії малоциклових навантажень, що обчислюється як для пружного матеріалу за виразом

$$W_{red,cyc} = I_{red,cyc} / y_{red,cyc}, \quad (38)$$

тут $I_{red,cyc}$ – момент інерції приведенного перерізу елемента відносно центра ваги при дії малоциклових навантажень;
 $y_{red,cyc}$ – відстань від центра ваги приведенного перерізу елемента до крайнього розтягнутого волокна при дії малоциклових навантажень.

Геометричні характеристики прямокутних перерізів згинальних елементів визначаються за формулами:

$$I_{red,cyc} = \frac{bh^3}{12} + bh(0,5h - y_{red,cyc})^2 + \alpha_{s,cyc} A_s (y_{red,cyc} - a)^2; \quad (39)$$

$$y_{red,cyc} = \frac{S_{red,cyc}}{A_{red,cyc}}, \quad (40)$$

де $A_{red,cyc}$ і $S_{red,cyc}$ – відповідно площа приведенного перерізу елемента та статичний момент приведенного перерізу елемента відносно крайнього розтягнутого волокна при дії малоциклових навантажень, які визначаються за такими виразами:

$$A_{red,cyc} = bh + \alpha_{s,cyc} A_s; \quad (41)$$

$$S_{red,cyc} = \frac{bh^2}{2} + \alpha_{s,cyc} A_s a. \quad (42)$$



Розрахунок на утворення тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента

7.5. Розрахунок на утворення тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень виконується в зоні дії головних розтягаючих напружень з умови

$$\sigma_{mt} \leq \gamma_{b4,cyc} \gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser}, \quad (43)$$

де $\gamma_{bt,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи бетону за міцністю на розтяг при дії малоциклових навантажень (див. 4.3);

$\gamma_{b4,cyc}$ – коефіцієнт умов роботи бетону за міцністю в умовах плоского напруженого стану при дії малоциклових навантажень; визначається за формулою

$$\gamma_{b4,cyc} = \frac{1 - \sigma_{mc} / (\gamma_{b,cyc} R_{b,ser})}{0,2 + \alpha_b B} \leq 1. \quad (44)$$

У формулі (44):

α_b – коефіцієнт, який приймається для важкого бетону 0,01;

B – клас бетону за міцністю на стиск; при цьому значення $\alpha_b B$ повинно бути не менше 0,3.

Перевірку умови (43) рекомендується виконувати для декількох перерізів залежно від зміни епюр поперечних сил і згинальних моментів у найбільш імовірному місці утворення похилих тріщин – на рівні центра ваги приведеного перерізу елемента.

Значення головних розтягаючих і головних стискаючих напружень у бетоні σ_{mt} і σ_{mc} (рис. 5) визначаються як для пружного тіла за формулою

$$\sigma_{m(mc)} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (45)$$

де σ_x – нормальне напруження в бетоні на площадці, перпендикулярній поздовжній осі елемента, від зовнішнього навантаження, що визначається за виразом

$$\sigma_x = \pm \frac{M}{I_{red}} y, \quad (46)$$

тут y – тут відстань від центра ваги приведеного перерізу елемента до рівня волокон, в яких визначаються напруження;

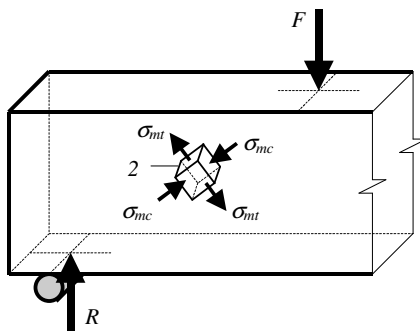
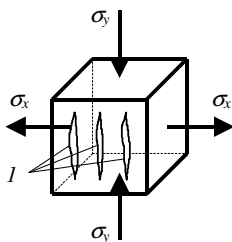
I_{red} – початковий (при першому навантаженні) момент інерції приведеного перерізу елемента відносно центра ваги,

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh(0,5h - y_{red})^2 + \alpha_s A_s (y_{red} - a)^2; \quad (47)$$



$$y_{red} = \frac{S_{red}}{A_{red}}, \quad (48)$$

a)



б)

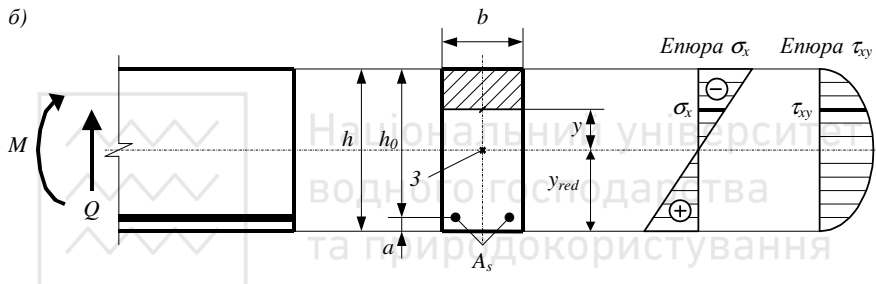


Рисунок 5 – Схеми до розрахунку елемента на утворення тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень:

a – напружений стан елементарного об'єму бетону; b – розрахункова схема перерізу елемента; 1 – мікротріщини; 2 – елементарний об'єм бетону; 3 – центр ваги приведенного перерізу

$\alpha_s = E_s / E_b$ – початковий (при першому навантаженні) коефіцієнт приведення для поздовжньої розтягнутої арматури;

A_{red} і S_{red} – відповідно початкові (при першому навантаженні) площа приведенного перерізу елемента та статичний момент приведенного перерізу елемента відносно крайнього розтягнутого волокна;

$$A_{red} = bh + \alpha_s A_s; \quad (49)$$

$$S_{red} = \frac{bh^2}{2} + \alpha_s A_s a; \quad (50)$$

σ_y – нормальне напруження в бетоні на площадці, паралельній поздовжній осі елемента, яке приймається таким, що дорівнює напруженню від місцевої дії опорних реакцій, зосереджених



сил і розподіленого навантаження $\sigma_{y,loc}$ поблизу місця прикладання опорних реакцій і зосереджених сил та визначається за формулою

$$\sigma_y = \sigma_{y,loc} = \frac{F}{bh} \frac{\beta}{1,57} \left[\frac{\beta}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} - \frac{3 - 2\beta}{(1 + \alpha^2)^2} \right], \quad (51)$$

тут

F – зосереджена сила або опорна реакція;
 $\alpha = x_l/h$, $\beta = y_h/h$ – відносні координати точки, для якої визначаються величини місцевих напружень (у місці прикладання зосередженої сили $x_l=0$ і $y_h=0$, при цьому вісь x_l спрямована паралельно поздовжній осі елемента, вісь y_h – нормально до неї); урахування місцевих напружень обмежується довжиною ділянки $x=0,7h$ в обидві сторони від точки прикладання зосередженої сили;

τ_{xy} – дотичне напруження в бетоні від зовнішнього навантаження, що визначається за виразом

$$\tau_{xy} = \frac{QS_{red}^*}{bI_{red}}, \quad (52)$$

тут

Q – поперечна сила від зовнішнього навантаження в розглядуваному перерізі;
 S_{red}^* – початковий (при першому навантаженні) статичний момент “відсіченої” частини приведенного перерізу, розташованої вище рівня розглядуваного волокна, відносно центра ваги перерізу.

Напруження σ_x , σ_y і τ_{xy} підставляються у формулу (45) із знаком “плюс”, якщо вони розтягаючі, та зі знаком “мінус” – якщо стискаючі. Напруження σ_{mc} в умові (44) приймаються за абсолютною величиною.

Розрахунок згинальних елементів на утворення похилих тріщин при дії малоциклових навантажень не виконується, якщо задовольняється умова

$$Q \leq 2,5\gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser} b h_0. \quad (53)$$

8. РОЗРАХУНОК ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА РОЗКРИТТЯ ТРІЩИН

Залізобетонні елементи розраховуються на розкриття тріщин:

- нормальних до поздовжньої осі елемента;
- похилих до поздовжньої осі елемента.



Розрахунок на розкриття тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента

8.1. Ширина розкриття тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

$$a_{crc,cyc}^{norm} = \eta \delta_{s,cyc} \lambda_{s,cyc} \frac{\sigma_{s,cyc}}{\gamma_{E_s,cyc} E_s} d_s, \quad (54)$$

де η – коефіцієнт, який приймається при стержневій арматурі періодичного профілю 1,0; при стержневій арматурі гладкій – 1,3; при дротяній арматурі періодичного профілю та канатах – 1,2; при дротяній арматурі гладкій – 1,4;

$$\delta_{s,cyc} = \frac{\alpha_{s,cyc}}{\varphi_d (1 + 2\alpha_{s,cyc} \mu_{s,cyc})}, \quad (55)$$

тут φ_d – коефіцієнт, який приймається при діаметрі арматури 10 мм і менше – 1,0; при діаметрі 22 мм – 1,4; при діаметрі 32 мм і більше – 1,6; для проміжних значень діаметрів – лінійною інтерполяцією;

$\alpha_{s,cyc}$ – коефіцієнт приведення для поздовжньої робочої арматури при дії малоциклових навантажень, який визначається за формулою (34);

$\mu_{s,cyc}$ – коефіцієнт поздовжнього армування при дії малоциклових навантажень, який приймається таким, що дорівнює відношенню площі перерізу поздовжньої розтягнутої арматури до площі перерізу бетону розтягнутої зони в нормальному перерізі елемента після малоциклових впливів (див. рис. 4) та обчислюється за виразом

$$\mu_{s,cyc} = \frac{A_s}{b(h_0 - x_{cyc})} \leq 0,02; \quad (56)$$

$$\lambda_{s,cyc} = 2 \left(1 - \frac{1}{e^{w_{s,cyc}}} \right) \leq 1,45, \quad (57)$$

тут e – основа натурального логарифма;

$$w_{s,cyc} = \frac{5 + 0,6 \sigma_{s,cyc} / (\gamma_{b,cyc} R_{b,ser})}{\delta_{cyc}}; \quad (58)$$

$\sigma_{s,cyc}$ – напруження в поздовжній розтягнутій арматурі при дії малоциклових навантажень, які визначаються за виразом

$$\sigma_{s,cyc} = \frac{M}{A_s z_{cyc}} \leq \gamma_{s,cyc} R_{s,ser}, \quad (59)$$



z_{cyc} – відстань від центра ваги перерізу поздовжньої розтягнутої арматури до точки прикладання зусилля в стиснутій зоні бетону (плече внутрішньої пари сил) при дії малоциклових навантажень (див. рис. 2,а), яка обчислюється з урахуванням 5.7;

d_s – діаметр поздовжньої розтягнутої арматури.

Розрахунок на розкриття тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента

8.2. Розрахунок ширини розкриття тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента при дії малоциклових навантажень, виконується

– на рівні поперечної арматури;

– на рівні поздовжньої розтягнутої арматури.

8.3. Ширина розкриття тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента на рівні поперечної арматури, при армуванні хомутами, нормальними до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

$$a_{crc,cyc}^{inc} = \eta \delta_{sw,cyc} \lambda_{sw,cyc} \frac{\sigma_{sw,cyc}}{\gamma_{E_{sw,cyc}} E_{sw}} d_{sw}, \quad (60)$$

де

η – те ж саме, що у формулі (54);

E_{sw} – модуль пружності поперечної арматури;

$\gamma_{E_{sw,cyc}}$ – коефіцієнт умов роботи поперечної арматури при дії малоциклових навантажень;

$$\delta_{sw,cyc} = \frac{\alpha_{sw,cyc}}{\varphi_d (1 + 2\alpha_{sw,cyc} \mu_{sw})}, \quad (61)$$

тут

φ_d – те ж саме, що у формулі (55);

$\alpha_{sw,cyc}$ – коефіцієнт приведення для поперечної арматури при дії малоциклових навантажень, який визначається за формулою

$$\alpha_{sw,cyc} = \frac{\gamma_{E_{sw,cyc}} E_{sw}}{\gamma_{E_b,cyc} E_b}; \quad (62)$$

μ_{sw} – коефіцієнт поперечного армування хомутами, який обчислюється за виразом

$$\mu_{sw} = \frac{A_{sw}}{b s_w}; \quad (63)$$

s_w – крок хомутив уздовж елемента;

$$\lambda_{sw,cyc} = 2 \left(1 - \frac{1}{e^{w_{sw,cyc}}} \right) \leq 1,45; \quad (64)$$

e – те ж саме, що у формулі (57);



$$w_{s,cyc} = \frac{5 + 0,6 \sigma_{sw,cyc} / (\gamma_{b,cyc} R_{b,ser})}{\delta_{sw,cyc}} \leq \frac{0,5h_0}{d_{sw} \delta_{sw,cyc}}; \quad (65)$$

d_{sw} – діаметр арматури хомутів;

$\sigma_{sw,cyc}$ – напруження в хомутах при дії малоциклових навантажень, які визначаються за виразом

$$\sigma_{sw,cyc} = \frac{Q - Q_{b1,cyc}}{\varphi_{sw} A_{sw} h_0} s \leq \gamma_{sw,cyc} R_{sw,ser}; \quad (66)$$

$$\varphi_{sw} = 0,45 + 50 \mu_{sw} \leq 0,8; \quad (67)$$

$Q_{b1,cyc}$ – поперечне зусилля, яке сприймається бетоном у перерізі над похилою тріщиною (відповідає поперечному зусиллю утворення похилої тріщини в перерізі елемента без поперечної арматури) при дії малоциклових навантажень і визначається за формулою

$$Q_{b1,cyc} = \frac{0,8 \varphi_{b4} \gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser} b h_0^2}{c}, \quad (68)$$

при цьому мають задовольнятися такі умови:

$$Q_{b1,cyc} \leq 2,5 \gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser} b h_0, \quad (69)$$

$$Q_{b1,cyc} \geq \varphi_{b3} \gamma_{bt,cyc} R_{bt,ser} b h_0; \quad (70)$$

φ_{b3} і φ_{b4} – коефіцієнти, які залежать від виду бетону та приймаються для важкого бетону відповідно 0,6 і 1,5;

c – довжина проекції похилої тріщини на поздовжню вісь елемента (див. рис. 3).

За відсутності в розглядуваній зоні дії поперечних сил нормальних тріщин, що підтверджується розрахунком на утворення нормальних тріщин (якщо виконується умова (31)), допускається враховувати підвищення поперечного зусилля $Q_{b1,cyc}$, яке сприймається елементом, розрахунком на утворення похилих тріщин з умови (43), розглядаючи елемент як суцільне пружне тіло.

Розрахункові опори бетону $R_{b,ser}$ і $R_{bt,ser}$ при дії малоциклових навантажень, які містяться в залежностях (65), (68)...(70), не повинні перевищувати значень, що відповідають бетону класу В30.

8.4. Ширина розкриття тріщин, похилих до поздовжньої осі елемента на рівні поздовжньої розтягнутої арматури при армуванні хомутами, нормальними до поздовжньої осі елемента, при дії малоциклових навантажень визначається за формулою (54).

Напруження в поздовжній розтягнутій арматурі $\sigma_{s,cyc}$ при дії малоциклових навантажень визначаються за формулою

$$\sigma_{s,cyc} = \frac{M - 0,5 c_{0,cyc} (Q - Q_{b1,cyc})}{A_s z_{cyc}}, \quad (71)$$



M і z_{cyc} , Q і $Q_{bl,cyc}$, $c_{0,cyc}$ – позначення ті ж самі, що у формулах відповідно (59), (66) і (26);

A_s – площа перерізу поздовжньої розтягнутої арматури, що перетинає небезпечну похилу тріщину та для якої виконуються умови анкерування за похилою тріщиною у відповідності з 5.14 і 5.15 [24].

9. РОЗРАХУНОК ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ

9.1. Деформації (прогини) елементів залізобетонних конструкцій обчислюються за формулами будівельної механіки, визначаючи величини кривизни, що входять до цих формул, у відповідності з 9.2...9.6.

Величина кривизни залізобетонних елементів відлічується від їхнього початкового стану.

9.2. Для ділянок елементів, де у розтягнутій зоні не утворюються тріщини, нормальні до поздовжньої осі, кривизна визначаються як для пружного тіла.

Для ділянок елементів, де в розтягнутій зоні наявні тріщини, нормальні до поздовжньої осі, кривизна визначається як відношення середніх деформацій поздовжньої розтягнутої арматури до відстані від нульової лінії до центра ваги перерізу цієї арматури.

Елементи або ділянки елементів розглядаються без тріщин у розтягнутій зоні, якщо тріщини не утворюються при дії постійних, довгочасних і короткочасних тимчасових навантажень, при цьому навантаження вводяться до розрахунку з коефіцієнтом надійності за навантаженням $\gamma=1,0$.

Визначення кривизни залізобетонних елементів на ділянках без тріщин у розтягнутій зоні

9.3. На ділянках елементів, де не утворюються нормальні до поздовжньої осі тріщини, повна величина кривизни при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cyc} = \left(\frac{1}{r}\right)_{1,cyc} + \left(\frac{1}{r}\right)_{2,cyc}, \quad (72)$$

де $(1/r)_{1,cyc}$ і $(1/r)_{2,cyc}$ – кривизни відповідно від короткочасних тимчасових (що визначаються у відповідності з 1.12 [24]) та від постійних і довгочасних тимчасових навантажень з урахуванням малоциклових впливів, які визначаються за формулами



$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{l}{r}\right)_{1, \text{cyc}} &= \frac{M}{\varphi_{b1} \gamma_{E_b, \text{cyc}} E_b I_{red, \text{cyc}}}; \\ \left(\frac{l}{r}\right)_{2, \text{cyc}} &= \frac{M \varphi_{b2}}{\varphi_{b1} \gamma_{E_b, \text{cyc}} E_b I_{red, \text{cyc}}} \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

- тут M – момент від відповідного зовнішнього навантаження (короткочасного тимчасового, постійного та довгочасного тимчасового);
- φ_{b1} – коефіцієнт, який враховує вплив короткочасної повзучості бетону та приймається 0,85 для згинальних елементів із важкого бетону;
- φ_{b2} – коефіцієнт, який враховує вплив довгочасної повзучості бетону та приймається за табл. 34 [24] залежно від виду бетону й вологості навколишнього середовища.

Визначення кривизни залізобетонних елементів на ділянках з тріщинами у розтягнутій зоні

9.4. На ділянках, де в розтягнутій зоні утворюються нормальні до поздовжньої осі елемента тріщини, кривизна елементів при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

$$\left(\frac{l}{r}\right)_{\text{cyc}} = \frac{M \psi_{s, \text{cyc}}}{z_{\text{cyc}} A_s \gamma_{E_{s, \text{cyc}}} E_s (h_0 - x_{\text{cyc}})}, \quad (74)$$

де x_{cyc} і z_{cyc} – відповідно висота стиснутої зони бетону та відстань від центра ваги перерізу поздовжньої розтягнутої арматури до точки прикладання зусилля в стиснутій зоні бетону (плече внутрішньої пари сил) при дії малоциклових навантажень (див. рис. 4), які обчислюються у відповідності з 9.5;

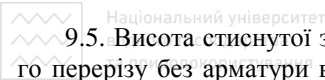
$\psi_{s, \text{cyc}}$ – коефіцієнт, який враховує роботу розтягнутого бетону на ділянках із тріщинами при дії малоциклових навантажень та обчислюється за виразом

$$\psi_{s, \text{cyc}} = 1,25 - \varphi_{ts} \varphi_{m, \text{cyc}} \leq 1, \quad (75)$$

тут φ_{ts} – коефіцієнт, який враховує вплив тривалості дії навантаження з урахуванням малоциклових впливів і виду арматури та приймається за табл. 36 [24];

$$\varphi_{m, \text{cyc}} = \frac{\gamma_{bt, \text{cyc}} R_{bt, ser} W_{pl, \text{cyc}}}{M} \leq 1; \quad (76)$$

$W_{pl, \text{cyc}}$ – див. формулу (33).



9.5. Висота стиснутої зони бетону для згинальних елементів прямокутного перерізу без арматури в стиснутій зоні при малоциклових навантаженнях обчислюється за формулою

$$x_{\text{cyc}} = \varphi_{\text{с,с,с}} h_0, \quad (77)$$

де

$$\varphi_{\text{с,с,с}} = \beta_{\text{с,с,с}} \left[\sqrt{1 + \frac{2}{\beta_{\text{с,с,с}}}} - 1 \right], \quad (78)$$

тут

$$\beta_{\text{с,с,с}} = \alpha_{\text{с,с,с}} \mu \frac{\psi_b \varphi_{b2}}{\psi_{\text{с,с,с}} \varphi_{b1}}; \quad \mu = \frac{A_s}{bh_0}, \quad (79)$$

$\alpha_{\text{с,с,с}}$ – коефіцієнт, який обчислюється за формулою (34);

ψ_b – коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу деформацій крайнього стиснутого волокна бетону по довжині ділянки з тріщинами й приймається таким, що дорівнює 0,9 для бетонів класу В7,5 і вище;

φ_{b1} і φ_{b2} – те ж саме, що у формулі (73).

Значення $z_{\text{с,с,с}}$ для згинальних елементів прямокутного перерізу при дії малоциклових навантажень обчислюється за формулою

$$z_{\text{с,с,с}} = h_0 - \frac{x_{\text{с,с,с}}}{3}. \quad (80)$$

9.6. Повна кривизна $(1/r)_{\text{с,с,с}}$ елементів для ділянок із тріщинами в розтягнутій зоні при дії малоциклових навантажень визначається за формулою

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{\text{с,с,с}} = \left(\frac{1}{r} \right)_{1,\text{с,с,с}} - \left(\frac{1}{r} \right)_{2,\text{с,с,с}} + \left(\frac{1}{r} \right)_{3,\text{с,с,с}}, \quad (81)$$

де $(1/r)_{1,\text{с,с,с}}$ – кривизна від нетривалої дії всього навантаження, на яке виконується розрахунок за деформаціями у відповідності з 1.20 [24] з урахуванням малоциклових впливів;

$(1/r)_{2,\text{с,с,с}}$ – кривизна від нетривалої дії постійних і довгочасних тимчасових навантажень з урахуванням малоциклових впливів;

$(1/r)_{3,\text{с,с,с}}$ – кривизна від тривалої дії постійних і довгочасних тимчасових навантажень з урахуванням малоциклових впливів.

Кривизни $(1/r)_{1,\text{с,с,с}}$; $(1/r)_{2,\text{с,с,с}}$ і $(1/r)_{3,\text{с,с,с}}$ визначаються за формулою (74), при цьому $(1/r)_{1,\text{с,с,с}}$ і $(1/r)_{2,\text{с,с,с}}$ обчислюються при значеннях φ_{b2} і $\psi_{\text{с,с,с}}$, що відповідають нетривалій дії навантаження, $(1/r)_{3,\text{с,с,с}}$ – при значеннях φ_{b2} і $\psi_{\text{с,с,с}}$, що відповідають тривалій дії навантаження.



9.7. Прогин f_m , зумовлений деформацією згину при дії малоциклових навантажень, визначається за формулою

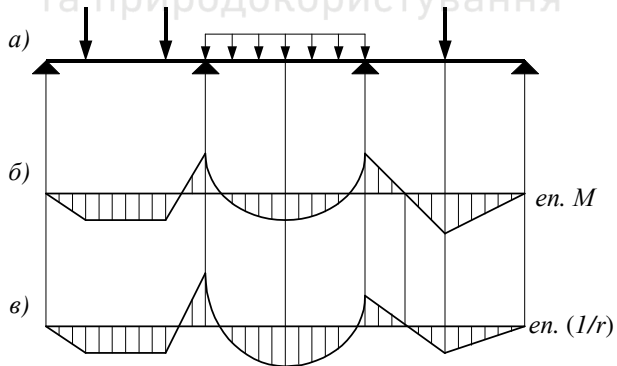
$$f_{m,cyc} = \int_0^l \overline{M}_x \left(\frac{1}{r} \right)_{x,cyc} dx, \quad (82)$$

де \overline{M} – згинальний момент у перерізі x від дії одиничної сили, прикладеної у напрямку шуканого переміщення елемента в перерізі x по довжині прольоту, для якого визначається прогин;

$(1/r)_{x,cyc}$ – повна кривизна елемента в перерізі x від навантаження, при якому визначається прогин, з урахуванням малоциклових впливів. Значення $(1/r)_{x,cyc}$ обчислюються за формулами (72) і (74) відповідно для ділянок без тріщин і з тріщинами; знак $(1/r)$ приймається відповідно до епюри кривизни.

Для згинальних елементів постійного перерізу, що мають тріщини, на кожній ділянці, у межах якої згинальний момент не змінює знака, кривизну допускається обчислювати для найбільш напруженого перерізу, приймаючи її для решти перерізів такої ділянки зміненою пропорційно значенням згинального моменту (рис. 6).

Рисунок 6 – Схема розташування навантаження (а), епюри згинальних моментів (б) і кривизни (в) для залізобетонних елементів постійного перерізу



9.8. У найпростіших випадках сумарний прогин $f_{m,cyc}$, зумовлений деформацією згину, при дії малоциклових навантажень можна розрахувати за такими формулами:

– за відсутності тріщин у розтягнутій зоні

$$f_{m,cyc} = f_{1,cyc} + f_{2,cyc}; \quad (83)$$

– за наявності тріщин у розтягнутій зоні

$$f_{m,cyc} = f_{1,cyc} - f_{2,cyc} + f_{3,cyc}; \quad (84)$$



$$f_{\text{cyc}} = s \left(\frac{l}{r} \right)_{\text{cyc}} l^2, \quad (85)$$

тут s – коефіцієнт, який залежить від розрахункової схеми елемента та виду навантаження й приймається з таблиці.

Значення коефіцієнта s

Розрахункова схема елемента та вид навантаження	Значення коефіцієнта s
<i>Вільно обперта балка:</i>	
при рівномірно розподіленому навантаженні	5/48
при зосередженому навантаженні в середині прольоту	1/12
при двох однакових моментах на кінцях	1/8
<i>Консольна балка:</i>	
при рівномірно розподіленому навантаженні	1/4
при зосередженому навантаженні на вільному кінці	1/3
при моменті на вільному кінці	1/2

9.9. Для згинальних елементів при $l/h < 10$ необхідно враховувати вплив поперечних сил на їхній прогин. У цьому випадку повний прогин $f_{\text{tot}, \text{cyc}}$ при дії малоциклових навантажень дорівнює сумі прогинів, зумовлених відповідно деформацією згину $f_{m, \text{cyc}}$ і деформацією зсуву $f_{q, \text{cyc}}$ при дії малоциклових навантажень.

9.10. Прогин $f_{q, \text{cyc}}$, зумовлений деформацією зсуву при дії малоциклових навантажень, визначається за формулою

$$f_{q, \text{cyc}} = \int_0^l \bar{Q}_x \gamma_{x, \text{cyc}} dx, \quad (86)$$

де \bar{Q}_x – поперечна сила в перерізі x від дії за напрямком шуканого переміщення одиничної сили, прикладеної у перерізі, де визначається прогин;

$\gamma_{x, \text{cyc}}$ – деформація зсуву при дії малоциклових навантажень, яка визначається за виразом

$$\gamma_{x, \text{cyc}} = \frac{1,5 Q_x \varphi_{b2}}{G_{\text{cyc}} b h_0} \varphi_{\text{erc}, \text{cyc}}, \quad (87)$$

тут Q_x – поперечна сила в перерізі x від дії зовнішнього навантаження;

G_{cyc} – модуль зсуву бетону при дії малоциклових навантажень, який приймають $0,4 \gamma_{E_b, \text{cyc}} E_b$;

$\varphi_{\text{erc}, \text{cyc}}$ – коефіцієнт, який враховує вплив тріщин на деформації



зсуву при дії малоциклових навантажень і приймається таким: на ділянках по довжині елемента, де відсутні нормальні до поздовжньої осі елемента тріщини, – 1,0; на ділянках, де є лише похилі до поздовжньої осі елемента тріщини, – 4,8; на ділянках, де є лише нормальні або нормальні та похилі до поздовжньої осі елемента тріщини – обчислюється за виразом

$$\varphi_{crc,cyc} = \frac{3\gamma_{E_b,cyc} E_b I_{red,cyc}}{M_{cyc}} \left(\frac{I}{r} \right)_{x,cyc}, \quad (88)$$

M_x і $(I/r)_{x,cyc}$ – відповідно момент від зовнішнього навантаження та повна кривизна в перерізі x від навантаження з урахуванням малоциклових впливів, при якому визначається прогин.





1. Бабич Є.М. Вплив тривалих і малоциклових навантажень на механічні властивості бетонів та роботу залізобетонних елементів: Дис. ... д-ра техн. наук. – Одеса, 1995. – 392 с.
2. Бабич Є.М. Про класифікацію навантажень на будівельні конструкції та інженерні споруди//Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. – Рівне: УДАВГ, 1997. – Вип. 21. – С. 94-99.
3. Бабич Є.М. Рекомендації до розрахунку бетонних та залізобетонних елементів при дії малоциклових навантажень. – Рівне: УПВГ, 1994. – 12 с.
4. Бабич Є.М., Крусь Ю.А. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень: Монографія. – Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. – 119с.
5. Бабич Є.М., Крусь Ю.А. Урахування малоциклових навантажень при розрахунку залізобетонних конструкцій//Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Мат-ли міжнар. наук.-техн. конф. – Рівне, 1996. – Частина перша. – С. 58.
6. Бабич Е.М., Крусь Ю.А., Гарницкий Ю.В. Новые аппроксимации зависимости “напряжения-деформации”, учитывающие нелинейность деформирования бетонов//Изв. вузов. Сер. Строительство. – 1996. – № 2. – С. 39-44.
7. Бабич Е.М., Крусь Ю.А. Использование энергетических соотношений при определении малоциклового усталости бетона//Бетон и железобетон. – 1997. – № 4. – С. 26-28.
8. Бабич Є.М., Крусь Ю.А., Панчук Ю.Н. Учёт малоцикловых нагрузок при расчёте железобетонных конструкций//Проблемы качества и надёжности машин: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф., Могилёв, 4-5 октября 1994 г. – Часть II. – Могилёв, 1994. – С. 71.
9. Бабич Є.М., Кухнюк О.М. Деформування залізобетонних балок під впливом малоциклових статичних навантажень//Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: Вид-во РДТУ, 2000. – Вип. 4. – С. 101-105.
10. Бабич Є.М., Кухнюк О.М. Деформаційні характеристики бетону при осьовому малоцикловому стиску//Вісник Рівненського державного технічного університету: Зб. наук. праць. – Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. – Вип. 2. – Частина 3. – С. 21-25.
11. Бабич Є.М., Панчук Ю.М. Деформативні характеристики важкого бетону при малоцикловому стиску//Вісник Рівненського державного технічного університету: Зб. наук. праць. – Рівне: Вид-во РДТУ, 2000. – Вип. 1. – Частина 3. – С. 113-117.
12. Бабич Е.М., Погореляк А.П., Залесов А.С. Работа элементов на поперечную силу при многократно повторном нагружении//Бетон и железобетон. – 1981. – № 6. – С. 8-9.

13. Барашиков А.Я., Шевченко Б.Н., Валовой А.И. Малоцикловая усталость бетона при сжатии//Бетон и железобетон. – 1985. – № 4. – С. 27-28.
14. Барашиков А.Я. Расчёт железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок. – Киев: Будівельник, 1977. – 156 с.
15. Берг О.Я. О выносливости железобетонных конструкций//Гр. ЦНИИС. – М., 1955. – Вып. 18. – С. 151-167.
16. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. – Киев: Будівельник, 1989. – 104 с.
17. Климов Ю.А. Внутренние усилия в наклонном сечении при расчёте прочности железобетонных элементов//Бетон и железобетон. – 1990. – № 1. – С. 16-18.
18. Крусь Ю.О. Метод визначення малоциклової втомленості бетону із застосуванням енергетичних гіпотез//Проблеми теорії і практики залізобетону: Зб. наук. ст. – Полтава, 1997. – С. 265-268.
19. Кухнюк О.М. Застосування методів математичного планування експерименту для прогнозування міцності бетонів після впливу малоциклових навантажень//Вісник Української державної академії водного господарства: Зб. наук. праць. – Рівне: Вид-во УДАВГ, 1998. – Вип. 1. – Частина 2. – С. 136-141.
20. Кухнюк О.М., Бабич Є.М. Вплив малоциклових навантажень на міцність залізобетонних балок//Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 1999. – Вип. 3. – С. 178-184.
21. Маилян Л.Р., Бекиев М.Ю., Силь Г.Р. Работа бетона и арматуры при многократно повторных нагружениях. – Нальчик, 1984. – 56 с.
22. Расчёт железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям//А.С.Залесов, Э.Н.Кодыш, Л.Л.Лемьш, И.К.Никитин. – М.: Стройиздат, 1988. – 320 с.
23. СНИП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.
24. СНИП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. – М.: Стройиздат, 1986. – 36 с.
25. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 48 с.



1. Загальні положення	3
2. Малоциклові навантаження та їхні характеристики	3
3. Малоциклова втомленість бетону	5
4. Коефіцієнти умов роботи	5
5. Розрахунок міцності перерізів, нормальних до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів	8
6. Розрахунок міцності перерізів, похилих до поздовжньої осі згинальних залізобетонних елементів	10
7. Розрахунок згинальних залізобетонних елементів на утворення тріщин	13
8. Розрахунок згинальних залізобетонних елементів на розкриття тріщин	20
9. Розрахунок згинальних залізобетонних елементів за деформаціями	23
Використані джерела	29





Національний університет
водного господарства
та природокористування



*Євген Михайлович Бабич,
Юрій Олексійович Крусь,
Олег Миколайович Кухнюк*

**РОЗРАХУНОК ЗГІНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ДІЇ МАЛОЦИКЛОВИХ
НАВАНТАЖЕНЬ**

Рекомендації

Затверджено до друку Вченою радою
Рівненського державного технічного університету

Здано на виробництво 12.03.2001 р. Підписано до друку 23.02.2001 р. Формат 60x84¹/₁₆.
Папір друкарський № 1. Гарнітура Times. Друк високий. Ум.-друк. арк. 1,94.
Тираж 100 пр. Вид. № 72. Зам. 12. Ціна вільна.

Видавництво Рівненського державного технічного університету,
33000, м. Рівне, вул. Соборна, 11.