

УДК 624.073

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ЗА ДІЇ ПОВТОРНИХ ЗНАКОЗМІННИХ
НАВАНТАЖЕНЬ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ ДЕЙСТВИИ
ПОВТОРНЫХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЖЕНИЙ**

**OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF
REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER REPEATED
ALTERNATING LOADS**

Масюк Г. Х., к.т.н., проф. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Масюк Г. Х., к.т.н., проф. (Национальный университет водного хозяйства и природоиспользования, г. Ровно)

Masuk G. H., candidate of technical sciences, professor (National university of water management and nature resources use, Rivne),

В статті наведено результати теоретично-експериментальних досліджень характеру роботи залізобетонних балок за дії малоциклових знакозмінних навантажень в залежності від величини прольоту «зрізу» і рівня навантаження. Наведено умови визначення несучої здатності нормальних і похилих перерізів балок.

В статье приведены результаты теоретично-експериментальных исследований характера работы железобетонных балок при действии малоцикловых знакопеременных нагрузок в зависимости от величины пролета «среза» и уровня нагрузки. Приведены условия определения несучей способности нормальных и наклонных сечений балок.

The results of experimental studies , was theoretically the nature of work of reinforced concrete beams under the action of low-cycle alternating loads depending on the flight , " cut " and the load level . The conditions determining capacity nesuchey normal and inclined sections of beams .

Ключові слова:

Несуча здатність, тріщиностійкість, малоциклові знакозмінні навантаження, проліт «зрізу», рівень навантажень

Несущая способность, трещиностойкость, малоцикловые знакопеременные нагрузки, пролет «среза», уровень нагружений
Load bearing capacity, fracture toughness, low-cycle alternating load, oblique section, stress level

Вступ. Для створення надійних залізобетонних конструкцій необхідно знати режими завантажень і закономірності зміни несучої здатності, тріщиностійкості і деформативності матеріалів за дії малоциклових експлуатаційних навантажень.

Мета і задачі досліджень: Виявити вплив малоциклових знакозмінних навантажень різних рівнів на роботу і напружено - деформований стан залізобетонних балок.

В лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд аспірантами Григорчуком А.Б., Караваном В.В., Корнійчуком О.І. безпосередньо під керівництвом автора було випробувано 57 залізобетонних балок, номінальними розмірами 100x160x2000 мм, виготовлених із бетонів класів С16/20, С25/30, С30/35 і армованих двома каркасами. В якості робочої поздовжньої арматури використовувалась арматура класу А400 і А500С діаметрами 10,12, 14 мм (армування перерізу подвійне, симетричне). Поперечна арматура використовувалась із класу В500, діаметрами 3,4 і 5 мм із різним кроком поперечних стержнів на при опорних ділянках від 45мм до 75мм.

Балки випробовувались по схемі «чистого згину» у віці від 30 діб і старшому. Зосереджені сили прикладали в третях прольоту ступінчастим навантаженням, приріст приймали рівним $0,1 M_u$ (M_u – руйнівний згинальний момент за однозначного навантаження). За даною схемою навантажень досліджувалась робота балок і її напружено-деформованого стану похилих перерізів. Для дослідження напружено-деформованого стану похилих перерізів балок змінювався прольот «зрізу» від 600 мм до 300 мм (600, 450, 300 мм). Режимы малоциклових знакозмінних навантажень для різних балок були різних рівнів і змінювались в межах від 0,2 до 0,8. Характер режимів завантажень на балки також був різним. Експериментальні дослідження проводились на спеціальних дослідних установках, що дозволяло створювати знакозмінні навантаження в дослідних зразках без зміни їх положення. Зразки випробували до повного руйнування. Детально методика проведення експериментальних досліджень наведена в роботах [1,2,3]. В процесі експериментальних випробувань за всіма зразками ретельно досліджувались зміни в них напружень і розвитку нормальних і похилих тріщин на всіх ступенях навантажень.

Аналіз експериментальних досліджень показав, що знакозмінне малоциклове навантаження знижує несучу здатність балок на 6%... 25% в порівнянні з балками, які зазнали впливу короткочасного одноразово прикладеного ступеневого навантаження до руйнування, в залежності від характеру режимів і рівнів завантаження. Найменшу несучу здатність мали

балки, що зазнавали дії знакозмінного навантаження рівня $\eta = 0,65/0,8 F_u$, тобто балки, які дозавантажувались на 5-му циклі до $\eta = 0,8 F$. Руйнування балок відбувалося по нормальних перерізах (напруження в поздовжній розтягнутій арматурі досягали умовної межі текучості) або по похилим перерізам (по основній похилій тріщині внаслідок зрізу бетону, коли $\sigma > f_{ctd}$ і досягнення напружень в поперечній арматурі своїх граничних значень.

Основною причиною зниження несучої здатності балок, що зазнавали малоциклового знакозмінного навантаження, є порушення структури бетону, тобто порушення його ізотропних якостей в поздовжньому і поперечному напрямках, що призвело до втрати щеплення арматури из бетоном. Руйнування балок по нормальних перерізам відбувалося плавно, а по похилим – процес руйнування мав крихкий характер.

Характеризуючи процеси деформування матеріалів в процесі малоциклового знакозмінного навантаження, слід зауважити наступне: деформації поздовжньої попередньо стиснутої арматури на першому і подальших циклах навантаження аж до руйнування перевищували відповідні деформації поздовжньої арматури, що зазнавала попереднього розтягу на 15%... 20%. Розвантаження балок на кожному пів циклі призводить до накопичення залишкових деформацій в арматурі з поступовим затуханням їх на подальших пів циклах розвантаження. До п'ятого циклу знакозмінних навантажень, не залежно від його рівня, в поздовжній арматурі нижньої і верхньої зон перерізу дослідних зразків деформації стабілізуються. Наступне довантаження балок до вищого рівня $\eta = 0,8 F_u$, викликало суттєве збільшення деформацій арматури розтягнутої зони. Стабілізація деформацій після довантаження в поздовжній арматурі обох зон поперечного перерізу балок відбувалось на восьмому циклі, а на подальших циклах знакозмінного навантаження прояви пластики були незначними аж до руйнування. При руйнуванні дослідних зразків деформації розтягу поздовжньої арматури перевищували граничні значення деформацій приблизно на 15%.

Деформування поперечних стержнів в похилих перерізах балок за дії малоциклових знакозмінних навантажень також суттєво відрізняється від деформування хомутів в балках за дії однозначного навантаження. Так, деформації поперечної арматури в напів циклі «б» в 1,5...4 рази більші за деформації в напів циклі «а», в залежності від прольоту «зрізу» і рівня знакозмінних навантажень. Слід відмітити, що найбільше збільшення деформацій в поперечних стержнях при зміні знаку навантаження спостерігалось при прольоті «зрізу» $c=450$ мм.

Що стосується деформативності бетону в дослідних балках за дії знакозмінних навантажень, то можна відмітити наступне, що деформації розтягу та стиску попередньо розтягнутої зони бетону протягом випробувань перевищували в середньому на 10% відповідні деформації попередньо стиснутої зони. Також слід відмітити наявність на першому циклі після розвантаження значних залишкових деформацій в межах 30%... 60% від

сумарних, залежно від рівня навантаження, та поступове їх затухання, на наступних циклах навантаження – розвантаження, що обумовлено пластичними властивостями бетону. За дії малоциклових знакозмінних навантажень частка пластичних деформацій в бетоні зменшується зі збільшенням кількості циклів та рівня навантаження, тобто бетон працював більш пружно за рахунок «вибору» пластики.

Деформації бетону в обох зонах нормальних перерізів балок стабілізувались до 5-го циклу, а після довантаження вищим рівнем – до 8-го циклу навантаження, що характеризує більш пружну роботу бетону аж до руйнування.

Щодо характеру деформування бетону похилих перерізів, то чіткої тенденції не виявлено. Ще пов'язано із складним напружено-деформованим станом в похилому перерізі балки за дії знакозмінних навантажень. Балка розбивається нормальними і похилими тріщинами на окремі блоки, які зв'язані між собою поперечною і поздовжньою арматурою та силами зчеплення між берегами тріщин. Ці в'язі запобігають взаємному переміщенні блоків один відносно одного під дією зовнішнього навантаження.

Слід зазначити, що клас бетону, з якого виготовлялись дослідні балки, суттєво впливає на їх роботу за дії малоциклових знакозмінних навантажень. Із зменшенням класу бетону в перерізах балки більш інтенсивно проходять деструктивні процеси – в результаті чого різко збільшуються деформації в поздовжній і поперечній арматурі і знижується несуча здатність балок. Тому в конструкціях, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень, необхідно використовувати високо-міцні бетони класів С30/35 і вище.

Режим завантаження практично не впливає на якісну картину напружено-деформативного стану балок в процесі випробувань. При навантаженні менших рівнів в матеріалах проходять аналогічні процеси, про які вже говорилося вище, але при цьому абсолютні деформації матеріалів мають менші значення, ніж при навантаженнях вищих рівнів.

Що стосується тріщиностійкості балок, то встановлено, що малоциклове знакозмінне навантаження негативно впливає і на їх тріщиностійкість, зменшує зусилля при яких утворюються як нормальні так і похилі тріщини, збільшує їх кількість, довжину та ширину розкриття. Перші тріщини в балках утворювались в зоні чистого згину, а після переміни знаку навантаження, незалежно від рівня попереднього навантаження, нормальні і похилі тріщини утворювались вже за значно менших зусиль. На початку завантаження балок першого напів циклу утворювались нормальні тріщини в зоні чистого згину і на невеликих ділянках спільної дії поперечної сили та згинального моменту. Зі збільшенням навантаження появлялись нові тріщини в зоні спільної дії моменту та поперечної сили, причому деякі з них, а також раніше утворені спочатку були перпендикулярні до поздовжньої арматури, а потім відхилялись в бік прикладання сили, що можна пояснити зміною в співвідношенні моменту та поперечної сили в дослідних балках за дії

ступенево-зростаючого знакозмінного навантаження різного рівня. Зі збільшенням рівня та циклу навантаження поступово призупиняється процес розвитку тріщин в зоні чистого згину, а похилі тріщини в прольоті «зрізу» розвивалися інтенсивніше. За даного режиму знакозмінного навантаження можна констатувати про відносну стабілізацію утворення і розвитку тріщин до 5-го циклу, а після довантаження – до 8-го, 9-го циклів.

Аналіз дослідних даних дозволяє зробити висновок, що знакозмінні малоциклові навантаження знижують тріщиностійкість залізобетонних балок у порівнянні з одноразовим короткочасним навантаженням, при цьому зниження даної характеристики залежить від рівня навантаження, якого зазнає дослідний зразок та від кількості циклів навантаження. На основі проведених експериментів встановлено, що процес утворення та розвитку тріщин пов'язаний тільки із зміною напружено-деформованого стану балок за дії малоциклового знакозмінного навантаження – головним чином із-за зменшення жорсткості дослідних зразків.

Великий інтерес представляє вивчення прогинів за дії знакозмінного навантаження. Характерним для дослідних балок є те, що прогини на першому напів циклах «б» були завжди більшими за відповідні прогини балок в напів циклах «а». Це пояснюється тим, що тріщини, які виникли в розтягнутій зоні на першому напів циклі навантаження при переміні знаку опинились в стиснутій зоні, що викликало зниження жорсткості балок та більш інтенсивніший ріст прогинів. На другому і наступному циклах прогини балок по вказаній причині збільшувались, хоча абсолютний приріст в напів циклах «а» і «б» зменшувався.

В результаті проведених експериментально-теоретичних досліджень з урахуванням передумов розрахунку залізобетонних конструкцій за I-II групами граничних станів і залежностей, наведених в діючих нормативних документах [4,5], рекомендується несучу здатність конструкцій, що зазнають дії малоциклових знакозмінних навантажень, визначати за формулами:

- визначення несучої здатності нормальних перерізів балок

$$M_{Ed} = [\beta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot Z_{(1)}^2 + \sigma_s \cdot A_s \cdot (d - Z_{(1)})] \gamma_{сус,м} \quad (1)$$

де $\gamma_{сус,м}$ - коефіцієнт, що враховує дію знакозмінних малоциклових навантажень. На основі статистичної обробки експериментальних даних встановлено його в залежності від рівня навантажень в такому діапазоні: для бетонів класу С 16/20 при $\eta = 0,5$ $F_u = 0,9$, при $\eta = 0,8$ $F_u = 0,8$, для бетонів класу С 30/35 при $\eta = 0,5$ $F_u = 0,85$, при $\eta = 0,8$ $F_u = 0,72$. Інші параметри приймаються за нормами [4,5];

- визначення несучої здатності похилих перерізів балок

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} \quad (2)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (3)$$

де умова (2) свідчить про те, що несуча здатність похилого перерізу забезпечується поперечною арматурою, а умова (3) – міцністю бетонної

смуги на стиск, що розташована між суміжними похилими тріщинами за дії знакозмінних малоциклових навантажень

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} Z f_{cd} \cot \theta \cdot \gamma_{cyc, V_s}, \quad (4)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w Z v_1 f_{cd} (\cot \theta + \operatorname{tg} \theta) \cdot \gamma_{cyc, V_s}, \quad (5)$$

де A_{sw} - площа поперечного перерізу хомутів;

s – крок поперечних стержнів;

f_{ywd} - розрахунковий опір текучості поперечної арматури;

v_1 - коефіцієнт зменшення міцності бетону при зсуві, при $f_{yk} \leq 60$ МПа, його можна приймати рівним 0,6;

α_{cw} - коефіцієнт, який враховує рівень напружень у стиснутому поясі, його значення рекомендовано приймати по [5].

$Z = 0,9 d$

γ_{cyc, V_s} в залежності від рівня навантажень, коефіцієнт умов роботи арматури приймається: при $\eta = 0,8 f_u - 0,7$, при $\eta \leq 0,8 f_u - 1$,

γ_{cyc, V_s} -при $\eta = 0,8 f_u - 0,6$, а при $\eta \leq 0,8 f_u - 0,9$.

При визначенні інших параметрів роботи залізобетонних балок, а саме тріщиностійкості, ширини розкриття тріщин і прогинів, які випробовують малоциклові знакозмінні навантаження, то також необхідно враховувати коефіцієнти умов роботи матеріалів, які знаходяться в межах від 0,4 для класів бетонів С16/20 і нижче і до 0,9 – для класів С30/35 і вище.

Висновки. В результаті проведених експериментально - теоретичних досліджень залізобетонних балок за дії малоциклових знакозмінних навантажень виявлено суттєві зміни в розвитку напружено-деформованого стану і роботи балок в цілому, які необхідно врахувати при розрахунках за першою і другою групами граничних станів.

1. Григорчук А.Б. Задачі та методика експериментальних досліджень міцності та деформативності залізобетонних елементів, що знаходяться під дією знакозмінного навантаження. А.Б. Григорчук, Г.Х. Масюк // Вісник Рівненського державного технічного університету. Зб. наук. праць.-Рівне.1999, вип. 2 ч.3. с 51-54. 2. Масюк Г.Х. Задачі та методика експериментальних досліджень деформативності та тріщиностійкості згинальних залізобетонних елементів, що зазнають впливу знакозмінного малоциклового навантаження. Г.Х. Масюк, В.В. Караван // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування. Зб. наук. праць.-Рівне. 2002, вип. 4 (17). С 174-179. 3. Масюк Г.Х. Задачі та методика експериментальних досліджень міцності та тріщиностійкості похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів при дії малоциклових знакозмінних навантажень. Г.Х. Масюк, О.І. Корнійчук // Ресурсоекономні матеріали конструкції, будівлі і споруди. Зб. наук. праць.-Рівне. 2006, вип. 14. С 246-252. 4. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення / Мінрегіонбуд України: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинні від 01.06.11]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. 5. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування / Мінрегіонбуд України: ДСТУ Б В.2.6.-156: 2010. С 123.