

УДК 624.012.25:539.319

## **ОПР АРМАТУРНИХ СТЕРЖНІВ МАЛОЦИКЛОВОМУ ВИТЯГАННЮ З БЕТОНУ**

**СОПРОТИВЛЕНИЕ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ МАЛОЦИКЛОВОМУ ВЫТЯГИВАНИЮ З БЕТОНА**

**RESISTANCE REINFORCING RODS OF LOW-CYCLES EXTRACTION OF CONCRETE**

**Кундрат М.М., д.т.н., проф., Борисюк О.П., к.т.н., доц., Поляновська О.Є., аспірант, Мейта Т.П., магістр (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Кундрат Н.М., д.т.н., проф., Борисюк О.П., к.т.н., доц., Поляновская Е.Е., аспирант, Мейта Т.П., магистр (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ривне)**

**Kundrat N.M., doctor of technical sciences, prof., Borisjuk O.P., candidate of technical sciences, Polianovska O.Ye., post-graduate, Meita T.P., mahistr (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)**

**Наведені результати планованого експерименту, на основі якого отримана математична модель впливу на напруження зчеплення та проковзування стержнів в бетоні залежно від діаметра арматури, довжини її анкерування та кількості циклів повторного витягання. Встановлено, що малоциклове витягання збільшує граничні напруження зчеплення та збільшує проковзування стержнів в бетоні.**

**Приведены результаты планированного эксперимента, на основании которого получена математическая модель влияния на напряжения сцепления и проскальзывание стержней в бетоне в зависимости от диаметра стержней, длины анкеровки и количества циклов повторного вытягивания. Установлено, что малоцикловое вытягивание увеличивает предельные напряжения сцепления и увеличивает проскальзывание стержней в бетоне.**

**The results of the planned experiment on which A mathematical model of the influence on the slip clutch and tension rods in concrete, depending on the diameter of reinforcement, anchoring its length and number of cycles repeated extraction. Found that of low-cycles extracting threshold voltage increases traction and increased slipping rods in concrete.**

**Ключові слова:**

Бетон, арматура, малоциклове витягання, зчеплення.  
Бетон, арматура, малоцикловое вытягивание, сцепление.  
Concrete, reinforcement, of low-cycles extraction, clutch.

**Стан питання та задачі дослідження.** В зв'язку з повним переходом на виготовлення залізобетонних конструкцій з використанням стержньової арматури серпоподібного профілю за ДСТУ 3760 – 2006 розширилися дослідження зчеплення цієї арматури з бетоном. Відомі дослідження Клімова Ю.А., Бурака Н.П. [1, 2], Бабича Є.М., Чапюка О.С. [3, 4], Солдатченко О.С. [5]. В цих роботах наведені результати досліджень зчеплення арматури з бетоном залежно від різних факторів, вивчалися вплив на напруження зчеплення міцності бетону, діаметра стержнів, довжин анкерування тощо. Але дослідження впливу повторних (малоциклових) навантажень на величину зчеплення стержнів з бетоном та проковзування стержнів в масі бетону практично не виконувалося.

В роботі [6] наведені результати дослідження мало циклової втомленості зчеплення арматури серпоподібного профілю з бетоном за фіксованих значень міцності бетону ( $f_{cm,cube} = 31,1$  МПа), діаметра стержнів (16 мм) та довжини анкерення стержнів в бетон (80 мм). В роботі наведена формула для визначення рівня мало циклової втомленості зчеплення арматури з бетоном для умов експерименту та відмічено, що повторні навантаження збільшують проковзування стержнів в масі бетону.

В експериментальних дослідженнях, які висвітлені в роботі [7], використовували бетон класу C20/25, стержні класу A500C діаметром 16 мм з довжиною анкерення 80 мм, а випробовування на повторне витягання виконували за різних рівнів навантаження. Автори зробили висновок, що повторні навантаження різних рівнів призводять до виникнення залишкового проковзування стержнів і не впливають на величину напружень в арматурі в граничному стані порівняно з одноразовим навантаженням.

Як впливає з наведеного, досліджень, в яких би комплексно вивчався вплив визначальних факторів на зчеплення арматури з бетоном при мало цикловому витяганню не виконувалося. Такі дослідження доцільно виконати з використанням математично планованого експерименту. Цьому питанню посвячена пропонується стаття.

**Планування експерименту.** Математичне планування експерименту дало можливість отримати математичну модель для визначення граничних напружень зчеплення арматури з бетоном залежно від міцності бетону, діаметра стержнів та довжини їхнього анкерення [8]. В цій роботі обгрунтовано, що для планованого експерименту доцільно застосовувати матрицю плану Бокса – Бенкіна. Для встановлення впливу повторного витягування на зчеплення арматури з бетоном також використаємо трьох факторний план Бокса – Бенкіна, в якому за основні фактори приймемо

діаметр стержнів, довжину анкерення та кількість циклів повторного витягання (табл. 1, табл. 2). Всі фактори легко керовані.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Діаметр стержнів, $d$ , мм	$x_1$	12	16	20	4
Довжина анкерення, $l_b$	$x_2$	$5d$	$7,5d$	$10d$	$2,5d$
Кількість циклів навантаження, $n$	$x_3$	1	6	11	5

Таблиця 2

Матриця плану Бокса – Бенкіна та вихідні експериментальні дані

Точки плану	Матриця планування			Вихідні параметри, $\tau_{ui}$ , МПа			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\tau_{u1}$	$\tau_{u2}$	$\tau_{u3}$	$\tau_{um}$
1	+1	+1	0	8,16	7,96	8,67	8,26
2	+1	-1	0	6,98	6,16	5,99	6,38
3	-1	+1	0	9,28	8,49	7,91	8,56
4	-1	-1	0	7,31	7,20	8,17	7,56
5	+1	0	+1	8,63	9,06	8,41	8,70
6	+1	0	-1	7,59	6,84	5,83	6,75
7	-1	0	+1	8,61	8,45	8,59	8,55
8	-1	0	-1	7,04	7,46	7,55	7,35
9	0	+1	+1	10,08	9,75	10,44	10,09
10	0	+1	-1	9,22	8,89	7,91	8,84
11	0	-1	+1	7,71	7,96	7,06	7,58
12	0	-1	-1	7,20	7,78	8,76	7,90
13	0	0	0	6,93	7,14	8,20	7,35
				7,56	6,62	7,51	

Примітки: 1. В точках плану 1 – 12 виконано по три досліди.  
 2. В точці плану 13 виконано 6 дослідів (нульовий рівень).  
 3. Вихідні параметри представлені як середні значення в кожній точці плану..

Для діаметра стержнів на основному рівні планування (0) прийнято діаметр 16 мм, а на нижньому (-1) і верхньому (+1) відповідно – 12 і 20 мм (інтервал варіювання – 4 мм). Довжина заробки стержнів в бетон на основному рівні прийнята  $7,5d$ , а на нижньому і верхньому – відповідно  $5d$  і  $10d$ . Максимальна довжина анкерення стержнів прийнята  $10d$ , оскільки в попередніх дослідах при більшій довжині спостерігався розрив стержнів [8]. Середня межа текучості для стержнів діаметром 12, 16 і 20 мм становила відповідно  $f_{ym} = 512, 567$  і  $595$  МПа. Середня призмova міцність бетону у віці 28 діб складала  $f_{cm,prism} = 28,3$  МПа.

Кількість повторних малоциклових навантажень – розвантажень на основному рівні (0) прийнята  $n = 6$  циклів і відповідно на нижньому рівні (-1)  $n = 6$  та верхньому – (+1)  $n = 11$ . Прийнята кількість циклів на основному рівні обґрунтовується тим, що попередні дослідження засвідчили стабілізацію проковзування стержнів в бетоні на 5 – 6 циклах [6, 7, 8].

**Дослідні зразки та методика їх випробовування.** Як і в роботі [8], основні дослідні зразки виготовляли у вигляді бетонних призм квадратного перерізу, сторони якого дорівнювали 15 см, а висота - запланованій довжині анкерування. Арматурні стержні розташовували в призмах таким чином, щоб їхні поздовжні осі співпадали, а виступаючі з призм частини стержнів дозволяли з одного боку закріплювати в захватах гідравлічного преса, а з другого (вільного) кінця стержнів – вимірювати їхні переміщення відносно торця призм. Всі параметри зразків приймалися відповідно до матриці плану експерименту. В кожній точці плану виготовляли по три зразки – близнюки, а на основному рівні – шість зразків. Крім цього виготовляли бетонні зразки у вигляді стандартних кубів і призм для визначення міцнісних властивостей бетону. За планом експерименту виготовлено і випробувано 42 зразки.

Дослідження зчеплення арматури з бетоном здійснювали шляхом витягування стержнів із бетонних призм з використанням спеціального реверсного пристрою в розривній гідравлічній машині УИМ–50. Витягування стержнів виконували ступенями, рівними  $\Delta F = (0,5 - 1,0)$  кН. Під час навантаження вимірювали проковзування вільного кінця стержня відносно торця призми індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм. Докладно методика випробування зразків наведена в роботах [6, 7, 8].

Відносний рівень повторних навантажень прийнято в межах  $\eta = F_{cyc} / F_u = 0,60 - 0,65$ , де  $F_u$  – руйнуюче навантаження витягування, визначене на зразках-близнюках при одноразовому навантаженні;  $F_{cyc}$  – величина повторних навантажень. Після прикладання запланованої кількості малоциклового витягання зразки довантажувалися до руйнування.

За граничний стан зчеплення арматури з бетоном приймали зусилля в стержні  $F_u$ , коли зміщення його вільного кінця відносно торця призми складало  $\delta_u = 0,1$  мм або відбувалося розколювання призми при  $\delta < 0,1$  мм.

**Математична модель зчеплення арматури з бетоном.** Повне квадратичне рівняння регресії для описання максимальних дотичних напружень можна записати у вигляді [9]

$$\tau_u = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

де  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – вільний член рівняння та коефіцієнти лінійних, квадратичних факторів та факторів взаємодії.

Використовуючи методикау [9], за результатами експериментальних досліджень (див. табл. 2) визначені всі коефіцієнти рівняння регресії (1) та за критерієм Стьюдента визначена значимість кожного із них. Як результат, значимими коефіцієнтами виявилися  $b_0 = 7,35; b_2 = 0,61; b_3 = 0,74; b_{11} = -0,15; b_{22} = 0,48$  та  $b_{33} = 0,40$ . Враховуючи значення коефіцієнтів, рівняння регресії (1) набуває вигляду

$$\tau_u = 7,35 + 0,61x_2 + 0,74x_3 - 0,15x_1^2 + 0,48x_2^2 + 0,40x_3^2. \quad (2)$$

Рівняння (2) адекватно описує отримані експериментальні дані. Це підтверджується  $F$ -критерієм Фішера. Розрахункове значення  $F_p$  складає 2,61, а табличне значення за довірчої ймовірності –  $F_m = 5,14$ , тобто,  $F_p < F_m$ . Крім цього, середнє відношення теоретичних значень напружень зчеплення  $\tau_{u,theor}$  до експериментальних  $\tau_{u,exp}$  складає  $\tau_{u,theor} / \tau_{u,exp} = 1,024$  за середнього квадратичного відхилення  $\sigma = 0,092$  та коефіцієнта мінливості  $v = 8,94$  %. Ці статистики підтверджують задовільну збіжність теоретичних значень граничних напружень зчеплення, визначених за формулою (2) з експериментальними даними.

**Вплив повторного витягання на граничні напруження зчеплення.** Аналіз рівняння регресії показує, що при факторі кількості циклів повторного витягання заданого рівня ( $x_3$ ) два значущих коефіцієнта, що свідчить про вплив цього фактору на напруження зчеплення арматури з бетоном. За формулою (2) побудовані номограми, в яких за фіксованих значеннях діаметра арматури та довжини її анкерення показано вплив повторних навантажень на граничні напруження зчеплення  $\tau_u$ .

З номограм випливає, що граничні напруження зчеплення  $\tau_u$  в певній мірі залежать від діаметра, довжини анкерення (заробки) стержнів в бетоні та кількості циклів повторного витягання. Незалежно від діаметра при одноразовому витяганні і довжині анкерення стержнів  $l_b = 5d$  і  $7,5d$  значення зчеплення  $\tau_u$  практично однакові (в межах 6,73 – 7,01 МПа), а при  $l_b = 10d$  – в межах 7,95 – 8,01 МПа. Після шестикратного навантаження до умовного експлуатаційного рівня (60 – 65 % від руйнівного навантаження) в усіх зразках спостерігається збільшення граничних напружень зчеплення при довантаженні до руйнування порівняно зі зразками при одноразовому навантаженні, яке знаходиться в межах 4 – 5 %. Після дії 11 циклів витягання стержнів таке збільшення досягає майже 20 %.

Згідно з [10] за характером руйнування зчеплення з бетоном типи арматурних профілів можна умовно розділити на жорсткі і м'які. Стержні з

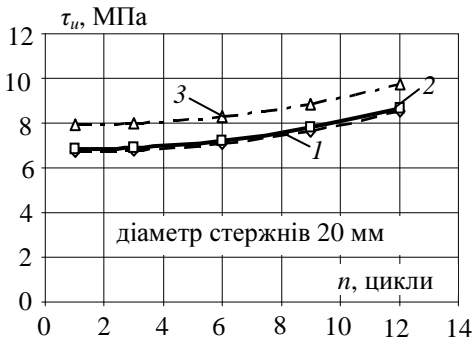
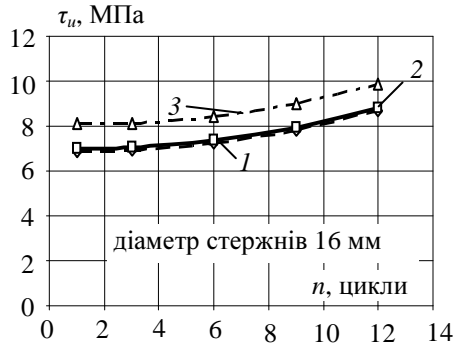
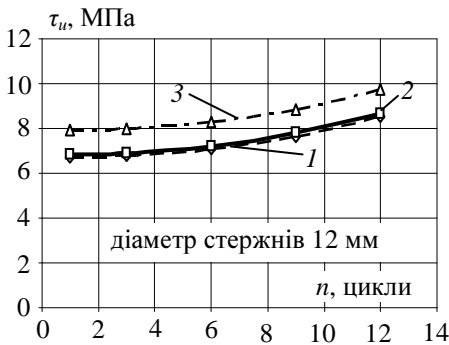


Рис. 1. Номограми впливу повторного витягання на граничні напруження зчеплення арматури з бетоном: 1 – довжина анкерення стержнів  $5d$ ; 2 – те саме,  $7,5d$ , 3 – те саме,  $10d$ .

жорстким профілем проковзують внаслідок крихкого руйнування бетонних виступів, а з м'яким профілем – стержень проковзує в бетоні плавно внаслідок поступового змінання бетонних виступів, утворення поперечних тріщин та відшарування бетону від арматури. Доведено, що бетонні шпонки, утворені серпоподібним профілем арматури, при класах бетону В15 – В40 руйнуються від змінання. Можна передбачити, що під дією повторного витягання стержнів навантаженням експлуатаційного рівня відбувається ущільнення бетону, яке при подальшому одноразовому навантаженні до руйнування призводить до збільшення граничних напружень зчеплення.

Малоциклове витягання призводить до збільшення повного проковзування стержнів в бетоні. Наприклад, в зразках зі стержнями діаметром 12 мм і довжиною анкерення 90 мм на першому циклі навантаження (рівень 62 %) проковзування складо 0,017 мм, а на третьому, шостому і десятому циклах відповідно 0,021; 0,022 і 0,024 мм при цьому залишкові проковзування після першого, шостого і десятого циклів відповідно склали 0,006; 0,009 і 0,012 мм. Треба зазначити, що короточасні проковзування на циклах зменшувалися, від 0,017 на першому циклі до 0,012 мм - на десятому. Це також свідчить про ущільнення бетону під ребрами стержнів і збільшення його опору змінанню. Безпосередньо перед руйнуванням при  $F = 24$  кН середнє проковзування

стержнів в бетоні склало 0,054, а безпосередньо перед руйнуванням при  $F = 25 \text{ кН} - 0,202 \text{ мм}$  ( $F_u = 24,4 \text{ кН}$ ).

**Висновки.** 1. Використовуючи результати математично планованого експерименту отримана математична модель для визначення впливу мало циклового витягання на граничні напруження зчеплення арматури з бетоном.

2. Малоциклове витягання стержнів з бетону, рівень якого не перевищує 65 % від руйнівного, збільшує значення граничних напружень зчеплення після 6 циклів до 5 %, після 11 циклів – до 20 %.

3. Малоциклове витягання стержнів з бетону збільшує повне їхнє проковзування до 40 % та зменшує короточасні проковзування на циклах, що свідчить про ущільнення бетону під виступами профілю стержнів.

1. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа /В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Харьков: Золотые страницы, 2008. - 336 с. 2. Худик Ю.Т. Производство и применение арматурного проката класса А500С / Ю.Т. Худик, Е.М. Рыбалка, А.В. Кекух, Н.П. Жильцов, Ю.А. Климов // Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ: НДІБК, 2003, - Випуск 59. – Книга 1. – С. 22 – 25. 3. Бабич Є.М. Зчеплення арматури класу А500С з бетоном різної міцності / Є.М. Бабич, О.С. Чапюк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць.- Львів: Каменяр, 2009.- Випуск 8.- С. 132 – 139. 4. Бабич Є.М. Визначення напружень зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю / Є.М. Бабич, О.С. Бабіч, О.С. Чапюк // Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ: ДП НДІБК, 2011.– Випуск 74.– Книга 1.– С. 285 – 292. 5. Солдатченко О.С. Експериментальні дослідження зчеплення композитної неметалевої арматури з бетоном / О.С. Солдатченко, Ю.А. Клімов, Д.А. Орешкін // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – Випуск 662. – С. 237 – 241.
6. Бабич Є.М. Дослідження мало циклової втомленості зчеплення з бетоном з арматурою серповидного профілю / Є.М. Бабич, О.С. Чапюк // Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2008. – Випуск 17. – С. 105 – 113. 7. Бабич Є.М. Дослідження зчеплення арматурного прокату серповидного профілю з бетоном при одноразовому і повторному витяганні / Є.М. Бабич, Б.А. Вавринюк, О.С. Чапюк // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2009. – Випуск 35. – С. 18 – 24. 8. Бабич Є.М. Математична модель напруження зчеплення арматури з бетоном // Є.М. Бабич, О.С. Поляновська / Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. – Випуск 47. – Частина 1. – С. 28 – 33. 9. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 174 с. 10. Семченков А.С. Особенности сцепления с бетоном стержневой арматуры различных профилей / А.С. Семенченков, В.З. Мешков, А.А. Квасников, А.Э. Белоусов, Е.С. Савохин // БСТ «Експертиза». – Москва, 2008. - № 8. – С. 58 – 62.