

УДК 624.012.35:620.173/174

Кочкар'ов Д. В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ПРО СЕРЕДНІ НАПРУГИ ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ

Встановлено лінійну залежність між середніми напругами зчеплення та нормальними напругами при висмикуванні арматури з бетону. Наведені залежності підтверджені експериментальними даними.

Ключові слова: середні напруги зчеплення, арматура, індекс Рема.

Питання пов'язані із зчепленням арматури с бетоном є одними із головних в теорії залізобетону, оскільки вони на пряму пов'язані як з розрахунком залізобетонних елементів, так і з їх конструюванням. Так, питання зчеплення на пряму пов'язані з питаннями деформативності залізобетонних елементів за різних видів напружено-деформованих станів, а також визначення довжини анкерування стержнів. Актуальність даного питання підтверджують чисельні експериментальні та теоретичні дослідження арматури різного профілю [8, 5].

Питаннями пов'язаними із зчепленням арматури з бетоном займалося чимало вчених. На сьогодні встановлена ціла низка законів, залежностей та гіпотез зчеплення арматури з бетоном [4], при цьому різняться не тільки функції описання, а й їх загальна форма. Це свідчить про вплив великої кількості факторів на закон зчеплення, а тому в більшості випадків розглядають середні напруги зчеплення. Середні напруги зчеплення визначаються за виразом

$$\tau_m = \frac{f_{yd} \times A_s}{l_s \times u_s}, \quad (1)$$

де f_{yd} – розрахунковий опір арматури, A_s , u_s – площа та периметр арматури, l_s – довжина стержня в бетоні.

Вони дають середнє значення напруг зчеплення на одиницю довжини за руйнуючого навантаження для стержнів заданої довжини. Дані напруги встановлюють експериментальним шляхом, при руйнуючому навантаженні за певних умов, використовуючи вище наведений вираз. А тому дані напруги зчеплення τ_m далі будемо називати максимальні середні напруги зчеплення.

Для теорії та практики розрахунку залізобетонних елементів сутте-

ве значення мають не тільки максимальні середні напруги зчеплення τ_m , а й напруги зчеплення в експлуатаційних стадіях. Переважна більшість дослідників [4, 5, 7] пропонує для встановлення напруг зчеплення на проміжних стадіях розглядати складні формули, які ґрунтуються на певних фізичних законах, залежно від зміщення $g(x,t)$. При цьому необхідно експериментальним шляхом встановлювати залежність $g(0)=f(\sigma_{(0)})$, що призводить до певних неточностей та не зручностей в розрахунках, а тому пропонується розглянути зміну середніх напруг на проміжних стадіях

Розглянемо зміну середніх напруг зчеплення на проміжних стадіях. Для цього розглянемо роботу арматури при витягуванні її з призми (рис. 1). При незначних навантаженнях зона розподілу напруг зчеплення складає певну частину довжини стержня l_1 , напруги в арматурі близькі до трикутної, деформації бетону та арматури однакові, проковзування арматури відсутнє. Подальше збільшення навантаження призводить до видовження зони розподілу напруг зчеплення l_i , напруги в арматурі починають дещо викривлятися, деформації арматури та бетону на даній стадії також лишаються однаковими.

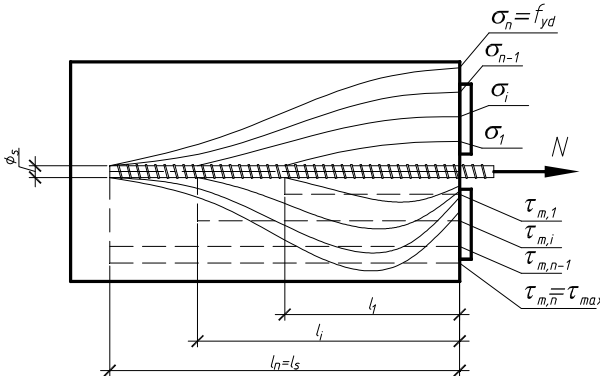


Рис. 1. Напружено-деформовані стани арматури та бетону впродовж висмикування арматури з бетонної призми

Подальші стадії залежать від довжини стержня в бетоні. Для довгих стержнів збільшення довжини розподілу напруг буде продовжуватись практично до руйнування. Для відносно коротких стержнів за певного рівня навантаження подальше збільшення довжини розподілу напруг l_i , стане не можливим. Зона передачі зусиль стане постійною та рівною l_s . Таким чином, формулу для обчислення середніх напруг зчеплення впродовж всього завантаження можна подати у такому вигляді

$$\tau_{m,i} = \begin{cases} \frac{\sigma_i \times \varnothing_s}{4 \times l_i}, \text{ при } l_i \leq l_s; \\ \frac{\sigma_i \times \varnothing_s}{4 \times l_s}, \text{ при } l_i = l_s. \end{cases} \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що при $l_i=l_s$, залежність між середніми напругами зчеплення $\tau_{m,i}$ та крайовими напругами в арматурі змінюється лінійно. Характер деформування при першій умові (2) також слід очікувати лінійним, з огляду на вищеописаний процес розвитку нормальних напруг при висмикуванні арматури з бетону. Таким чином, отримуємо дві лінійні залежності середніх напруг зчеплення арматури залежно від крайових напруг при її висмикуванні з бетонного елемента (рис. 2).

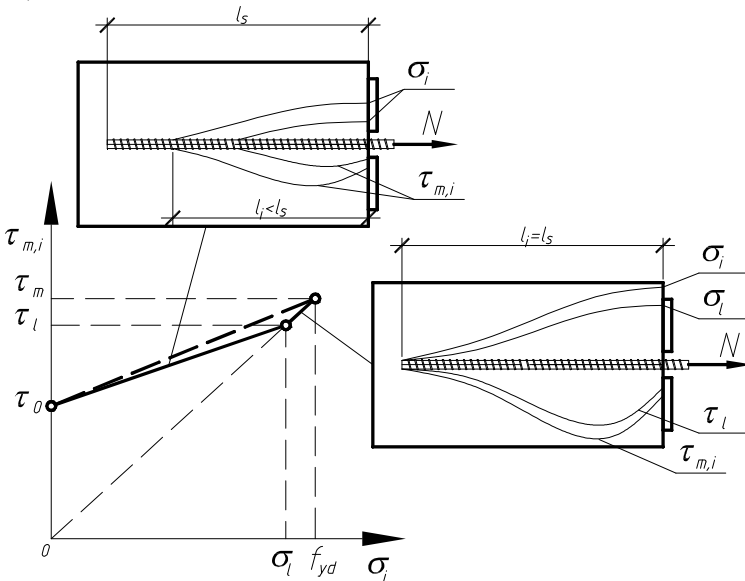


Рис. 2. Гіпотеза лінійної зміни середніх напруг зчеплення в залежності від крайових напруг в арматурі при її висмикуванні з бетонного елемента

Досягнення напруг в арматурі σ_l вказує на включення в роботу повної довжини стержня. Даним напругам відповідають середні дотичні напруги зчеплення – τ_l . Після досягнення даних напруг, на висмикування працює повна довжина стержня. Таким чином, в загальному випадку залежності середніх напруг зчеплення можна представити таким

виразом:

$$\tau_{m,i} = \begin{cases} a_1 \sigma_i + b_1, \text{ при } l_i \leq l_s; \\ a_2 \sigma_i, \text{ при } l_i = l_s. \end{cases} \quad (3)$$

Для отримання коефіцієнтів рівняння (3) необхідно визначити мінімум три точки: $(\sigma_i=0, \tau_i=\tau_0)$, $(\sigma_i=\sigma_l, \tau_i=\tau_l)$, $(\sigma_i=f_{yd}, \tau_i=\tau_m)$. Дані точки можна отримати експериментальним шляхом при висмикуванні арматурного стержня. Найбільша складність полягає в отриманні середньої точки з координатами $(\sigma_i=\sigma_l, \tau_i=\tau_l)$, оскільки для цього доведеться будувати графіки нормальних напруг по всій довжині стержня. З огляду на те, що параметри зчеплення залежать від багатьох факторів – силових, конструктивних та технологічних, напруги в арматурі визначені експериментальним шляхом будуть містити певні похибки. А тому вираз (3) було б не зайвим дещо спростити. Для цього скористаємось експериментальними даними висмикування арматурного стержня з бетонного елемента [1, 2, 3, 4, 6].

Побудовані графіки залежності середніх напруг від крайових напруг висмикування стержня, та апроксимація їх прямими лініями показана на рис. 3. Були оброблені експериментальні дані стержнів періодичного та гладкого профілю (див. табл. 1). Значення коефіцієнтів кореляції для оброблених експериментальних даних знаходиться в межах $r_{xy}=0,989 \div 0,998$, помилка коефіцієнта кореляції $m_r=\pm 0,989 \div \pm 0,998$, $r_{xy}/m_r=121,4 \div 916,3 > 4$. Таким чином, підтверджено лінійний зв'язок між середніми дотичними напругами та крайовими напругами при висмикуванні стержня не залежно від характеристик профілю стержня.

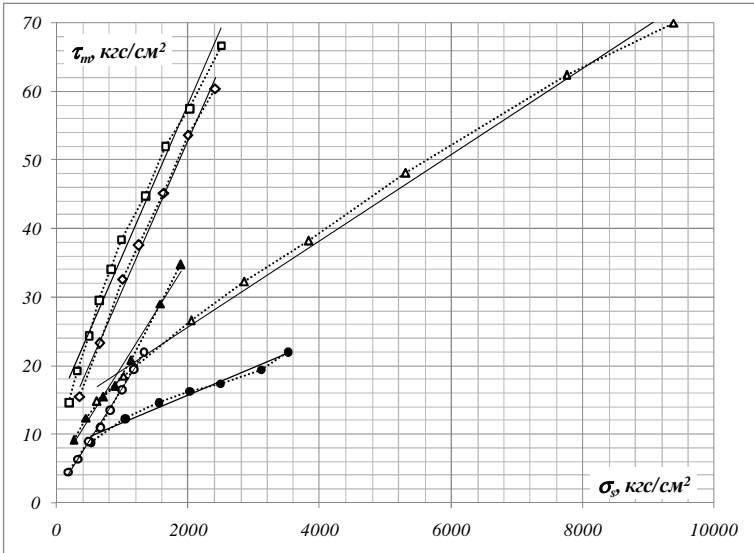


Рис. 3. Експериментальне підтвердження лінійної залежності середніх напруг зчеплення в залежності від крайових напруг в арматурі:

-◇..... досліді Т. Гарай [6], $r_{xy}=0,997$;
-▲..... досліді К. Bernander [2], $r_{xy}=0,997$;
-□.....досліді Е. Amstutz [1], $r_{xy}=0,993$;
-○..... досліді Е. Amstutz (арматура Tor) [1], $r_{xy}=0,998$;
-●..... досліді К. Bernander (гладка арматура) [2], $r_{xy}=0,989$;
-▲..... досліді А. Vichara (гладка арматура) [3], $r_{xy}=0,995$;
- апроксимація прямими лініями

З огляду на це залежність (3) подамо у вигляді

$$\tau_{m,i} = a\sigma_i + b. \quad (4)$$

Для отримання коефіцієнтів рівняння (4) необхідно задати граничні умови. Прийемо такі граничні умови:

$$\tau_{m,i} = \tau_m \rightarrow \sigma_i = f_{yd}; \quad (5)$$

$$\tau_{m,i} = \tau_0 \rightarrow \sigma_i = 0. \quad (6)$$

Таблиця 1

Статистичні характеристики експериментальних даних висмикування
стержнів з бетонних елементів різних авторів

№ з/п	Автор дослідів	Тип профілю арматури	Діаметр та довжина стержня, \varnothing_s / L , мм	Коефіцієнт кореляції r_{xy}	Помилка коефіцієнта кореляції m_r	r_{xy}/m_r
1	2	3	4	5	6	7
1	Т.Гапарі [6]	періодичний	30	0,997	0,0021	478,7
			300			
2	К. Bernander [2]	періодичний	16	0,997	0,0020	508,3
			600			
3	Е. Amstutz [1]	періодичний	30	0,993	0,0047	211,7
			300			
4	Е. Amstutz [1]	періодичний Тор	30	0,998	0,0011	916,3
			450			
5	К. Bernander [2]	гладка	15	0,989	0,0081	121,4
			600			
6	А. Bichara [3]	гладка	39	0,995	0,0041	244,8
			300			

Максимальні середні напруги зчеплення визначимо за відомим виразом

$$\tau_m = \eta_1 \eta_2 f_{ctm}, \quad (7)$$

де η_1 – коефіцієнт, який враховує вид поверхні арматури, η_2 – коефіцієнт, який враховує вплив діаметру арматури. Коефіцієнт η_1 у виразі (7), враховуючи пропозиції вчених [8], пропонується визначати в залежності від індексу зчеплення, коли він знаходиться у межах $0,056 \leq f_R \leq 0,12$ за виразом:

$$\eta_1 = 5 + 20 \times f_R; \text{ – середнє значення}; \quad (8)$$

$$\eta_1 = 2,65 + 20 \times f_R; \text{ – при довірчому інтервалі } 2S; \quad (9)$$

$$\eta_1 = 1,5 + 20 \times f_R \text{ – при довірчому інтервалі } 3S. \quad (10)$$

Мінімальні середні напруги зчеплення τ_0 повинні визначатися за незначних нормальних напруг в арматурі, при рівності деформацій бетону та арматури $\varepsilon_s = \varepsilon_c$. За таких малих рівнів навантаження тип арматури не повинен на них впливати – лише клас бетону. Таким чином, мінімальні середні напруги визначимо за виразом

$$\tau_0 = \alpha_0 f_{ctm}, \quad (11)$$

де α_0 – коефіцієнт, який залежить від класу бетону.

Справедливість формули (11) підтверджена експериментальними даними. Середнє значення коефіцієнту α_0 не залежно від класу арматури та бетону, за наведеними експериментальними даними (табл. 2), складає $0,412 \approx 0,4$.

Таблиця 2

До визначення коефіцієнта α_0

№ з/п	Автор дослідів, тип профілю арматури	Експериментальне значення коефіцієнтів виразу (4), $a/b[\text{кгс}/\text{см}^2]$	Стандартне відхилення, %	Середнє значення відхилень, %	Експериментальне значення α_0
1	2	3	4	5	6
1	Т.Гагаї [6], періодичного	0,0219	3,30	4,89	0,435
		7,48			
2	К. Bernander [2], періодичного	0,0062	3,18	4,76	0,407
		11,99			
3	Е.Амштутц [1]	0,0225	6,03	9,11	0,453
		10,42			
4	Е.Амштутц [1], Тор	0,0152	3,10	-3,65	0,294
		2,00			
5	К.Бернадер [2], гладка	0,0037	2,31	-2,50	0,432
		8,88			
6	А. Вічара [3], гладка	0,0152	4,52	-7,66	0,450
		6,09			
				$\alpha_{0\text{ср}} =$	0,412 \approx 0,4
				$\sigma, \% =$	6,01

Отже, середні дотичні напруги з урахуванням індексу зчеплення необхідно визначати за виразом

$$\tau_{m,i} = f_{ctm} \left(\frac{\eta_1 \eta_2 - \alpha_0}{f_{yd}} \sigma_i + \alpha_0 \right). \quad (12)$$

Отримана залежність (12) справедлива впродовж всієї роботи стержня при висмикуванні, його з бетону для різних профілів арматури. Це в подальшому дасть змогу враховувати зчеплення арматури з бетоном при розрахунках залізобетонних елементів за різних напружено-деформованих станів на основі нелінійної деформаційної моделі. Варто зазначити, що на напруги зчеплення значною мірою, також впливає

захисний шар бетону, особливо у випадках, коли він менше діаметра арматури. Тому для отримання прийняттого результату, вираз (12) необхідно застосовувати до елементів, в яких дотримані конструктивні вимоги по їх армуванню.

Остаточо можна сформулювати наступне:

1. Встановлено лінійну залежність середніх напруг зчеплення від крайових напруг висмикування стержня, на всіх стадіях роботи арматури при висмикуванні її з бетону;
2. Експериментальна перевірка отриманих залежностей, на дослідах багатьох дослідників, показала задовільну збіжність.

1. Amstutz E. Uber das Zumtmtnwirken von Bewehrung und Beton in Stahlbetonbauwerken. – Bauingenieur. – Heft 10, 1955 – 140 p. 2. Bernander K. G. An investigation of bond by means of strain measurements in hightensile bars, embedded in long cylindrical pullout specimens. – Rilem, 1957.– November, Vol. 23. – № 3. – 15-46 p. 3. Bichara A. Etude du probleme de l'adherence dans le beton arme. – Cahier, 1951 – Vol. I. – 117 p. 4. Астрова Т. И. Об оценке прочноти сцепления стержневой арматуры с бетоном // Трещиностойкость и деформативность обычных и предварительнапряженных железобетонных конструкций / [под ред. А. А. Гвоздева]. – М. : Стройиздат, 1965. – С. 223– 271. 5. Бабич Є. М. Визначення напружень зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю / Є. М. Бабич, О. Є. Бабіч, О. С. Чапук // Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ : ДП НДІБК, 2011. – Випуск 74. – Книга 1. – С. 285–292.
6. Гараи Т. Методика чисельного моделювання нелінійного деформування та руйнування просторових залізобетонних конструкцій// Строительные конструкции//Межвед.н. – т. сб., вып. 59. – Киев : НИИСК, 2003. – С. 157–162. 7. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетонос / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с. 8. Цыба О. О. Трещиностойкость и деформативность растянутого железобетона с ненапрягаемой и напрягаемой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер : автореф. дис. к-та техн. наук / Цыба О. О. – Москва, 2011. – 25 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Ткачук О. А. (НУВГП)

Kochkarev D. V., Candidate of Engineering, Associate Professor
(National University of Water Management and Nature Resources Use,
Rivne)

ABOUT AVERAGE TENSION OF REINFORCEMENT COUPLING WITH CONCRETE

It is established linear dependence between the average tension of coupling and normal tension at reinforcement wrest from concrete. The given dependences are confirmed with experimental data.

Keywords: average tension of coupling, reinforcement, Ram's index.

Кочкарёв Д. В., к.т.н., доц. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

О СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Установлено линейную зависимость между средними напряжениями сцепления и нормальными напряжениями при выдергивании арматуры из бетона. Приведенные зависимости подтверждены экспериментальными данными.

Ключевые слова: средние напряжения сцепления, арматура, индекс Рэма.
