

Верба В.Б., аспірант¹ (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

АНКЕРУВАННЯ СТЕРЖНЕВОЇ АРМАТУРИ В ПІНОБЕТОНІ ЗЧЕПЛЕННЯМ ТА ПЛАСТИНКОВИМ АНКЕРОМ

У статті наведені результати експериментальних досліджень явища зчеплення арматури гладкого та періодичного профілю з пінобетонном та оцінки його міцності. Зазначено, що анкерування має бути покращене за рахунок використання пластинкового анкера. Пропонується методика його розрахунку.

The presented article is devoted to the results of experimental researches of the smooth and ribbed reinforcing bar and foam concrete bonding phenomenon and the estimation of its durability. It is mentioned that the anchoring have to be improved through the use of plate anchor. An author sets a method of its design.

Стан питання та формулювання проблеми. В Україні в 2009 році з ніздрюватих бетонів було вироблено виробів і конструкцій загальним об'ємом 802,8 тис. куб. м. Українські виробники газо- і пінобетону в січнілютому 2010 року збільшили їх виробництво на 10,4% в порівнянні з аналогічним періодом 2009 року – до 57,5 тис. куб. м.

Як і у випадку важкого бетону, для повноцінного використання пінобетону в якості конструкційного матеріалу необхідно вирішувати проблему сприйняття ним зусиль розтягу. Традиційно ця задача вирішується армуванням конструктивних елементів стержневою арматурою. Передача напружень на арматуру здійснюється за рахунок її анкерування, під яким розуміють закріплення стержнів від переміщень у тілі пінобетону будь-яким способом, що, як правило, забезпечується 1) склеюванням сталі з цементним каменем пористої матриці пінобетону, 2) механічним зачепленням за пінобетон нерівностей на поверхні стержня, 3) тертям. Традиційно ці три явища об'єднують під одним терміном «зчеплення». Коли самого зчеплення не достатньо, застосовують різноманітні анкерні пристрої. Питання анкерування арматури в пінобетоні вивчено слабо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед наукових праць, присвячених питанню зчеплення ніздрюватих бетонів та арматури, варто відзначити роботу Е.Н. Добриніна і В.В. Макаричева [1], способи анкерування арматури в газобетоні розглянуті В.П. Трамбовецьким та К.М. Мілейковською [2]. Окрім того, робота ніздрюватих бетонів при місцевому стиску докладно вивчена в дисертації Ю.В. Свідзінського [3].

¹ Робота виконана під керівництвом проф., д.т.н. Демчини Б.Г.

Враховуючи стабільне зростання випуску пінобетону в Україні, на кафедрі будівельних конструкцій та мостів НУ «Львівська політехніка» були започатковані нові всесторонні дослідження пінобетону. З проміжними результатами досліджень зчеплення арматури з пінобетоном можна ознайомитись на сторінках наукових видань [4, 5].

Мета та задачі роботи. Проектом ДБН В.2.6-98:2009 та європейським стандартом EN 1992-1-1:2004 розрахунок анкерування не нормовано. З огляду на те, що питання анкерування арматури у пінобетонних конструкціях залишається відкритим, вважаємо за необхідне висвітлення цієї проблеми. Взявши до уваги напрацювання попередників та свої власні, пропонуємо вирішити питання розробки інженерної методики розрахунку анкерування арматурного стержня в масиві пінобетону, яка б враховувала явище зчеплення та пропонувала підбір пластинчастого анкера необхідних розмірів при недостатньому зчепленні.

Результати досліджень зчеплення. У конструкціях раціонально використовувати пінобетон з маркою по середній густині не менше D500 і класом по міцності на стиск не менше B0,75. Враховуючи ці міркування в наших дослідженнях ми зупинилися на пінобетоні з марками по густині в діапазоні D600–D1000. Для виконання поставленої задачі автором було приготовано до випробувань 6 серій дослідних зразків. До матеріалів статті ввійшли результати 136 випробувань зчеплення за методикою висмикування, в яких довжина зони анкерування варіювалася в межах 80-600 мм, арматура використовувалася гладкого і періодичного профілю.

У основу інженерної методики розрахунку міцності зчеплення покладемо формулу [5], що пов'язує усереднені напруження зчеплення із зусиллями, прикладеними до стержня, F та поверхнею контакту $l_{bp}\pi d$, де d – номінальний діаметр стержня:

$$\bar{\tau}_F = F / l_{bp}\pi d . \quad (1)$$

Оперуючи результатами проведених експериментальних досліджень та визначеними міцнісними характеристиками пінобетону, подаємо відомості про міцність зчеплення арматури з пінобетоном у відносних одиницях вимірювання, що приводяться в частках від нормованих міцнісних характеристик пінобетону та арматурної сталі відповідно.

Як і в попередній публікації [4], пропонується оцінювати величину зчеплення за допомогою двох коефіцієнтів: v_b , що дорівнює відношенню усереднених напружень зчеплення, які виникають на поверхні контакту арматури з пінобетоном в момент руйнування зчеплення, до середньої кубикової міцності пінобетону ($v_b = \bar{\tau}_F : f_{cm,cube}$) та v_s , що дорівнює відношенню напружень в арматурі σ_s при максимальному висмикуючому навантаженні F_u до міцності арматури на границі текучості f_{yd} ($v_s = \sigma_s : f_{yd}$). Ці коефіцієнти згруповані у таблиці.

Силові характеристики зчеплення арматури з пінобетоном

Значення коефіцієнтів при довжині анкерування:		Пінобетон класу											
		≤ В 0,75			В 1	В 1 - В 1,5			В 2				
		Клас і діаметр арматури											
		Вр-I		А500 (А-III)			Вр-I		А500 (А-III)		Вр-I		А500 (А-III)
		Ø 3	Ø 8	Ø 10	Ø 3	Ø 8	Ø 10	Ø 3	Ø 8	Ø 10	Ø 3	Ø 8	Ø 10
100 мм	$f_{cm,cube}$	0,673	0,850	0,820	1,266	1,489	1,272	2,145	2,256	2,057			
	$\bar{\tau}_F$	0,272	0,170	0,232	0,465	0,827	0,479	0,474	0,938	0,534			
	ν_b	0,404	0,200	0,283	0,367	0,555	0,377	0,221	0,416	0,260			
	ν_s	0,073	0,022	0,019	0,124	0,083	0,038	0,126	0,094	0,043			
200 мм	$f_{cm,cube}$	0,673	-	-	1,266	1,489	1,313	2,145	2,256	2,057			
	$\bar{\tau}_F$	0,257	-	-	0,273	0,624	0,409	0,369	1,063	0,597			
	ν_b	0,382	-	-	0,216	0,419	0,312	0,172	0,471	0,290			
	ν_s	0,137	-	-	0,146	0,125	0,065	0,197	0,213	0,096			
300 мм	$f_{cm,cube}$	0,750	-	-	1,266	1,461	1,303	2,145	2,256	2,057			
	$\bar{\tau}_F$	0,211	-	-	0,218	0,419	0,336	0,405	0,859	0,378			
	ν_b	0,281	-	-	0,172	0,287	0,258	0,189	0,381	0,184			
	ν_s	0,169	-	-	0,174	0,126	0,081	0,324	0,258	0,091			
400 мм	$f_{cm,cube}$	0,673	-	0,684	-	1,266	1,262	2,145	2,256	2,057			
	$\bar{\tau}_F$	0,210	-	0,187	-	0,245	0,289	0,413	0,778	0,444			
	ν_b	0,312	-	0,273	-	0,194	0,229	0,192	0,345	0,216			
	ν_s	0,224	-	0,060	-	0,098	0,092	0,440	0,311	0,142			
500 мм	$f_{cm,cube}$	-	-	-	-	1,266	1,266	-	2,256	2,057			
	$\bar{\tau}_F$	-	-	-	-	0,253	0,244	-	0,671	0,349			
	ν_b	-	-	-	-	0,200	0,193	-	0,297	0,170			
	ν_s	-	-	-	-	0,127	0,098	-	0,336	0,140			
600 мм	$f_{cm,cube}$	-	-	-	-	1,266	1,266	-	2,256	2,057			
	$\bar{\tau}_F$	-	-	-	-	0,261	0,250	-	0,658	0,259			
	ν_b	-	-	-	-	0,206	0,197	-	0,292	0,126			
	ν_s	-	-	-	-	0,157	0,120	-	0,395	0,124			

За розрахункові значення міцності арматури на границі текучості взято 500 МПа для арматури А500 і дроту Вр-І та 390 МПа для арматури А-ІІІ.

Дослідженнями встановлено також, що мінімальна товщина захисного шару, яка була прийнята на рівні 32—34 мм (що суттєво більше рекомендованих 25 мм згідно з діючими нормами), при використанні пінобетону є недостатньою для сприйняття поперечного тиску, що спричиняло розколювання ряду зразків довжиною 500—600 мм вздовж арматурних стержнів.

Британським стандартом BS 4449:1997 за критерій граничного стану зчеплення прийняті зміщення на рівні 0,2 мм. З усіх досліджених зразків лише у 8,6 % з них руйнування зчеплення арматури з пінобетonom настало після досягнення зміщеннями цієї величини, однак застосування нової методики випробувань дозволило отримати дані про роботу зони зчеплення на стадії руйнування, а також визначити величину сил тертя арматурного стержня по стінках каналу, що виникають під час ковзання стержня при дослідженій величині проковзування до 1 см. В середньому при зміщеннях на рівні 0,2 мм сили тертя складають 0,86 від руйнівних для арматури Ø 3 Вр-І; 0,91 і 0,85 для арматури Ø 8 та Ø 10 А500 (прийmemo ці величини за значення коефіцієнта α_a , про який сказано нижче). Відзначимо, що за ДБН В.2.6-98:2009, який вступить в дію 01.06. 2011 р., гранично допустима ширина розкриття тріщин для конструкцій з арматурою з підвищеною чутливістю до корозії (вважаемо, що найбільш доцільним для пінобетону є використання дротяної арматури) також не повинна перевищувати 0,2 мм.

Аналізуючи дані таблиці, приходимо до висновку, що кращим зчепленням у відносних одиницях характеризуються стержні меншого діаметру при вищій міцності самого пінобетону. Однак, у жодному з випробувань не вдалося вичерпати ресурс міцності арматури.

Гладка арматура за рахунок зчеплення максимально заанкерюється на 44% свого розрахункового опору при довжині зони зчеплення 400 мм та пінобетоні класу В2. Арматура періодичного профілю при заанкерюванні зчепленням максимально використовується на 39,5% у випадку використання стержнів Ø 8 мм А500 при довжині зони зчеплення 600 мм та пінобетоні того ж класу по міцності. Отже, не виключений випадок, коли необхідну міцність анкерування не вдасться забезпечити лише за рахунок зчеплення. Тому виникає необхідність застосовувати анкерні пристрої.

Теорія роботи пластинкового анкера. В якості анкерів можуть бути використані металеві пластини невеликих розмірів, приварені в тавр на торці арматурного стержня ($A_{loc1} < 100 \text{ см}^2$). Як свідчать дослідження [3] осідання при навантаженні таких пластин за рахунок зминання пінобетону може скласти 5-10 мм. За таких умов осідання пластини слід нормувати, а величину осідання треба розрахувати.

Для розрахунку осідання від навантаження використовують методики, поширені в практиці визначення осадок фундаментів. Проаналізувавши міц-

нісні та деформативні характеристики пінобетону, можна з певними наближеннями порівнювати його з піщаною основою. Використовуючи закономірності півпростору, що лінійно деформується, розглянемо метод визначення осідання пластини на однорідній основі з теоретично постійним модулем деформації. Прийняті спрощення та методика, отримана для пружного півпростору, приводять до використання наступної формули для визначення осідання:

$$s = \frac{\omega P b}{E} (1 - \mu^2), \quad (2)$$

де P – тиск, створений пластиною на пінобетон; E – модуль повної деформації; μ – коефіцієнт відносно повної поперечної деформації (для ніздрюватого бетону приймається 0,21); b – ширина пластини (для прямокутника – менший з розмірів); ω – коефіцієнт, який залежить від форми пластини та її жорсткості.

У роботі [6] в таблиці наведені значення коефіцієнтів для різноманітних форм пластини в плані. Для забезпечення анкерування найбільш практичним вважаємо використання квадратних або круглих анкерних шайб, що передають місцеві зусилля на пінобетон. Розглянемо використання жорстких анкерних пристроїв, тому наведемо значення коефіцієнту ω для двох випадків. Для жорсткого круга його значення буде дорівнювати 0,79, а для квадрата – 0,88.

У формулі (2) невідомою величиною є модуль повної деформації. На практиці найбільш достовірні значення модуля деформації отримують в результаті випробувань. Як показали дослідження Свідзінського Ю.В. [3, С. 152], модуль пружності ніздрюватого бетону практично не відрізняється від модуля деформації, визначеного експериментальним шляхом при випробуванні зразків на місцевий стиск штампами 10×10 та 5×5 см.

Поки деформації будуть пропорційні до напружень або поки пінобетон працюватиме пружно, то осідання штампа, вираховане за формулою (2) буде відповідати реальній його величині. Дослідження показали, що при втраті пінобетоном пружності осідання різко збільшується і може досягати 1 см. Така величина переміщень арматури в пінобетонних армованих конструкціях неприпустима, тому слід обмежитися величинами осідання анкерної пластини в межах пружної роботи пінобетону. Свідзінським Ю.В. була отримана наступна емпірична формула для визначення максимального осідання штампа в пружній стадії роботи:

$$s_{\max} = 1,55 \cdot b \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt[3]{E_b}, \quad (3)$$

де b – ширина штампа, см.

Визначивши величину s_{\max} , можна знайти максимальне навантаження на штамп, яке сприймає пінобетон, працюючи в пружній стадії:

$$F_{\max}^c = f_{cud, \max} \cdot A_{loc1}, \quad (4)$$

де F_{\max}^c – навантаження, при якому досягається максимальна осадка штампа;

A_{loc1} – площа зминання, а $f_{cud,max}$ – міцність бетону на зминання, визначена за формулою, що випливає з формул (2) і (3):

$$f_{cud,max} = \frac{1,55 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt[3]{E_b^4}}{(1 - \mu^2) \cdot \omega} \quad (5)$$

Отримана формула є емпіричною і отримана на основі нечисельних досліджень з достатньо широким розкидом отриманих даних лише для двох розмірів штампів з площею 25 і 100 см². Однак при підборі розмірів анкерів вважаємо її цілком прийнятною.

Методика розрахунку анкера. Коли конструкція запроєктована раціонально, дотримуючись умов рівномірності бетону та арматури, то при розрахунку залізобетонних елементів за першою групою граничних станів ми стикнемося з параметром l_{bpd} – довжиною від торця стержня, при якій арматура враховується в перерізі на 100% своєї розрахункової міцності. Маючи з попередніх розрахунків призначеним діаметр та клас арматури і клас пінобетону, інтерполяцією даних з таблиці визначаємо силові характеристики зчеплення $\bar{\tau}_F$, v_b , та v_s для довжини l_{bpd} .

Далі визначимо зусилля, яке передається на пінобетон за рахунок зчеплення арматури:

$$F_b = l_{bpd} \cdot \pi \cdot d \cdot \bar{\tau}_F \cdot \alpha_a, \quad (6)$$

де α_a – коефіцієнт, що враховує послаблення зчеплення при зміщеннях стержня на величину 0,2 мм.

Зусилля, яке сприймається анкером, визначимо за формулою:

$$F_a = A_{s,prov} \cdot f_{yd} - F_b = f_{yd} \cdot (0,25 \cdot \pi \cdot d^2 - \alpha_a \cdot v_s) \quad (7)$$

Приймаємо гранично допустиме осідання анкера на рівні $s_u = 0,2$ мм і, скориставшись формулами (2) та (7), визначаємо розрахункову ширину квадратної пластини анкера:

$$b = \frac{\omega \cdot F_a}{0,2 \cdot 10^{-3} \cdot E_b} (1 - \mu^2) \quad (8)$$

Завершує розрахунок анкера підбір товщини пластини. Вважаємо, що напруження стиску в пінобетоні під анкером є розподіленим рівномірно, а сама пластина працює на згин. За розрахункову приймемо схему, зображену на рисунку. Діаметром арматури нехтуємо, умовно виділивши трикутну консольну ділянку. Знаходимо момент, який діє на пластину:

$$M = \frac{F_a}{4} \cdot \frac{b}{3} \cdot \frac{b^2}{4} = \frac{F_a \cdot b^3}{48} \quad (9)$$

Знаходимо товщину пластини:

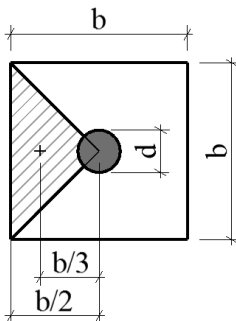


Рисунок. Розрахункова схема пластини анкера

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{6 \cdot M}{b \cdot R_y \gamma_c}} \quad (10)$$

Зазначений розрахунок дає наближені результати. Точніші значення можна отримати, використовуючи методи теорії пружності та пластичності.

Висновки. Основні результати випробувань зчеплення арматури гладкого та періодичного профілю з пінобетоном підтверджують, що з метою найповнішого використання міцнісних ресурсів арматури, доцільно використовувати арматуру найменших діаметрів. Анкерування арматури лише за рахунок зчеплення дозволяє використати її міцність лише на 44 %. Для повного використання міцності стержнів запропоновано використовувати пластинкові анкери, інженерну методику розрахунку яких запропоновано в даній статті.

1. Добрынин Е.Н. Особенности расчета и конструирования армированных изделий из ячеистого бетона малого объёмного веса. Проектирование конструкций из ячеистых бетонов. Часть 2. // Материалы к краткосрочному семинару с 22 по 24 апреля / под редакцией В.А. Пинскера. – Ленинград, 1968.
2. Трамбовецкий В.П., Милейковская К.М. Экспериментальное исследование анкеровки предварительно напряженной арматуры в ячеистом бетоне. Проектирование конструкций из ячеистых бетонов. Часть 2.// Материалы к краткосрочному семинару с 22 по 24 апреля / под редакцией В.А. Пинскера. – Ленинград, 1968.
3. Свидзинский Ю.В. Прочность и деформативность армированных элементов из ячеистого бетона при местном сжатии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – М., 1989. – 195 с.
4. Верба В.Б. Контакт пінобетону з арматурою: вивчення явища, його моделювання та стадійності роботи в зоні зчеплення [Текст] / В.Б. Верба, Б.Г. Демчина // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" № 627. Теорія і практика будівництва. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – С. 22–27.
5. DEMCHYNA Bohdan. Evaluation of reinforcement bonding in foam concrete [Текст] / Bohdan DEMCHYNA, Volodymyr VERBA // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i inżynieria środowiska. z. 53. – Rzeszów: Oficyna wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2009. – р. 39-45.
6. Березанцев В.Г. Расчет оснований и сооружений. – Л.:Стройиздат, 1970.

Рецензент: д.т.н., професор Гнідець Б.Г.