

МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ АДГЕЗІЙНОГО З'ЄДНАННЯ «БЕТОН–ПОЛІМЕР» ДЛЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ІН'ЄКТУВАННЯ

**Бабяк І.П.
Терещенко Т.А.**

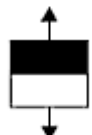
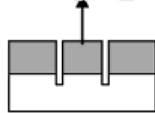



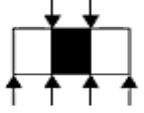

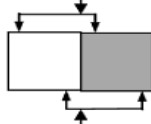

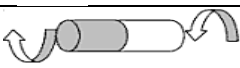
Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»

Вступ

Для ремонту мостових споруд в місцях утворення тріщин методом ін'єктування застосовують полімери на основі епоксидних смол або уретанів. Такі полімери здатні витримувати значні навантаження при різних видах деформацій, проте не менш важливою їх експлуатаційною характеристикою є адгезія до бетону. Якщо цей показник є незадовільним, при осьовому стисканні елемента з ремонтowanими тріщинами, напрямки яких відрізняються від осьових – горизонтального та вертикального, в місці ремонту розвивається скісний зсув.

В світовій практиці для випробувань з'єднання «полімерний адгезив – бетонний субстрат» застосовується низка стандартних методів, які класифікуються за видом зусиль, що виникають на межі розділу «адгезив/субстрат»: розтяг, зсув, зсув та стиск, крутіння [1]. Схеми прикладання навантаження відповідно до такої класифікації наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація методів визначення міцності адгезійного з'єднання за видами зусиль, що виникають на межі розділу «адгезив/субстрат»

Вид зусиль	Схема прикладання навантаження			
Розтяг	 Прямий відрив (схема випробування лабораторних зразків)	 Прямий відрив (виконання натурних випробувань)	 Розтяг при розколюванні	 Розтяг при згинанні
Зсув				
Зсув та стиск	 Скісний зсув при осьовому стисканні			
Крутіння				

Чинні в Україні стандарти дозволяють визначати міцність зчеплення між полімерним матеріалом і бетоном методами зсуву та прямого відриву [2-4]. ДСТУ Б В.2.7-133, ДСТУ Б В.2.7-84, ГОСТ 28574

В світовій практиці при випробуванні полімерних матеріалів для ін'єктування застосовують два з наведених в табл. 1 методів [5-8]. Стандарт [5] встановлює метод визначення межі міцності на розтяг при розколюванні. Метод застосовується для випробувань зразків-кернів, відібраних із споруд після завершення ремонтних робіт з ін'єктування в місцях проходження одиничної тріщини. Схему випробувань зображено на рис. 1. Зразок навантажують з постійною швидкістю ($1 \pm 0,3$) МПа/хв. до руйнування (розколювання).

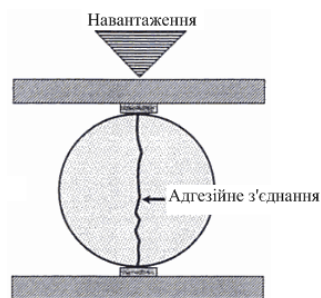


Рис. 1. Схема випробувань при визначенні межі міцності на розтяг при розколюванні згідно [5]

Межу міцності на розтяг при розколюванні обчислюють за формулою (1):

$$R = \frac{2P}{\pi l d}, \quad (1)$$

де R – межа міцності на розтяг при розколюванні, МПа;
 P – максимальне навантаження зразка при руйнуванні, кН;
 l – довжина зразка, м;
 d – діаметр зразка, м.

Метою таких випробувань є безпосереднє визначення показника міцності.

Другий метод – випробування скісно розрізаних склеєних полімерним матеріалом зразків бетону шляхом осьового стискання (англомовні терміни *slant shear strength test*, *inclined shear strength test*) – стандартизований в системах стандартів ASTM (American Society for Testing and Materials), EN (European Norm), NordTest [6-8]. В системі EN випробування за цим методом згідно [6] здійснюють з метою сертифікації полімерних матеріалів, призначених для герметизації тріщин при ремонті бетонних споруд методом ін'єктування. Вимоги до показників, визначених за цим методом, встановлює стандарт [9]. Слід зазначити, що метод не застосовується до крихких полімерних матеріалів з показником міцності на стиск, нижчим за показник бетону.

При виконанні випробувань згідно з цим методом застосовують зразки, форма та розміри яких задовольняють вимоги національних стандартів щодо методів визначення міцності бетону на стиск (згідно стандартів ASTM, EN – зразки-циліндри діаметром 76 мм висотою 152 мм), або зразки іншої форми і розмірів [8], для яких співвідношення H/D (H/a – для зразків-призм квадратного перерізу) відповідно до рис.2 знаходиться у межах від 3 до 2.

Вимоги до співвідношення лінійних розмірів зразків є загальними і не залежать від вимог до номінальних розмірів зразків в різних системах стандартів.

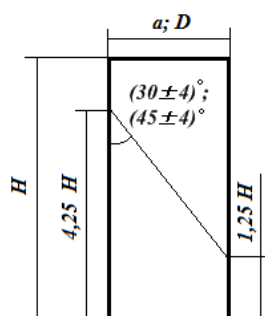


Рис. 2. Рекомендовані співвідношення розмірів зразків для випробувань скісно розрізаних клеєних зразків бетону методом осьового стискування

Залежно від співвідношення міцності адгезійного з'єднання і міцності бетону на стиск при таких випробуваннях можливі два типи руйнування клеєних зразків: тип I – руйнування в тілі бетону або в тілі бетону і вздовж шва одночасно; тип II – руйнування вздовж шва.

Згідно з [6, 9] позитивний висновок сертифікаційних випробувань надається у випадку руйнування клеєних зразків за типом I.

Метод визначення міцності при осьовому стискуванні діагонально розрізаних клеєних зразків бетону було взято за основу при розробці Методики оцінювання міцності адгезійного з'єднання бетон - полімер для випробування полімерних матеріалів, призначених для ін'єктування в тріщини М 218-03450778-693:2011. Основною задачею випробувань за цією Методикою є вибір ін'єкційних полімерних матеріалів для ремонту конструкцій з певного класу бетону за міцністю на стиск в місцях можливого виникнення скісного зсуву.

З урахуванням описаних вище вимог, а також вимог чинних в Україні нормативних документів, було проведено низку експериментальних досліджень щодо впливу різних факторів на показники міцності скісно розрізаних клеєних зразків бетону і за результатами випробувань встановлено критерії оцінювання міцності згідно з розроблюваною методикою.

Експериментальна частина

При виконанні розробки було запропоновано оцінювати міцність адгезійного з'єднання "бетон-полімер" шляхом визначення і порівняння міцності на стиск скісно розрізаних та склеєних полімерним матеріалом зразків бетону і цільних зразків такого ж бетону.

Ефективність такого підходу було перевірено шляхом випробувань полімерних матеріалів, сертифікованих в системі EN і призначених для ремонту залізобетонних споруд методом ін'єктування. Було випробувано три види полімерних матеріалів: матеріал №1 – двокомпонентний полімерний матеріал для герметизації тріщин методом ін'єктування; матеріал №2 – двокомпонентний полімерний матеріал для ремонту елементів конструкцій, які працюють без тріщин, методом ін'єктування; матеріал №3 – двокомпонентний полімерний матеріал для ремонту елементів конструкцій, які працюють без тріщин, методом ін'єктування, що відрізняється від №2 за технологічними і фізико-механічними характеристиками. Характеристики полімерних матеріалів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Технологічні і фізико-механічні характеристики полімерних матеріалів, застосованих для проведення досліджень при розробці методики

Характеристика, одиниця вимірювання	Матеріал № 1	Матеріал № 2	Матеріал № 3
Густина, кг/м ³	1,043	1,140	1,100
В'язкість (по Брукфілду), МПа·с, при швидкості обертання ротору, об/хв.	90 1-20	380 2-5	140 1-20
Життєздатність при 23°С, хв.	35	10	70
Модуль пружності, Н/мм ²	—	3,400	2,600
Межа міцності на згин, Н/мм ²	—	44	39
Межа міцності на стиск, Н/мм ²	—	100	70
Максимальне відносне видовження, %	145	1,0	2,5

Для випробувань кожного виду полімерного матеріалу було виготовлено серію зразків, що складалася із контрольних (цільних) і робочих (клеєних) зразків (три зразки кожного виду). Дослідження було виконано з застосуванням бетону різних класів міцності; склад бетонних сумішей і характеристики зразків наведено нижче.

Зразки у вигляді балочок-призм були виготовлені відповідно до вимог [10] у кількості 9 штук із суміші наступного складу, кг/м³:

Цемент М400	430,00
Пісок кварцовий річковий (сито № 7)	680,00
Щебінь фракції 5-10	978,00
Вода	183,00

Було виготовлено дві серії таких зразків для випробувань двох видів полімерних матеріалів. При попередньому випробуванні відповідно до вимог [10] бетон, виготовлений із суміші наведеного складу, належить до класу бетону за міцністю В25.

Зразки у вигляді циліндрів було виготовлено відповідно до вимог [10] у кількості 6 штук із суміші наступного складу, кг/м³:

Цемент М500	450,00
Пісок кварцовий річковий (сито №7)	460,00
Щебінь фракції 5-10	670,00
Щебінь фракції 10-20	670,00
Вода	151,00
Добавка PF-2204 (МС ВАUCHEMIE)	6,60
Добавка Air-202 (МС ВАUCHEMIE)	0,45

Було виготовлено одну серію таких зразків для випробувань одного виду полімерного матеріалу. При попередньому випробуванні відповідно до вимог [10] бетон, виготовлений із суміші наведеного складу, належить до класу бетону за міцністю В40.

Клеєні зразки у вигляді балочок-призм були виготовлені шляхом розрізання під кутом (30±4)°; клеєні зразки-циліндри були виготовлені шляхом розрізання під кутом (45±4)°.

Процес підготовки клеєних зразків складався з наступної послідовності операцій:

- скісне розрізання зразків;
- шліфування поверхонь зрізу за допомогою шліфувального бруска, грубого шліфувального паперу і шліфувальної шкірки;

- витримка половинок зразків у лабораторних умовах (відносна вологість $(65\pm 5)\%$, температура $(22\pm 2)^\circ\text{C}$) протягом 14 діб;
- вимірювання геометричних розмірів зрізу з точністю до 0,1 мм і реєстрація даних в робочому журналі;
- фіксація половинок зразків з утворенням шва товщиною 1 мм і поверхнева герметизація зразків в місці проходження шва акриловим герметиком згідно з рекомендаціями виробника (застосовували акриловий герметик марки “CERESIT”) (рис. 3а);
- ін’єктування полімерного матеріалу (склеювання зразків) згідно з рекомендаціями виробника (рис. 3б);
- витримка клеєних зразків згідно з рекомендаціями виробника.

Контрольні та робочі зразки випробовували на осьовий стиск відповідно до вимог [10] на універсальній випробувальній машині ZD-40 при швидкості навантаження $\sim 1,0$ МПа/с.

а



б



а – фіксація половинок зразків (балочок-призм і циліндрів) з подальшою поверхневою герметизацією в місці проходження шва акриловим герметиком; б – ін’єктування полімерного матеріалу в шов

Рис. 3. Стадії підготовки зразків для випробувань

При руйнуванні за типом I міцність робочих (R_p , МПа) та контрольних (R , МПа) зразків обчислювали відповідно до вимог [10]. Результат випробувань надано в табл. 3 для зразків однієї серії у вигляді співвідношення міцності на стиск робочих зразків (середнє значення) і міцності на стиск контрольних зразків (середнє значення) із точністю до першого знака після коми:

$$\Pi = \frac{R_p}{R}. \quad (2)$$

У випадку, коли руйнування робочих зразків відбувалося за типом II, було обчислено також міцність адгезійного з’єднання R_{zc} з точністю до 0,1 МПа за формулою (3):

$$R_{zc} = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

де P – максимальне значення навантаження зразка при руйнуванні при випробуванні на стиск, кН;

S – площа робочого перерізу, см^2 ; для зразків-циліндрів обчислюється за формулою (4):

$$S = 0,25 \times \pi \times a \times b, \quad (4)$$

де a – довжина найбільшої осі еліпсу, см;

b – довжина найменшої осі еліпсу, см.

Результати випробувань наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Результати випробувань адгезійного з'єднання «полімер-бетон» при осьовому стисканні діагонально розрізаних класних зразків

Марка полімерного матеріалу	№ серії, партія	№ зразка	Форма, розміри зразка, см Кут зрізання робочого зразка	*Площа робочого перерізу, см ²	Максимальне навантаження зразка при руйнуванні P , кГс	Міцність на стиск контрольних зразків R , МПа	Середнє значення $R_{сер}$, МПа	Характер руйнування робочого зразка	Тип руйнування I			Тип руйнування II	
									Міцність на стиск робочих зразків R_p , МПа	Середнє значення R_p _{сер} , МПа	$P = R_p / R_{сер}$	Міцність адгезійного з'єднання $R_{зс}$, МПа	Середнє значення $R_{зс}$ _{сер} , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Матеріал №1	контрольні	1	Балочки- призми	49,06	14960	30,5	30,2	-	-	-	-	-	-
		2		48,78	14160	29,0		-	-	-	-	-	-
		3		49,42	15430	31,2		-	-	-	-	-	-
	робочі	1	Балочки- призми, 30°	97,84/49,88	1425	-	-	Повне руйнування шва	-	-	-	1,46	1,47
		2		96,28/50,02	1425	-	-	Повне руйнування шва	-	-	-	1,48	
		3		98,00/48,99	1450	-	-	Повне руйнування шва	-	-	-	1,48	

Кінець табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Матеріал № 2	робочі	1	Балочки-призми, 30°	96,39/49,86	17900	-	-	В тілі бетону	35,9	35,5	1,1	-	-
		2		98,18/49,28	17450	-	-	В тілі бетону	35,4			-	-
		3		97,13/48,86	17200	-	-	В тілі бетону	35,2			-	-
Матеріал № 3	контрольні	1	Циліндри	249,8/176,63	62725	35,5	35,4	-	-	-	-	-	-
		2		249,8/176,63	62500	35,4		-	-	-	-	-	
		3		249,8/176,63	62375	35,3		-	-	-	-	-	
	робочі	1	Циліндри 45°	249,8/176,63	64000	-	-	В тілі бетону	36,2	35,4	1,0	-	-
		2		249,8/176,63	61125	-	-	В тілі бетону	34,6			-	-
		3		249,8/176,63	50125	-	-	В тілі бетону з частковим руйнуванням шва (1/5 площі)	28,4			-	-

* – в чисельнику наведено площу робочого перерізу, виміряну за скісним зрізом

На рис. 4 наведено фотографії робочих зразків після випробувань.

а



б



в



а – випробування зразків з матеріалом № 1; *б* – випробування зразків з матеріалом № 2;
в – випробування зразків з матеріалом № 3.

Рис. 4. Фотографії робочих зразків після випробувань

Результати випробувань, проведених відповідно до вимог [10] з дотриманням загальних вимог міжнародних стандартів і обчислені згідно з формулами (2), (3), (4), дозволяють здійснити оцінку міцності адгезійного з'єднання полімер-бетон для випробуваних систем. Згідно отриманих результатів руйнування зразків, клеєних матеріалом № 1, відбувається за типом II і міцність адгезійного з'єднання (табл. 3, колонка 14) є на порядок нижчою за міцність відповідних контрольних зразків бетону на стиск (табл. 3, колонка 8). Матеріал № 1 не може бути рекомендований для ремонту елементів конструкцій, які працюють без тріщин, методом ін'єктування.

Руйнування зразків, клеєних матеріалом № 2, відбувається за типом I, і міцність клеєних зразків є вищою за міцність контрольних зразків бетону на стиск, що відображається значенням $\Pi = 1,1$ (табл. 3, колонка 12). Матеріал № 2 може бути рекомендований

для ремонту елементів конструкцій, які працюють без тріщин, з класом міцності на стиск В25 в місцях можливого виникнення скісного зсуву ремонтіваних елементів.

Руйнування зразків, клеєних матеріалом № 3, відбувається за типом І, якщо кут зрізання становить 45° . При цьому міцність клеєних зразків є не нижчою за міцність контрольних зразків бетону на стиск, що відображається значенням $P = 1,0$ (табл. 3, колонка 12). Матеріал № 3 може бути рекомендований для ремонту елементів конструкцій, які працюють без тріщин, з класом міцності на стиск В40 в місцях можливого виникнення скісного зсуву ремонтіваних елементів.

Таким чином, за результатами теоретичних досліджень визначено, що методом, який дозволяє оцінювати ефективність застосування полімерних матеріалів для ремонту бетонних споруд ін'єктуванням, є випробування скісно розрізаних клеєних зразків бетону методом осьового стиску.

При випробуванні зразків за цим методом з дотриманням вимог національних стандартів України встановлено, що критерієм оцінювання міцності адгезійного з'єднання бетон – полімер для ремонтіваних бетонних елементів в місцях можливого виникнення зсуву при осьовому стисканні є співвідношення показників міцності скісно розрізаних клеєних та цільних контрольних зразків такого ж бетону.

Література

1. Li Z., Leung C., Xi Y. Structural Renovation in Concrete. – Taylor & Francis, 2009. – 347 p.
2. ДСТУ Б В.2.7-84-99 (ГОСТ 26589-94). Мастики покрівельні та гідроізоляційні. Методи випробувань.
3. ДСТУ Б В.2.7-133:2007. Матеріали герметизуючі полімерні отвердіваючі однокомпонентні. Методи випробування.
4. ГОСТ 28574-90. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий.
5. ASTM C 496-96. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
6. EN 12615:1999 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of slant shear strength.
7. ASTM C882/C882M Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete by Slant Shear.
8. Nord Test Standard Method NT Build 350. Concrete Injection Resin: Shear Bond Strength.
9. BS EN 1504-5:2004 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Concrete injection.
10. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.