

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ЗЧЕПЛЕННЯ  
СКЛОКОМПОЗИТНИХ ТА МЕТАЛЕВИХ АРМАТУРНИХ СТЕРЖНІВ  
З ВАЖКИМ БЕТОНОМ**

**RESEARCH OF TACTICAL TENSIONS OF CLUTCH OF GLASS-  
COMPOSITE AND METAL REINFORCEMENT BARS WITH HEAVY  
CONCRETE**

**Чапюк О.С., к.т.н., доцент, Кислюк Д.Я., к.т.н., доцент, Гришкова А.В.,  
аспірант (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)**

**PhD, associate professor A. Chapiuk, PhD, associate professor D. Kysliuk,  
postgraduate student A. Hryshkova, (Lutsk National Technical University,  
Lutsk)**

**Проведено дослідження дотичних напружень зчеплення металеві і  
склокомполітної арматури з важким бетоном за балковим методом  
RILEM/CEB/FIP. Сили зчеплення створюють в найближчому до  
арматури бетоні складний напружено-деформований стан.  
Експериментально підтверджено, що при підвищенні навантаження  
бетонної балки на ділянках контакту арматури з бетоном  
спостерігається переміщення дотичних напружень від початкової до  
кінцевої зони анкерування і для металеві арматури вони на 9,4%  
менші, ніж для склокомполітної.**

**Since the adhesion of reinforcement to concrete is the main factor of their  
joint operation, and the studies of fiber-glass composite bars with concrete are  
obviously insufficient despite the growth in their use in road and housing  
construction, an analysis was conducted to compare the adhesion between  
metal and fiber-glass reinforcement with heavy-weight concrete by the beam  
method RILEM/CEB/FIP. The essence of this method is that in the process of  
testing the displacements of the free ends of the test rod are measured, which  
are fixed by means of hour-type indicators with a split price of 0.001mm,  
located at the ends of the beams. The beams were tested by two concentrated  
forces P1, the distance between which was 400 mm. The test specimens were  
loaded in steps of 5 kN. In the beams at each stage of the load was measured  
longitudinal deformation of the rod, earned in concrete, using strain gauges.  
The adhesion forces create a complex stress-strain condition in the concrete  
adjacent to reinforcement bars. Such condition results in distribution of  
stresses along the reinforcement axis, so that the longitudinal forces on the  
reinforcement become variable along the entire bar length. It has been**

experimentally proven that as the stress on the concrete beam is increasing in the areas of contact between the reinforcement and concrete, shear stresses are observed to be shifting from the starting points towards the end ones within the anchoring area; and for metal reinforcement, the shear stresses are 9.4% less than for glass composite. It has been determined that the adhesion stress between glass-fiber reinforcement and concrete is 38% higher as compared to steel reinforcement.

**Ключові слова:** металева арматура; склокомпозитна арматура; важкий бетон; зчеплення; балковий метод RILEM/CEB/FIP; дотичні напруження; тензодатчики.

Metal reinforcement; fiber-glass composite reinforcement; heavy-weight concrete, adhesion; beam method RILEM/CEB/FIP; shear stresses; tension gauges.

**Вступ.** Зчеплення арматури з бетоном є важливою характеристикою залізобетону, яка визначає його несучу здатність, жорсткість, тріщиностійкість і залежить від великої кількості факторів: міцності бетону, виду і діаметру арматури, довжини анкерування, характеру навантаження, умов твердіння, розташування стержнів при бетонуванні і т.д. У зв'язку з цим надійність анкерування арматури в залізобетонних конструкціях також залежить від численних факторів, що визначають її зчеплення з бетоном.

**Постановка проблеми та задачі дослідження.** Сили зчеплення створюють у найближчому до арматури бетоні складний напружено-деформований стан [1]. Цей стан призводять до розподілу навантаження по осі арматури, внаслідок яких поздовжні зусилля по арматурі стають змінними по всій довжині стержня [2].

Згідно проведених експериментальних досліджень зчеплення важкого бетону зі сталевую арматурою серповидного профілю та композитною склопластиковою арматурою ставиться задача дослідити та порівняти дотичні напруження металевої арматури та композитної склопластикової арматури в представлених зразках-балках, випробуваних на згин за балковим методом RILEM/CEB/FIP [3].

**Конструкція дослідних зразків та матеріали для їхнього виготовлення.** Для дослідження обраний бетон класу C20/25. Дослідні зразки-балки мали прямокутний поперечний переріз розміром 120x220мм, довжина балок – 1230мм. Балка складається з двох половинок, які з'єднані в розтягнутій зоні арматурним стержнем діаметром  $d=16$ мм для металевої арматури серповидного профілю та  $d=10$ мм для композитної склопластикової арматури (оскільки міцність на розрив склопластикової арматури приблизно на 25% більша ніж металевої). В стиснутій зоні використано шарнір у вигляді двох закладних деталей та металевим циліндром між ними. В кожній з половинок балки стержень має зчеплення з бетоном довжиною  $10d$  ( $d$  – діаметр стержнів), на інших ділянках зчеплення відсутнє, так як арматурний

стержень поміщений у пластикові трубки, довжина кожної  $l$  ( $l=220\text{мм}$  – для сталевий арматури  $\text{Ø}16$  та  $l=250\text{мм}$  – для композитної арматури  $\text{Ø}10$ ). Відстань від осі випробувального стержня до осі металевий циліндра в стиснутій зоні (плече внутрішньої пари зусиль) становить  $167\text{мм}$ , довжина кожної з половинок балки –  $600\text{мм}$ , відстань між половинками –  $30\text{мм}$ . Конструкція балок наведена на рис. 1. Арматура була обладнана тензодатчиками для дослідження поведінки напружень в арматурному стержні.

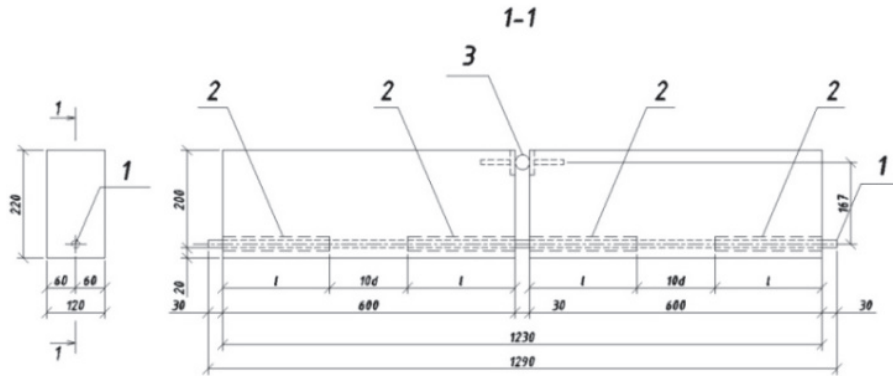


Рис. 1. Конструкція дослідного зразка - бетонної балки:  
 1 – арматурний стержень;  
 2 – пластикова трубка; 3 – сталевий циліндр

**Методика експериментальних досліджень.** Експериментальні дослідження випробування бетонних балок здійснювались за балковим методом RILEM/CEB/FIB на згин (рис. 2).

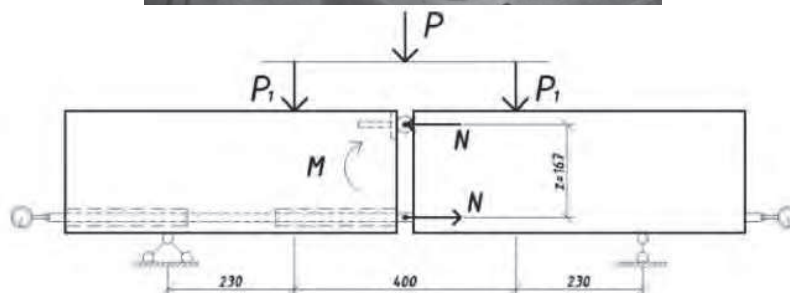
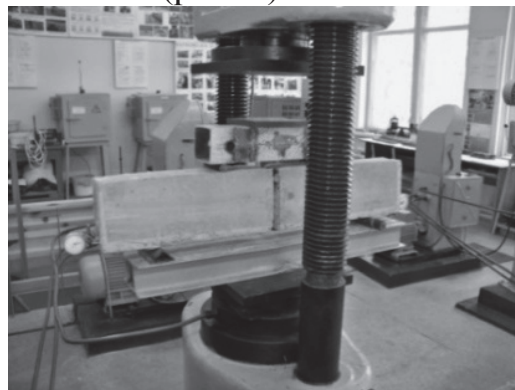


Рис. 2. Загальний вигляд та схема випробування бетонних балок

Суть цього методу в тому, що в процесі випробувань вимірюються переміщення вільних кінців досліджуваного стержня, розташованих на

торцях балок. Балки випробовувались двома зосередженими силами, відстань між якими становила 400мм. Навантаження дослідних зразків здійснювалось ступенями по 5 кН. Переміщення вільних кінців досліджуваного арматурного стержня вимірювали індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,001мм. В балках на кожному ступені навантаження вимірювали поздовжні деформації стержня, заробленого в бетон, за допомогою тензорезисторів [4].

В арматурних стержнях дослідних зразків вибиралися симетрично поздовжні пази глибиною 2мм, в яких розташовувалися тензорезистори для вимірювання деформацій стержня під час випробування на згин бетонної балки.

Тензорезистори приклеювалися клеєм БФ2 та гідроізолювалися епоксидною смолою. Від тензорезисторів влаштовувалися дротяні виводи, які приєднувалися до тензометричної станції.

Результати дослідження розподілення напружень зчеплення в дослідних зразках Б1 (металева арматура) та Б2 (композитна склопластикова арматура).

Під час випробування бетонної балки Б1 вимірювалися деформації арматурного стержня  $\epsilon_{si}$ , які виникають всередині довжини стержня, тобто в точках  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$  (рис. 3). Максимальне значення напруження, що виникає в арматурному стержні  $f_{ydm} = 171,14$  МПа спостерігається посередині при навантаженні, близькому до руйнівного  $P_u = 55$ кН.

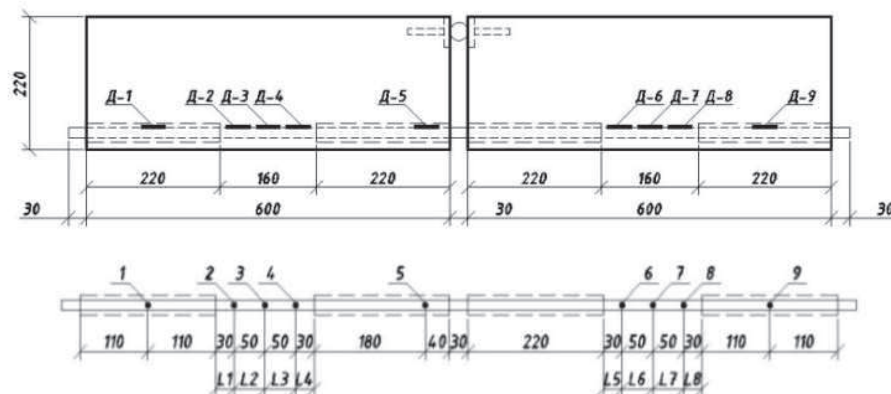


Рис. 3. Схема розташування тензорезисторів у дослідному зразку Б1

Більш цікаво було оцінити розподіл дотичних напружень в арматурному стержні при контакті з бетоном. Для цього детальніше розглядаються ділянки анкерування (довжиною  $10d = 160$ мм), на яких розміщені точки  $i = 2, 3, 4, 6, 7, 8$ . Ці точки розділили зони анкерування стержня на 8 ділянок (див. рис. 3). Прийнято, що на кожній  $i$ -тій ділянці в стержні діє зусилля  $f_{ydi} A_s$ , яке передається на бетон внаслідок виникнення напружень зчеплення та на наступні ділянки стержня (стосується лише ділянок, розташованих в зонах анкерування). В цьому випадку дотичні напруження зчеплення всередині ділянок  $\tau_{ci}$  можна визначити за формулою:

$$\tau_{ci} = \frac{(f_{ydi} - f_{yd,i-1}) \cdot A_s}{\pi l_i}, \quad (1)$$

де,  $f_{ydi}$  і  $f_{yd,i-1}$  - напруження в стержні на  $i$ -тій та попередніх ділянках;  
 $l_i$  - довжина  $i$ -тої ділянки.

Середні дотичні напруження зчеплення арматурного стержня з бетоном  $\tau_c$  можна визначити за формулою (2):

$$\tau_c = \frac{(f_{yd}) \cdot A_s}{\pi l}, \quad (2)$$

де,  $f_{yd}$  - напруження в стержні;

$l$  - довжина стержня.

За знайденими середніми дотичними напруженнями зчеплення на кожній ділянці побудовані епюри їхнього розподілу по довжині анкерування арматурного стержня в бетоні для різних рівнів навантаження, а саме  $P = 5, 15, 25, 35, 45, 50$ кН та при руйнівному навантаженні  $P_u = 55$ кН (рис. 4).

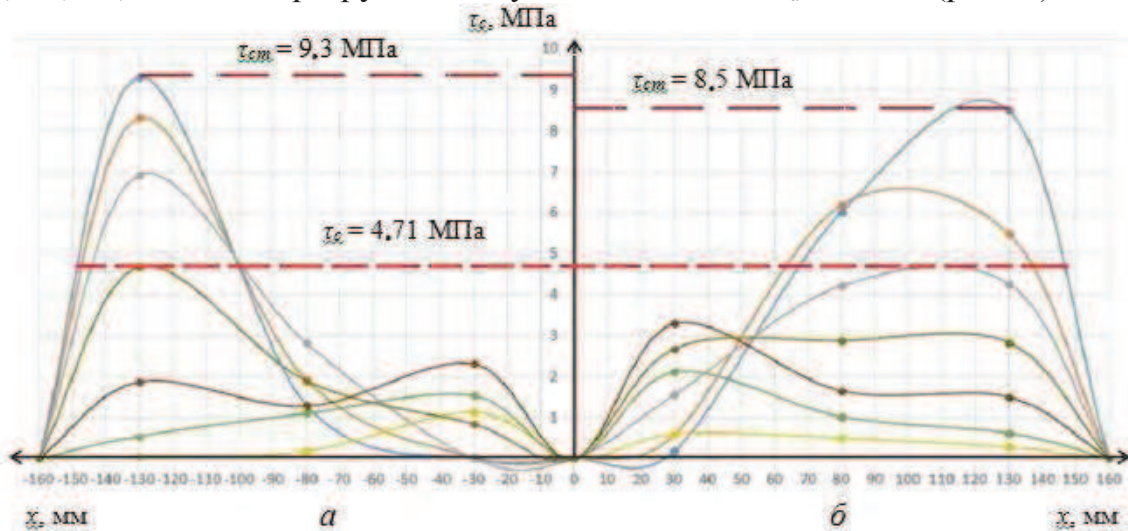


Рис. 4. Графік розподілу дотичних напружень  $\tau_{ci}$  на ділянках зчеплення стержня з бетоном залежно від навантаження  $P$ : а – ділянка зчеплення 1, на якій розміщені тензодатчики Д-2, Д-3, Д-4; б – ділянка зчеплення 2, на якій розміщені тензодатчики Д-6, Д-7, Д-8;

● –  $P = 5$ кН; ● –  $P = 15$ кН; ● –  $P = 25$ кН; ● –  $P = 35$ кН;  
 ● –  $P = 45$ кН; ● –  $P = 50$ кН; ● –  $P_u = 55$ кН (руйнівне зусилля)

На першій ділянці зчеплення (з тензодатчиками Д-2, Д-3, Д-4) при перших рівнях навантаження  $P = 5$ кН,  $P = 15$ кН,  $P = 25$ кН максимальні напруження виникали на віддалі  $x = 30$ мм (Д-4) від початку зони анкерування і складали відповідно  $\tau_c = 1,14, 1,53$  і  $2,31$  МПа. Зі збільшенням навантажень спостерігався ріст максимальних дотичних напружень зчеплення в точках Д-3 та в меншій мірі Д-2. Але при навантаженні в  $35$  кН (64% від руйнівного) максимальні дотичні напружень зчеплення

спостерігалися вже в точці Д-2 і були набагато більші ніж у точці Д-4. При збільшенні зусиль відбувалось збільшення напружень зчеплення в точці Д-2 і поступове зменшення в точках Д-3 та Д-4, що свідчило про поступове руйнування контактного шару в цих точках і висмикування арматури з тіла бетону. При руйнуванні балки Б-1 ( $P_u = 55\text{кН}$ ) максимальні напруження зчеплення досягли найбільшого значення  $\tau_{cm} = 9,3$  МПа. Звичайно, руйнування балки відбулося через недостатню довжину анкерування стержня  $10d$ . Для розриву арматури необхідна довжина анкерування не менше  $25d$ .

Схожа картина спостерігалась і на правій ділянці зчеплення (з тензодатчиками Д-6, Д-7, Д-8). При мінімальних навантаженнях  $P = 5\text{кН}$ ,  $P = 15\text{кН}$ ,  $P = 25\text{кН}$  максимальні напруження виникали на віддалі  $x = 30\text{мм}$  (Д-6) від початку зони анкерування і складали відповідно  $\tau_c = 0,60$ ,  $2,124$  і  $3,29$  МПа. Максимальні дотичні напруження зчеплення в точці Д-7 при навантаженні в  $25$  кН були вдвічі менші ніж в точці Д-6, але при збільшенні навантаження до  $35$  кН (64% від руйнівного) почало спостерігатися зменшення дотичних напружень зчеплення в точці Д-6 і збільшення в точках Д-7 та Д-8, і складало в усіх цих точках трохи менше  $\tau_c = 3$  МПа (35% від максимального). Зі збільшенням навантажень спостерігався ріст максимальних дотичних напружень зчеплення в точках Д-7 та Д-8 та зменшення їх на початку анкерування (Д-6). Перед руйнуванням балки Б-1 при граничному навантаженні  $P_u = 55\text{кН}$  максимальні напруження зчеплення арматури та бетону досягли найбільшого значення  $\tau_{cm} = 8,5$  МПа в дальній зоні анкерування (Д-8).

Провівши аналіз кожної з ділянок зчеплення видно, що при збільшенні навантаження на балку Б-1, яка анкерована сталлюю арматурою  $\text{Ø}16$  класу А500С спостерігається плавне переміщення дотичних напружень від початку зони анкерування до її кінців. Максимальні напруження зчеплення перед руйнуванням склали  $\tau_{c1} = 9,3$  МПа на лівій ділянці зчеплення та  $\tau_{c2} = 8,5$  МПа на правій.

Що стосується дослідного зразка-балки Б2, яка армована склокомпозитною арматурою  $\text{Ø}10\text{АКС}800$ , то руйнівне навантаження склало  $P = 34\text{кН}$ , що на 38% менше граничного навантаження балки Б1.

Для проведення порівняння напружено-деформованих станів в дослідних зразках-балках Б1 та Б2 необхідно оцінити розподіл дотичних напружень в склокомпозитному арматурному стержні при контакті з бетоном. Для цього детальніше розглядаються ділянки анкерування довжиною  $10d = 100\text{мм}$  (див. рис. 5).

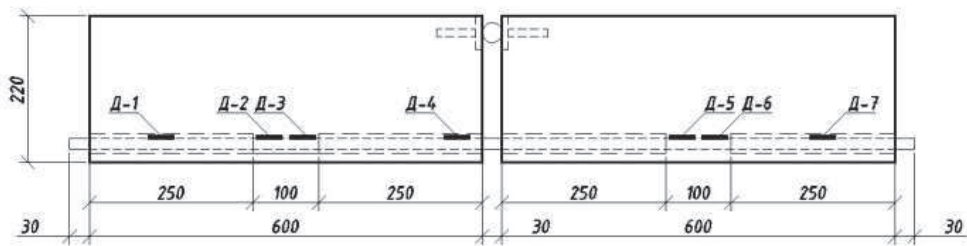


Рис. 5. Схема розташування тензорезисторів в дослідному зразку – бетонній балці Б2

За знайденими середніми дотичними напруженнями зчеплення на кожній ділянці побудовані епюри їхнього розподілу по довжині анкерування арматурного стержня в бетоні для певних рівнів навантаження, а саме  $P = 5, 10, 15, 20, 25, 30$  і при руйнівному навантаженні  $P_u = 34$  кН (рис. 6).

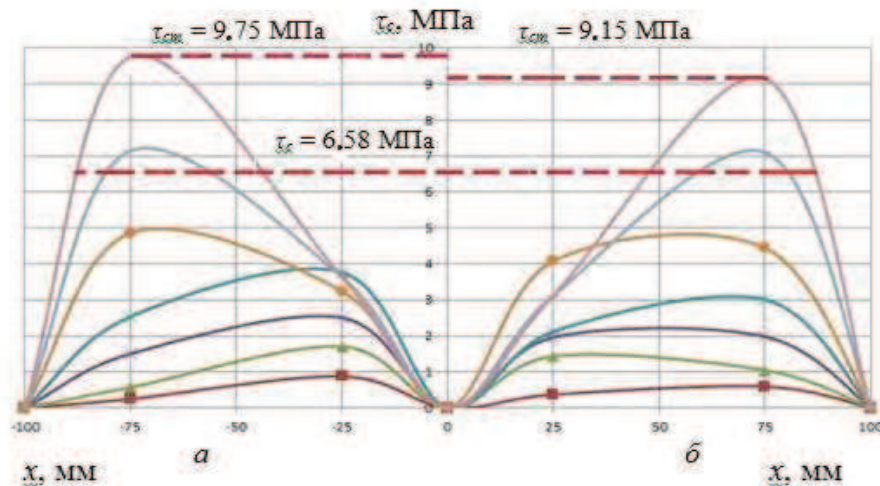


Рис. 6. Графік розподілу дотичних напружень  $\tau_{ci}$  на ділянках зчеплення стержня з бетоном залежно від навантаження  $P$ : а – ділянка зчеплення 1, на якій розміщені тензодатчики Д-2 та Д-3; б – ділянка зчеплення 2, на якій розміщені тензодатчики Д-5, Д-6;  
 —■—  $P = 5$  кН; —▲—  $P = 10$  кН; —×—  $P = 15$  кН; —\*—  $P = 20$  кН;  
 —◆—  $P = 25$  кН; —+—  $P = 30$  кН; — — —  $P_u = 34$  кН (руйнівне зусилля)

На першій ділянці зчеплення (з тензодатчиками Д-2 та Д-3) (рис. 10, а) при мінімальному рівні навантаження  $P=5$  кН максимальне напруження виникло в ближній точці анкерування на відстані 25 мм (Д-3) і склало  $\tau_c = 0,88$  МПа. При навантаженні  $P=15$  кН максимальні напруження  $\tau_c = 2,5$  МПа. При збільшенні навантажень до  $P=25$  кН максимальне напруження було вже зафіксовано в дальній точці на відстані 75 мм від початку анкерування в точці Д-2 і склало  $\tau_c = 4,86$  МПа. Перед руйнуванням балки Б-2 при граничному навантаженні  $P_u = 34$  кН максимальні напруження зчеплення арматури та бетону досягли найбільшого значення  $\tau_{cm} = 9,75$  МПа в дальній зоні анкерування (Д-2).

Проаналізувавши розташування кривих на графіку розподілу дотичних напружень (див. рис. 6, б) видно, що ділянка зчеплення 2 (з тензодатчиками

Д-5 та Д-6) симетрично відображає ділянку зчеплення 1. При мінімальному ступені завантаження  $P=5\text{кН}$  максимальне напруження зафіксовано в зоні датчика Д-5 і становило  $\tau_c=0,59\text{МПа}$ . При збільшенні зусилля до  $P=15\text{кН}$  напруження досягають максимального значення  $\tau_c=1,95\text{МПа}$  в обох датчиках Д-5 та Д-6. Максимальні напруження  $\tau_c=4,44\text{МПа}$  при навантаженні  $P=25\text{кН}$ , а при граничному навантаженні  $P_u=34\text{кН}$  максимальні напруження зчеплення арматури та бетону досягли найбільшого значення  $\tau_{cm}=9,15\text{МПа}$  в дальній зоні анкерування (Д-6).

Провівши аналіз кожної з ділянок зчеплення видно, що при збільшенні навантаження бетонної балки на ділянках контакту арматури з бетоном спостерігається переміщення дотичних напружень від початкової до кінцевої зони анкерування і максимальні значення складають в середньому в металевій арматурі  $\text{Ø}16\text{A}500\text{C} - 8,9\text{ МПа}$ , а в склопластиковій  $\text{Ø}10\text{AKC}800 - 9,45\text{ МПа}$ , що на 9,4% більше.

**Висновки:** 1. Характер розподілу дотичних напружень зчеплення як металевій, так і склокомпозитній арматурі з бетоном однаковий і має параболічний вигляд.

2. При збільшенні навантаження бетонної балки на ділянках контакту арматури з бетоном спостерігається переміщення дотичних напружень зчеплення з бетоном від початкової до кінцевої зони анкерування і для металевій арматурі  $\text{Ø}16\text{A}500\text{C}$  вони на 9,4% менші ніж для склопластикової  $\text{Ø}10\text{AKC}800$ .

3. Граничні дотичні напруження на всій ділянці зчеплення у склопластиковій арматурі  $\text{Ø}10\text{AKC}800$  з бетоном більші на 38% порівняно з металевією арматурією серповидного профілю  $\text{Ø}16\text{A}500\text{C}$ .

1. Бабич Є.М., Чапук О.С., Вавринюк Б.А. Наружено-деформований стан контакту з бетоном арматури серповидного профілю // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2009. Випуск 19. С. 74-82.

Babych Ye.M., Chapiuk O.S., Vavryniuk B.A. Naruzheno-deformovanyi stan kontaktu z betonom armatury serpovydnoho profilu // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Rivne: NUVHP, 2009. Vypusk 19. S. 74-82.

2. Чапук О.С., Кислюк Д.Я., Гришкова А.В., Орешкін Д.О. Напружено-деформований стан зчеплення композитної склопластикової арматури з важким бетоном // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк: ЛНТУ, 2015. Випуск 4. С. 232-239.

Chapiuk O.S., Kysliuk D.Ia., Hryshkova A.V., Orieshkin D.O. Napruzhenodeformovanyi stan zcheplennia kompozytnoi skloplastykovoii armatury z vazhkym betonom // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Lutsk: LNTU, 2015. Vypusk 4. S. 232-239.

3. RILEM/CEB/FIP Recommendations RC 5: Bond test for reinforcing steel, 1. Beam Test, 1978.