

**ПРОГРАМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ГРАНИЧНОГО СТАНУ ЗА НЕСУЧОЮ ЗДАТНІСТЮ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК У ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗАХ**

**PROGRAM OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF
LIMIT STATE FOR BEARING CAPACITY
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN INCLINED SECTIONS**

**Швайковський В.Л., аспірант, Погрібний В.В., к.т.н., с.н.с.
(Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»)**

**Shvaikovskiy v.l., Postgraduate Student, Pohribnyi V.V., Ph.D. of
Engineering, Senior Researcher (National University «Yuri Kondratyuk
Poltava Polytechnic»)**

Наведена програма експериментального дослідження несучої здатності за похилими перерізами залізобетонних балок. Передбачено встановлення впливу на несучу здатність кута нахилу небезпечної тріщини та висоти стиснутої зони бетону в місці зосередженого навантаження. Дія вказаних факторів досліджується за різної інтенсивності поперечного армування та відстані від опори до місця прикладання сили.

According to previously conducted research, the factors that affect the bearing capacity of reinforced concrete beams at inclined sections have been determined. In addition to the characteristics of the strength of concrete and reinforcement and the intensity of shear reinforcement, they include the distance from the support to the place of application of the load, the outline of a dangerous inclined crack, and the height of the compressed zone of concrete above it. The quantitative influence of the latter factors requires further research. The resistance of the wedge-shaped compressed zone depends on the inclination of the crack (angle of the wedge). To clarify the design schemes and dependencies for determining the resistance of the areas near the supports, testing of 6 reinforced concrete beams with the dimensions $b \times h(d) \times l=120 \times 190(160) \times 1500$ mm is planned. Two series of samples were made. They differ in the step of the shear reinforcement in the sections near the supports: 100 mm і 150 mm. The distance of application of the concentrated force from the support varies: $c = 225$ mm, 300 mm, 400 mm і 500 mm; its relation to the arm of the pair of internal forces z changed in the interval $c/z = 1,4 - 3,2$. Shear reinforcement of beams is a bar of 6 mm diameter, class A240C; longitudinal reinforcement 2Ø20 A400C provides reserves of bearing capacity for normal cross-sections. It is envisaged to transfer the load to the test samples by two concentrated forces (according to the scheme of pure bending) in steps of each 10% of the expected value of the ultimate load. During the first test of the sample, external clamps are installed

on the section from the support to the place of application of the load on one side of the beam. After the destruction of the unreinforced section, the clamps are transferred to it and the sample is retested. At each stage of loading, the strain value of the concrete of the compressed zone above the dangerous inclined crack and the shear reinforcement in the places where it intersects with the crack is measured by strain gauges with a base of 50 mm and 5 mm, respectively, the height of the compressed zone and the value of the angle of its wedge in the design (most dangerous) section are recorded.

*Ключові слова: зразок, опір, вплив, обрис, клин, висота, тензорезистор.
Keywords: sample, resistance, impact, outline, wedge, height, strain gauge.*

Вступ. У сучасному будівництві одне із найважливіших місць займають залізобетонні конструкції, що працюють на згин. Вони знайшли широке застосування як у збірному, так і монолітному виконанні та в значній мірі обумовлюють ресурсоефективність будівництва. Слід зазначити, що їх несуча здатність повинна бути забезпечена за нормальними та похилими перерізами. Якщо граничний стан за нормальними перерізами достатньо визначений, то розрахунок за похилими перерізами має певну неоднозначність. У чинних нормах [1] розглядаються елементи, на опір яких впливає або міцність стиснутого бетону, або інтенсивність поперечного армування. Так, для армованих хомутами конструкцій, виготовлених із бетонів низької міцності, їх несуча здатність за похилим перерізом у результаті розрахунків визначається зусиллям, що сприймає умовний стиснутий бетонний елемент, а при високоміцному бетоні – зусиллям у поперечній арматурі. Але в експериментальних дослідженнях руйнування стиснутого бетону в межах нахиленої смуги чи над похилою тріщиною відбувається при значних напруженнях у поперечній арматурі. Неврахування спільної роботи стиснутого бетону та розтягнутої арматури, а також невизначеність кута нахилу стиснутого розкоосу призводить до зниження ефективності й ресурсозбереження конструктивних рішень. Вказане обумовлює необхідність удосконалення розрахунку, одним із шляхів реалізації якого є проведення додаткових експериментальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Питанню визначення несучої здатності за похилими перерізами залізобетонних конструкцій, що згинаються, присвячена велика кількість експериментальних і теоретичних досліджень. На несучу здатність згідно чинних норм [1], котрі узагальнюють достовірні результати авторських досліджень та надають їх у зручній для використання формі, впливають міцність бетону й інтенсивність поперечного армування, ширина поперечного перерізу, плече внутрішньої пари сил z і кут нахилу підкоосу θ . Але вказане спрощення приводить до певних неточностей оцінювання несучої здатності. Однак, аналіз сучасних розробок в області розрахунку за похилими перерізами свідчить, що вони не досягли рівня, котрий можливо запропонувати у якості пропозицій до норм. Розрахункові

моделі в більшості випадків мають емпіричний характер, зумовлений складністю напружено-деформованого стану композитного матеріалу (яким, по суті, є залізобетон) у зоні поперечного згину. Останнім часом виділено цілий ряд додаткових факторів, які впливають на несучу здатність за похилими перерізами [2 – 7]. Серед них слід відмітити: нагельний ефект у поздовжній арматурі; зачеплення у берегах похилої тріщини. У результаті теоретичних і експериментальних досліджень, проведених в НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» [8 – 10], встановлено безпосередній вплив на несучу здатність за похилими перерізами залізобетонних конструкцій, що згинаються, клиноподібності стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною: кута нахилу тріщини в місці прикладання зосередженого навантаження та висоти стиснутої зони бетону в кінці розрахункового перерізу, котрі залежать від величини проекції похилої тріщини c_0 на поздовжню вісь конструкції, що визначається відстанню від опори до сили.

Постановка мети та задачі дослідження: розроблення програми проведення експериментального визначення несучої здатності і характеру руйнування залізобетонних балок та уточнення й отримання нових даних щодо впливу параметрів похилого перерізу: клиноподібності стиснутої зони; її висоти; проекції небезпечної тріщини.

Етапи реалізації програми досліджень. Для отримання експериментальних даних, які дозволять перевірити достовірність теоретичних розробок [11 – 13] і підготувати пропозиції щодо змін в [1], розроблена програма досліджень з урахуванням силового обладнання та вимірювальної апаратури лабораторії кафедри будівельних конструкцій.

Програмою дослідження передбачено:

- визначення очікуваної несучої здатності дослідних зразків за похилими перерізами й уникнення руйнування у нормальному перерізі при випробуваннях за схемою «чистого згину»;

- виготовлення 6-ти дослідних зразків: залізобетонних балок прямокутного поперечного перерізу з розмірами $b \times h = 120 \times 190$ мм, довжиною 1500 мм. Зразки армовані просторовими каркасами, для яких поздовжнє армування – $2\varnothing 20 A400C$, поперечне – $2\varnothing 6 A240C$;

- дві серії дослідних зразків з різною інтенсивністю поперечного армування: з кроком 100 мм для першої серії (рис. 1, а) і 150 мм – для другої (рис. 1, б);

- визначення міцності бетону на стиск і розтяг та міцності поперечної арматури за результатами випробування стандартних зразків;

- варіювання відстані від опори до місця прикладання навантаження та розрахункових параметрів похилого перерізу: кута нахиленої грані стиснутої зони та її висоти в місці прикладання сили. У межах кожної серії значення відстані від опори до лінії прикладання навантаження складають:

$c = 225$ мм, 300 мм, 400 мм і 500 мм, при цьому відносний проліт зрізу c/z змінювався в межах 1,4 – 3,2;

- вимірювання відносної деформації стиснутого бетону над похилою тріщиною та поперечної арматури на кожній ступені навантаження.

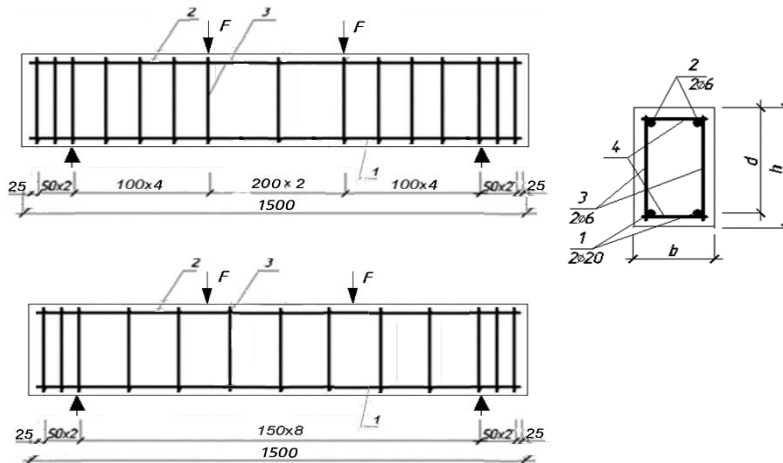


Рисунок 1 – Дослідні зразки: першої та другої серії: 1 – поздовжня робоча арматура класу А400С; 3 – поперечна робоча арматура класу А240С; 2, 4 монтажна й з'єднувальна арматура класу А240С

Фото каркасів дослідних зразків із тензорезисторами на поперечній арматурі представлені на рис. 2 і 3.

Прийняте таке маркування дослідних балок: балка – номер серії – крок поперечної арматури – відстань від опори до сили.

Розміщення датчиків опору на поперечній арматурі відповідає очікуваному обрисові тріщини. Деформації арматури вимірюються за допомогою тензорезисторів типу ПКБ базою 5 мм (датчики виготовлені із константанового дроту на паперовій основі, мають опір $R=100,0$ Ом, коефіцієнт тензочутливості $K=2,16$ і розташовані у місці можливого руйнування) й автоматичного вимірювача деформацій.



Б1-100-500



Б1-100-400



Б1-100-300 (250)

Рисунок 2 – Каркаси дослідних зразків 1-ої серії з тензорезисторами на поперечній арматурі



Б2-150-500



Б2-150-400



Б2-150-300 (250)

Рисунок 3 – Каркаси дослідних зразків 2-ої серії з тензорезисторами на поперечній арматурі

Тензорезистори наклеювалися у такій технологічній послідовності (рис. 4): поверхня гладкої арматури класу А240С зачищалася наждачним папером № 100; потім промивалася технічним ацетоном до повного очищення; шар клею БФ-2 в якості ґрунтовки наносився пензликом на підготовлену поверхню арматури; на наступному етапі тонкий шар клею наносився на арматуру й датчик, протягом 30 – 40 секунд клей підсушувався феном; тензорезистор розміщувався на арматурі поздовжньо (співвісно); потім на датчик укладалася поліетиленова плівка, котра притискалася

гумовим валиком для видалення надлишку клею; проводилося просушування клею феном протягом 10 – 15 хвилин, після чого каркаси зберігалися в лабораторії протягом 5 діб. Потім омметром із вимірювальною напругою 4 – 5 В перевірялася суцільність електричного кола та відсутність замикання тензорезисторів. Перед наклеюванням виводи датчиків були припаяні до з'єднувального дроту й ізольовані термозбіжною трубкою діаметром 2 мм, яка при нагріванні відкритим полум'ям зменшується в розмірі в кілька разів, тим самим відскаючи можливий доступ вологи до тензорезистора. Крім того, кожен тензорезистор був захищений ізоляційною стрічкою та епоксидною смолою, котра після додавання затверджувача перетворилася на міцний полімер. З'єднання тензодатчика з кабелем автоматичного вимірювача деформацій виконується за допомогою клеми у пластиковій оболонці.

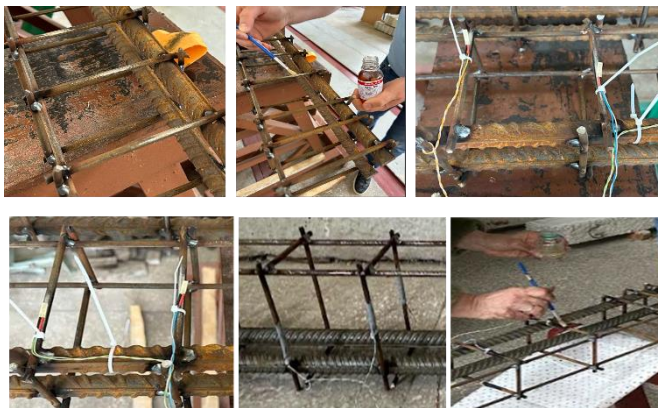


Рисунок 4 – Технологічна послідовність наклеювання тензорезисторів на поперечну арматуру

Відносні деформації бетону вимірюються тензорезисторами базою 50 мм у стиснутій зоні над небезпечною похилою тріщиною в області, наближеній до місця прикладання сили (рис. 5).

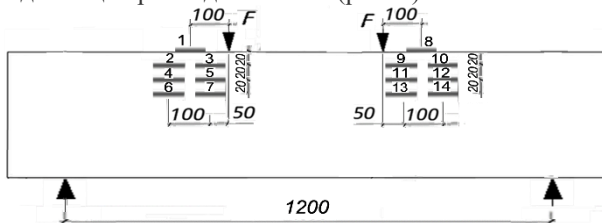


Рисунок 5 – Схема розміщення тензорезисторів на бетоні стиснутої зони

Навантаження на дослідні зразки передається ступенями, які складають 10% від очікуваної величини граничного навантаження. На кожній ступені навантаження вимірюється величина деформації стиснутого бетону та поперечної арматури, фіксується висота стиснутої зони та величина кута її клину в розрахунковому (найбільш небезпечному) перерізі, встановлюється картина втрати монолітності та руйнування.

Випробування планується здійснювати в установці лабораторії кафедри будівельних конструкцій (рис. 6).

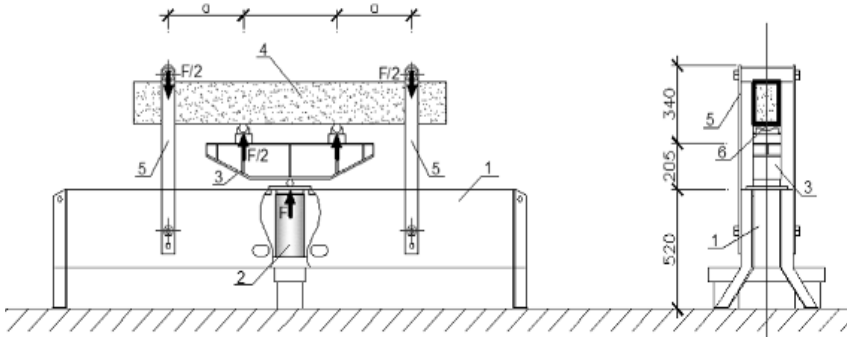


Рисунок 6 – Схема установки для випробування балок: 1 – жорстка база; 2 – гідравлічний домкрат; 3 – передавальна траверса; 4 – досліджувана балка; 5 – тяжі; 6 – циліндричні котки

Передбачалася можливість повторного випробування кожної балки. Задля збільшення кількості результатів випробування, всі балки з однієї сторони в зоні біля опори підсилюються зовнішніми хомутами (рис. 7). Після першого випробування хомути переставляються на зруйновану сторону та випробування здійснюється вдруге. Таким чином, для кожної конструкції можуть бути отримані два результати (всього 12 випробувань).



Рисунок 7 – Підсилення ділянок дослідних балок біля опор зовнішніми хомутами

Висновок. Передбачена програма експериментальних досліджень дозволить отримати нові дані для уточнення розрахунку балкових конструкцій за похилими перерізами з урахуванням впливу клиноподібності стиснутої зони та її висоти в місці прикладання зосередженого навантаження, а також обрису небезпечної тріщини.

References

1. DSTU B V.2.6-156:2010. Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules. – K.: Ministry of Regional Development of Ukraine, State Enterprise "Ukrakhbudinform", 2011. – 118 p. – (National Standard of Ukraine).
2. Yang Y. Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement / Y. Yang, J. Walraven, J. den Uijl // Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol. 143 (1), 04016146.
3. Cavagnis F. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: an analysis of the critical shear crack development on the basis of test results / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // Engineering structures. – 2015. – Vol. 103. – Pp. 157–173.
4. Mohammed A.O.I. Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete / A.O.I. Mohammed // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – Chapter 1, 022062.
5. Kuo W.W. Shear strength of reinforced concrete beams / W.W. Kuo, T.C.H. Thomas, S.J. Hwang // ACI Structural Journal. – 2014. – Vol. 111. – Pp. 809–818.
6. Dorofeev B.S. Strength, deformability and crack resistance of supporting sections of eccentrically tensiled and compressed reinforced concrete beams / V.S. Dorofeev, V.M. Karpuk, N.N. Petrov. – Odessa: Publishing House "Vneshreklamservis", 2011. – 184 p.
7. Klimov Yu.A. To calculate the strength of reinforced concrete elements in inclined sections / Yu.A. Klymov // Tavrii Scientific Bulletin: Collection of Scientific Articles. – 1999. – Iss. 11, Part 3. – Pp. 11–17.
8. Mitrofanov V.P. Optimization strength theory of reinforced concrete bar elements and structures with practical aspects of its use / V.P. Mitrofanov // Building static notice. – 2000. – Vol. 71 – № 4. – Pp. 73–125.
9. Mitrofanov V.P. Consideration of brittleness, pseudoplasticity and plasticity of concrete in strength calculations under complex non-homogeneous stress-strain states / V.P. Mitrofanov, N.M. Pinchuk // Scientific Bulletin of Construction. – 2016. – № 1. – Pp. 101–107.
10. Patent 62865/ Ukraine, (51) IPC (2011.01) G01N 3/00. A method of investigating the strength of concrete in the compressed zone above a dangerous inclined crack in flexural elements / O.O. Dovzhenko, V.V. Pogribnyi, T.Yu. Kachan; the applicant and owner of Poltava. national technical University named after Yuriy Kondratyuk. – № u201011002; statement 13.09.2010; published 26.09.11, Bul. №. 18.
11. Dovzhenko O.O. Strength calculation method in inclined sections of beam-reinforced concrete elements / O.O. Dovzhenko, V.V. Pogribnyi, O.O. Malyovana, O.M. Shitova // "Resource-economic materials, constructions, buildings and structures": Collection of scientific works. – 2021. – Iss. 40. – Pp. 129–136.

12. Pohribnyi V.V. Methodology for calculating the bearing capacity of reinforced concrete and masonry structures using extreme deformation conditions: monograph / V.V. Pohribnyi. – Poltava: PP "Astraya", 2022. – 388 p.

13. Pohribnyi V. Concrete and reinforced concrete shear: an improved strength calculation method/ V. Pohribnyi, O. Dovzhenko, Ye. Klymenko, O. Fenko // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2678 (1), 020014.

Література

1. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2011. – 118 с. – (Національний стандарт України).

2. Yang Y. Shear behavior of reinforced concrete beams without transverse reinforcement based on critical shear displacement / Y. Yang, J. Walraven, J. den Uijl // Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol. 143 (1), 04016146.

3. Cavagnis F. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: an analysis of the critical shear crack development on the basis of test results / F. Cavagnis, M. Fernández Ruiz, A. Muttoni // Engineering structures. – 2015. – Vol. 103. – Pp. 157–173.

4. Mohammed A.O.I. Experimental studies of strength inclined sections bent elements from autoclaved aerated concrete / A.O.I. Mohammed // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079. – Chapter 1, 022062.

5. Kuo W.W. Shear strength of reinforced concrete beams / W.W. Kuo, T.C.H. Thomas, S.J. Hwang // ACI Structural Journal. – 2014. – Vol. 111. – Pp. 809–818.

6. Дорофеев В.С. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопорных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, Н.Н. Петров. – Одесса: Издательство «Внешрекламсервис», 2011. – 184 с.

7. Климов Ю.А. До розрахунку міцності залізобетонних елементів в похилих перерізах / Ю.А. Климов // Таврійський науковий вісник: збірник наукових статей. – 1999. – Вип. 11, Ч. 3. – С. 11–17.

8. Mitrofanov V.P. Optimization strength theory of reinforced concrete bar elements and structures with practical aspects of its use / V.P. Mitrofanov // Building static notice. – 2000. – Vol. 71 – № 4. – Pp. 73–125.

9. Митрофанов В.П. Врахування крихкості, псевдопластичності та пластичності бетону в розрахунках міцності при складних неоднорідних напружено-деформованих станах / В.П. Митрофанов, Н.М. Пінчук // Науковий вісник будівництва. – 2016. – № 1. – С. 101–107.

10. Патент 62865/ Україна, (51)МПК (2011.01) G01N 3/00. Спосіб дослідження міцності бетону стиснутої зони над небезпечною похилою тріщиною в згинальних елементах / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Т.Ю. Качан; заявник та власник Полтава. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u201011002 ; заявл. 13.09.2010 ; опубл. 26.09.11, Бюл. № 18.

11. Довженко О.О. Методика розрахунку міцності у похилих перерізах балкових залізобетонних елементів / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, О.О. Мальована, О.М. Шитова // «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 40. – С. 129–136.

12. Погрібний В.В. Методологія розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування: монографія / В.В. Погрібний. – Полтава: ПП «Астрая», 2022. – 388 с.