

УДК 624.012.45:624.023.87

**МЕТОДИКА            ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ            ИССЛЕДОВАНИЙ  
СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ**

**МЕТОДИКА            ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ            ДОСЛІДЖЕНЬ  
ЗЧЕПЛЕННЯ АРМАТУРИ З БЕТОНОМ**

**THE METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL RESEARCH  
BOND ARMATURE WITH CONCRETE**

**Колчунов В. И. д.т.н., проф., Яковенко И.А. к.т.н., доц., Дмитренко Е.А.,  
аспирант (Национальный авиационный университет, г. Киев)**

**Колчунов В. І. д.т.н., проф., Яковенко І.А. к.т.н., доц., Дмитренко Є.А.,  
аспірант (Національний авіаційний університет, м. Київ)**

**Kolchunov V.I., doctor of technical sciences, professor, Yakovenko I. A.,  
candidate of technical sciences, assistant professor, Dmytrenko E.A., post-  
graduate student (National Aviation University, Kiev)**

В статье представлена методика проведения экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при деформационных воздействиях. Приведены конструкции опытных образцов при центральном (внецентренном) растяжении арматурного стержня в представительном объеме бетона; выдергивании и вдавливании арматурного стержня из бетона (в бетон) и сдвиге вдоль дискретной трещины с варьированием длины анкеровки, классов бетона (арматуры), диаметров арматуры и учетом нисходящей ветви деформирования. Предложенная методика охватывает широкий круг вопросов, необходимых для получения рациональных, более усовершенствованных зависимостей (законов) сцепления и способствует разработке новых методик расчета железобетонных конструкций.

У статті представлена методика проведення експериментальних досліджень зчеплення арматури з бетоном при деформаційних впливах. Наведено конструкції дослідних зразків при центральному (позацентровому) розтязі арматурного стрижня в представницькому об'ємі бетону; висмикування і вдавлювання арматурного стрижня з бетону (у бетон) і зсуві вздовж дискретної тріщини з варіюванням довжини анкерування, класів бетону (арматури), діаметрів арматури та урахуванням низхідної гілки деформування. Запропонована методика охоплює широке коло питань, необхідних для отримання раціональних,

більш вдосконалених залежностей (законів) зчеплення і сприяє розробці нових методик розрахунку залізобетонних конструкцій.

The paper presents a methodology of experimental research bond armature with concrete by deformation effects. It is presented the experimental samples at the center (eccentric) tensile rebar in a representative volume of the concrete; indentation and pulling rebar from the concrete (to the concrete) and displacement along discrete cracks with varying lengths of anchorage, the concrete (armature) classes, the diameter of armature and taking into account the descending branch of the deformation. The proposed methodology encompasses a wide range of issues necessary for the development of rational, more advanced relations (laws) of bond and promotes the development of new calculation methods of reinforced concrete constructions.

**Ключевые слова:**

Методика, експеримент, сцепление, арматура, бетон, трещины, железобетонные конструкции.

Методика, експеримент, зчеплення, арматура, бетон, тріщини, залізобетонні конструкції.

The methodology, experiment, bond, armature, concrete, cracks, reinforced concrete constructions.

**Вступление.** Совместная работа арматуры и бетона в железобетоне обеспечивается их сцеплением и различными условиями закрепления арматуры в бетоне. Нормальная работа железобетонных конструкций, как правило, сопровождается образованием дискретных трещин.

**Анализ последних исследований.** Сцепление арматуры с бетоном – это непрерывная связь по поверхности контакта между бетоном и арматурой, обеспечивающая их совместную работу. Сцепление арматуры с бетоном определяется характеристиками арматурной стали (состояние ее поверхности, профиля, диаметр, механические свойства) и бетона (прочность, деформируемость, возраст, состав и свойства цемента, заполнителей, технологией приготовления бетонной смеси, способами укладки и уплотнения, условиями твердения, напряженным состоянием).

**Постановка цели и задачи исследования.** Задача сцепления арматуры с бетоном при наличии дискретных трещин исследована недостаточно подробно, но при этом достаточно распространена в местах возникновения полей деформаций и напряжений, и имеет прикладное применение при расчетах железобетонных зданий и сооружений с несущими стенами, балками, колоннами, что делает её важной *актуальной* задачей для строительной практики.

Наличие неоднозначности подходов к решению проблемы сцепления арматуры с бетоном и отсутствие единой теоретически обоснованной методики расчета на данный момент, большое количество зависимостей сцепления, предложенных различными авторами, использование которых в

тех или иных расчетных моделях зачастую приводит к существенным различиям в результатах требует дальнейшего изучения данной задачи, определения параметров, влияющих на этот процесс. Одним из путей достоверного определения таких параметров является проведение направленных экспериментальных исследований. Испытания для определения сцепления между арматурой и бетоном проводят различными способами. Накопленный экспериментальный опыт показывает, что наиболее эффективно их проводить путем центрального и внецентренного растяжения арматурного стержня, выдергивания и вдавливания арматурного стержня в бетон и сдвиге вдоль дискретной трещины, а в случае сложного напряженно-деформированного состояния анкеровку определяют испытанием моделей узлов (например, опорных участков ферм).

**Цель и задачи эксперимента.** Целью проведенных экспериментальных исследований является построение и анализ зависимостей действующего усилия  $P$  от смещений арматуры относительно бетона  $U_q$  на различных стадиях нагружения при центральном и внецентренном растяжении арматурного стержня в представительном объеме бетона; выдергивании арматурного стержня из бетона; вдавливании арматурного стержня в бетон и сдвиге вдоль дискретной трещины с варьированием длины анкеровки, классов бетона, арматуры и диаметров арматуры с учетом ниспадающей ветви деформирования, проверки предлагаемого расчетного аппарата, основанного на системе нелинейных уравнений, два из которых являются дифференциальными уравнениями первого порядка и верификации численных стержневых и плоских МКЭ-моделей сцепления арматурного стержня с бетоном, а также для разработки эффективного закона сцепления, максимально отражающего реальную работу бетона и арматуры в околоарматурной зоне и разработке рекомендаций по применению предлагаемого расчетного аппарата при проектировании железобетонных конструкций.

В процессе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- 1) разработка методики экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при выдергивании арматурного стержня диаметром 10мм класса А400С из бетонного блока, высота которого варьировалась в пределах от 50 до 300мм;
- 2) разработка методики экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при вдавливании арматурного стержня диаметром 10мм класса А400С в бетонный блок, высота которого варьировалась в пределах от 50 до 100мм;
- 3) разработка методики экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при центральном и внецентренном растяжении арматурного стержня диаметром 10мм класса А400С, забетонированного в бетоне;

4) разработка методики экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном при сдвиге арматурного стержня вдоль дискретной трещины с варьированием длины анкеровки, классов бетона, арматуры и диаметров арматуры;

5) экспериментальное определение следующих параметров: усилия трещинообразования (в околоарматурной зоне) рассматриваемых элементов  $P_{crc}$ , разрушающего усилия  $P_{fail}$ , смещений арматурного стержня относительно бетона  $U_q$  при действии кратковременного деформационного нагружения  $P$  для построения опытных кривых;

6) проверки предлагаемого расчетного аппарата по моделированию сцепления арматурного стержня при выдергивании его из бетонного блока и вдавливании в бетонный блок, центральном и внецентренном растяжении, а также сдвиге арматурного стержня вдоль дискретной трещины путем сопоставления опытных кривых сжимающего усилия  $P$  от смещений арматуры относительно бетона  $U_q$  на различных стадиях нагружения и аналогичных кривых, полученных теоретически.

7) разработка и уточнение зависимости сцепления арматуры с бетоном на основании экспериментальных исследований.

Конструкции опытных образцов. Экспериментальные исследования сцепления арматуры с бетоном проведены с акцентом на малоизученные экспериментальные параметры. На сегодняшний день, отсутствуют фактические данные о взаимных смещениях арматуры относительно бетона при выдергивании / вдавливании арматурного стержня из бетонного блока / в бетонный блок при учете ниспадающей ветви деформирования бетона; присутствует некоторая неоднозначность при описании зависимостей напряжений сцепления от взаимных смещений арматуры относительно бетона (законов сцепления) в работах различных исследователей последних лет, которая приводит к различиям в полученных результатах.

Программа исследований включала лабораторные испытания 20 железобетонных призм с одиночной арматурой на выдергивание и 6 железобетонных блоков на вдавливание в бетон, армированных одиночной арматурой, расположенной по центру поперечного сечения образца. Объем и основные параметры экспериментальных образцов приведены в табл. 1. Количество испытываемых образцов принято с учетом варьирования высоты бетонной части образцов (заанкеривания арматурного стержня в бетоне).

Геометрические и конструктивные параметры экспериментальных железобетонных образцов представлены в табл. 1. Изготовление образцов осуществлялось в лаборатории строительных конструкций кафедры компьютерных технологий строительства Национального авиационного

Таблица 1.

## Объем, серии и характеристики экспериментальных образцов

| № серии<br>(количество)   | Шифр<br>конструкции | Схема<br>поперечного<br>сечения<br>и<br>армирование | $l$ ,<br>мм | $b$ ,<br>мм | $h$ ,<br>мм | Арматура,<br>диаметр –<br>мм, класс | Расстояние<br>от грани<br>арматуры до<br>грани<br>пластины, $a$ ,<br>мм | Длина<br>арматуры,<br>мм | Класс<br>бетона   |
|---|---------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|---|--------------------------|-------------------|
| 1   | 2                   | 3   | 4           | 5           | 6           | 7                                   | 8   | 9                        | 10                |
| Образцы для испытаний на центральное растяжение   |                     |   |             |             |             |                                     |   |                          |                   |
| VII (2 шт.)   | ЦР-VII-1,2          | рис.1   | 600         | 70          | 70          | Ø10A400C                            | -   | 800                      | C20/25            |
| Образцы для испытаний на внецентренное растяжение (количество – 6 шт.)<br>обычного и составного сечения |                     |   |             |             |             |                                     |   |                          |                   |
| VIII (2 шт.)  | ВЦР-VIII-1,2        | рис. 2  | 600         | 70          | 200         | Ø10A400C                            | -   | 800                      | C20/25            |
| VIII (4 шт.)  | ВЦРС-VIII-1-4       | рис. 3  | 600         | 70          | 200         | Ø10A400C                            | -   | 800                      | C20/25,<br>C25/30 |
| Образцы для испытаний на выдергивание (количество – 20 шт.)   |                     |   |             |             |             |                                     |   |                          |                   |
| V (2 шт.)   | АН-V-50-1,2         | рис. 4  | 50          | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 165                      | C16/20            |
| V (2 шт.)   | АН-V-75-3,4         | рис. 4  | 75          | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 190                      | C16/20            |
| V (2 шт.)   | АН-V-100-5,6        | рис. 4  | 100         | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 215                      | C16/20            |
| V (2 шт.)   | АН-V-150-7,8        | рис. 4  | 150         | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 265                      | C16/20            |
| V (2 шт.)   | АН-V-200-9,10       | рис. 4  | 200         | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 315                      | C16/20            |
| V (2 шт.)   | АН-V-250-11,12      | рис. 4  | 250         | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 365                      | C16/20            |
| V (8 шт.)   | АН-V-300-13-20      | рис. 4  | 300         | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 415                      | C16/20            |
| Образцы для испытаний на вдавливание (количество – 6 шт.)   |                     |   |             |             |             |                                     |   |                          |                   |
| VI (2 шт.)  | В-VI-50-1,2         | рис. 5  | 50          | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 80                       | C16/20            |
| VI (2 шт.)  | В-VI-75-3,4         | рис. 5  | 75          | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 105                      | C16/20            |
| VI (2 шт.)  | В-VI-100-5,6        | рис. 5  | 100         | 150         | 150         | Ø10A400C                            | 20  | 130                      | C16/20            |
| Образцы для испытания на сдвиг (количество – 30 шт.)  |                     |   |             |             |             |                                     |   |                          |                   |
| I (3 шт.)   | B20-B30-B20         | рис. 6, $a$   | 400         | 100         | 100         | -                                   | 10,15,20  | -                        | C16/20,<br>C25/30 |
| I (3 шт.)   | B30-B30-B30         | рис. 6, $a$   | 400         | 100         | 100         | -                                   | 10,15,20  | -                        | C25/30,<br>C25/30 |
| I (3 шт.)   | B40-B30-B40         | рис. 6, $a$   | 400         | 100         | 100         | -                                   | 10,15,20  | -                        | C32/40,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B20-B30-B20         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø6A240C                             | 10,15,20  | 400                      | C16/20,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B20-B30-B20         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø10A240C                            | 10,15,20  | 400                      | C16/20,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B20-B30-B20         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø10A400C                            | 10,15,20  | 400                      | C16/20,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B30-B30-B30         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø6A240C                             | 10,15,20  | 400                      | C25/30,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B30-B30-B30         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø10A240C                            | 10,15,20  | 400                      | C25/30,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B30-B30-B30         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø10A400C                            | 10,15,20  | 400                      | C25/30,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B40-B30-B40         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø6A240C                             | 10,15,20  | 400                      | C32/40,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B40-B30-B40         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø10A240C                            | 10,15,20  | 400                      | C32/40,<br>C25/30 |
| II (3 шт.)  | B40-B30-B40         | рис. 6, $b$   | 400         | 100         | 100         | Ø10A400C                            | 10,15,20  | 400                      | C32/40,<br>C25/30 |

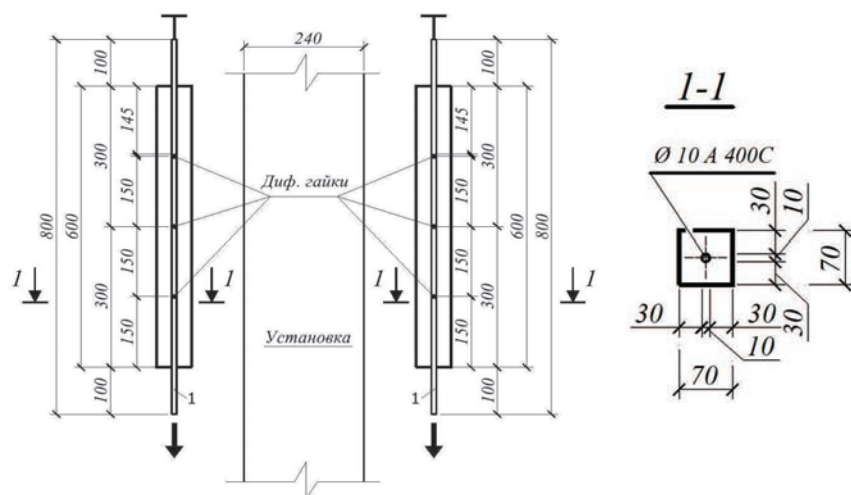


Рис. 1. Схема испытания образцов ЦР-VII-1 и ЦР-VII-2 на центральное растяжение

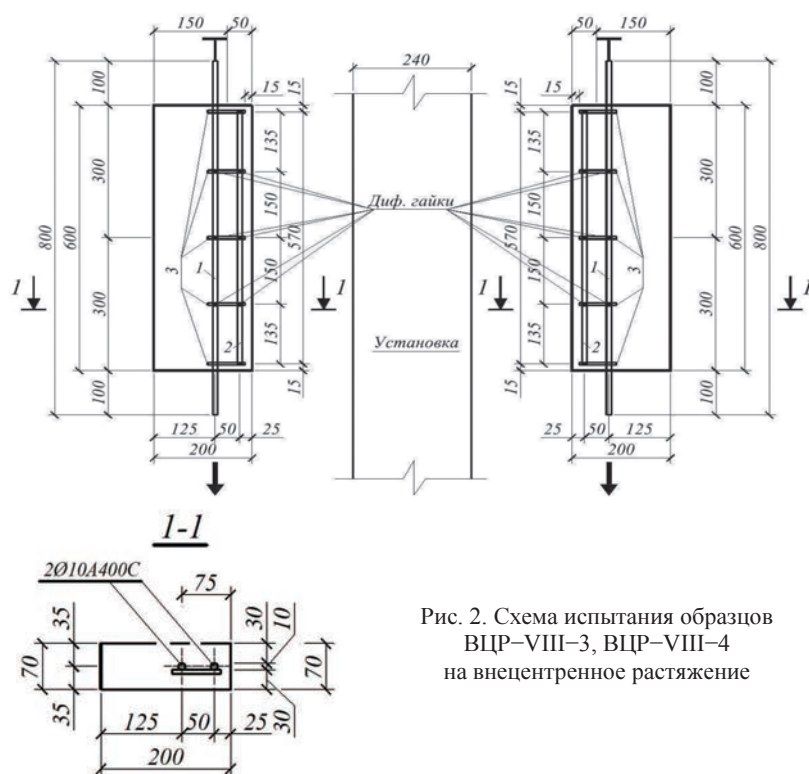


Рис. 2. Схема испытания образцов ВЦР-VIII-3, ВЦР-VIII-4 на внецентренное растяжение

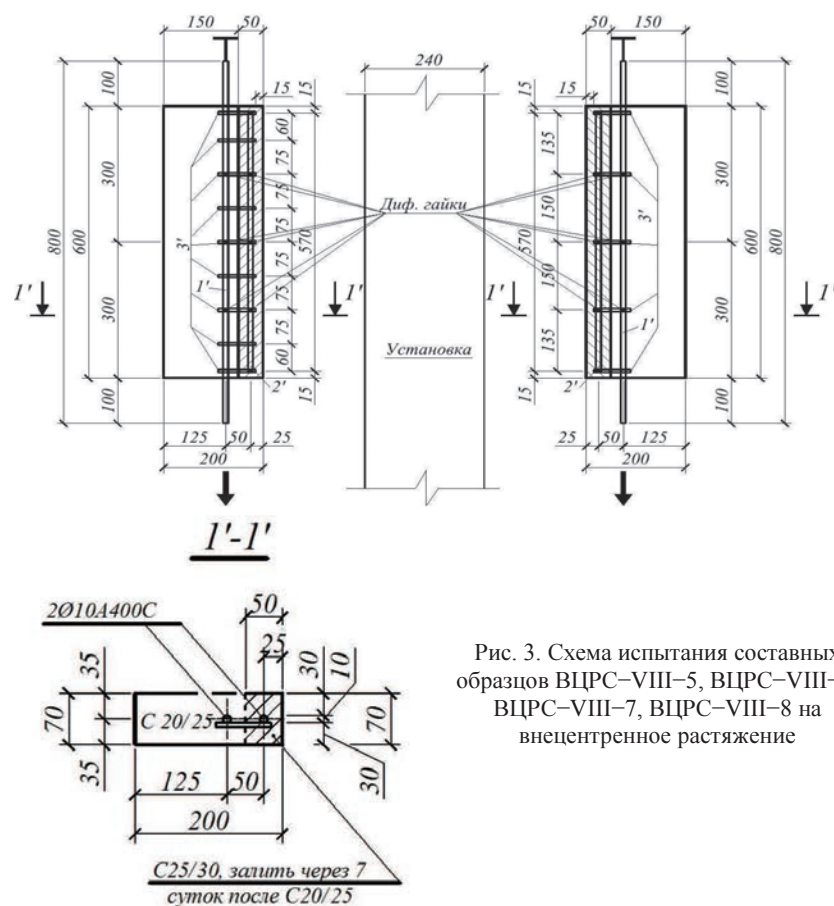


Рис. 3. Схема испытания составных образцов ВЦРС-VIII-5, ВЦРС-VIII-6, ВЦРС-VIII-7, ВЦРС-VIII-8 на внецентренное растяжение

университета. Бетонирование образцов каждой серии выполняли из бетона одного состава в соответствии с требованиями [1]. При этом использовался щебень крупностью 5–10 мм. Фракции просеивались в лаборатории строительных материалов перед бетонировкой строго по ситам.

Для предотвращения растрескивания бетона в зоне передачи растягивающей нагрузки при выдергивании в экспериментальные образцы устанавливалась сетка из гладкой арматуры Ø6 мм класса A240C с размером ячейки 50мм, расположенной на расстоянии 30 мм от верхнего торца (рис. 4).

Механические характеристики арматуры определялись в соответствии с действующими стандартами [2]. При этом было испытано по три стержня длиной 400 мм каждого диаметра. Значения механических характеристик арматурной стали приведены в табл. 2.

Бетонированию предшествовала лабораторная проверка расчетных составов и их корректировка.

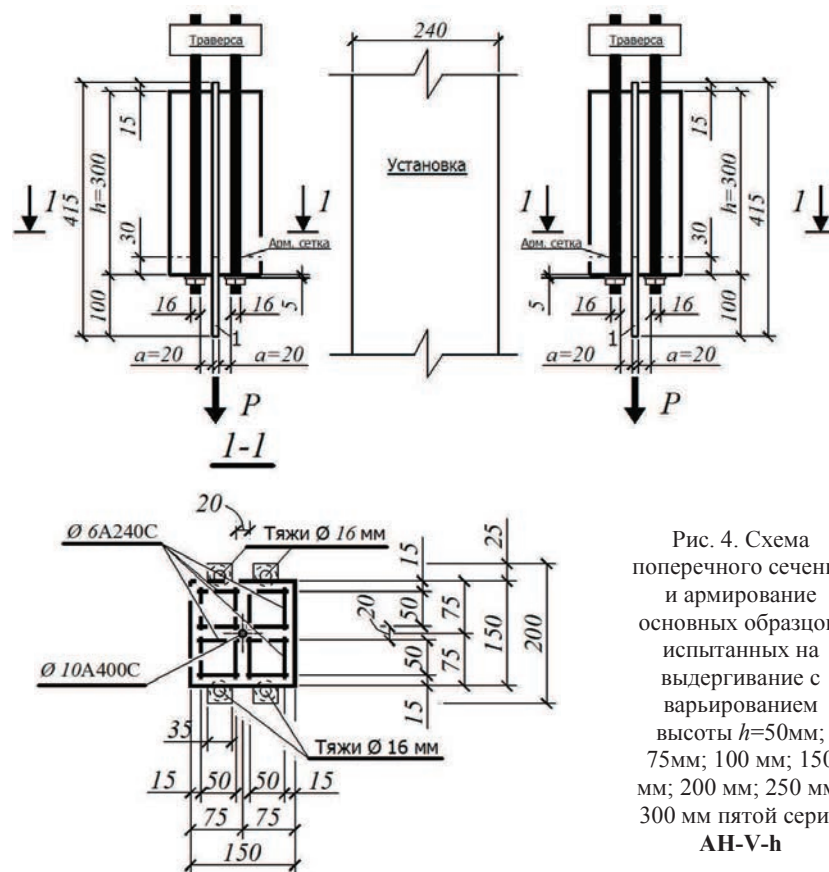


Рис. 4. Схема поперечного сечения и армирование основных образцов, испытанных на выдергивание с варьированием высоты  $h=50$  мм; 75 мм; 100 мм; 150 мм; 200 мм; 250 мм; 300 мм пятой серии **АН-V-h**

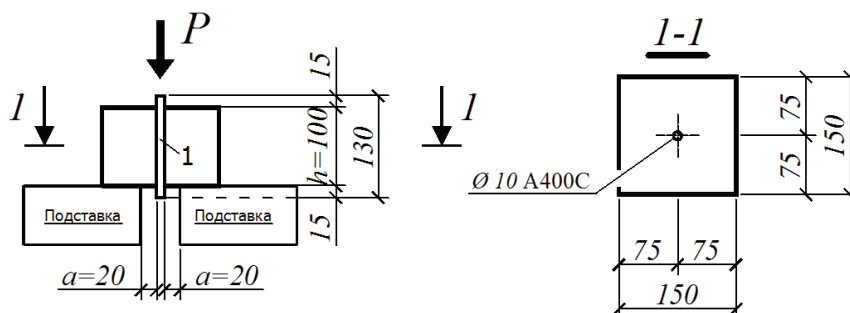
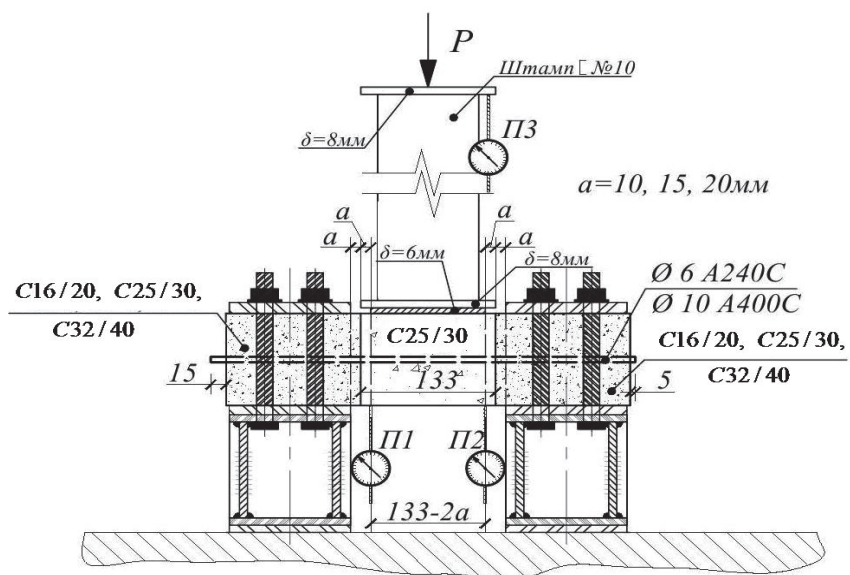
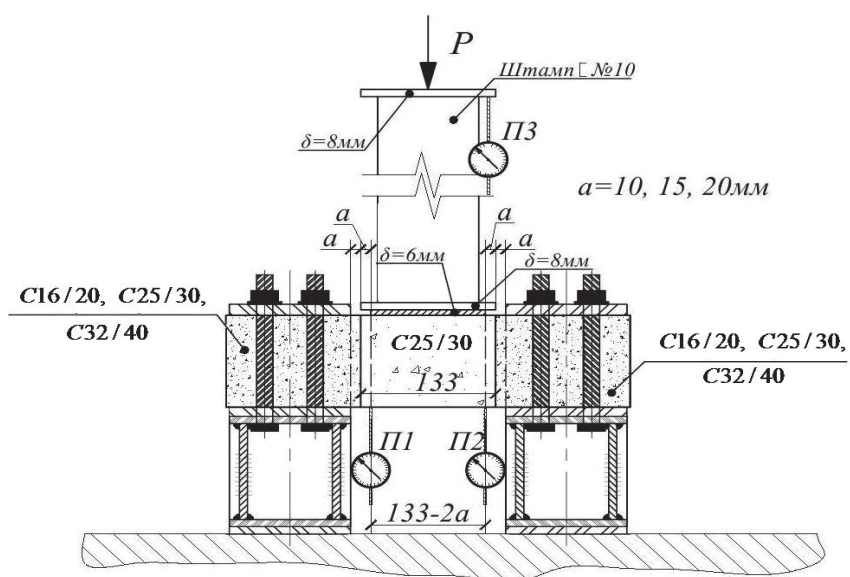


Рис. 5. Схема поперечного сечения и армирование основных образцов на вдавливание с варьированием высоты  $h=50$  мм; 75 мм; 100 мм шестой серии **B-VI-h**:  
1 – вдавливаемый арматурный стержень в бетонный блок





а)



б)

Рис. 6. Схема испытания составных призм на сдвиг:  
а – армированных одним арматурным стержнем; б – без арматуры

Таблица 2

Значения механических характеристик арматурной стали

| Диаметр, класс арматуры | $N$ образца | $A_s$ , мм <sup>2</sup> | $P_y$ , кН | $\sigma_y$ , МПа | $P_u$ , кН | $\sigma_{s,u}$ , МПа |
|-------------------------|-------------|-------------------------|------------|------------------|------------|----------------------|
| 1                       | 2           | 3                       | 4          | 5                | 6          | 7                    |
| A240CØ6мм               | 1           | 28,3                    | 6,699      | 236,72           | 6,900      | 243,82               |
|                         | 2           | 28,3                    | 6,783      | 239,68           | 7,127      | 251,84               |
|                         | 3           | 28,3                    | 6,747      | 238,42           | 6,985      | 246,82               |
| Среднее                 |             | 28,3                    | 6,743      | 238,27           | 7,004      | 247,49               |
| A400CØ10мм              | 1           | 78,5                    | 32,534     | 414,45           | 33,724     | 429,61               |
|                         | 2           | 78,5                    | 32,018     | 407,87           | 32,910     | 419,23               |
|                         | 3           | 78,5                    | 32,372     | 412,38           | 33,243     | 423,48               |
| Среднее                 |             | 78,5                    | 32,308     | 411,57           | 33,293     | 424,11               |



Рис. 7. Опалубка для изготовления экспериментальных конструкций на выдергивание арматуры из бетонной матрицы

Таблица 3

Основные геометрические характеристики опытных образцов

| № серии | Шифр образца   | $h$ , мм | $h_0$ , мм | $b$ , мм | $l$ , мм | $a_s$ , мм | $a'_s$ , мм |
|---------|----------------|----------|------------|----------|----------|------------|-------------|
| 1       | 2              | 3        | 4          | 5        | 6        | 7          | 8           |
| V       | АН-V-50-1,2    | 150      | 120        | 150      | 50       | 75         | 75          |
| V       | АН-V-75-3,4    | 150      | 120        | 150      | 75       | 75         | 75          |
| V       | АН-V-100-5,6   | 150      | 120        | 150      | 100      | 75         | 75          |
| V       | АН-V-200-9,10  | 150      | 120        | 150      | 200      | 75         | 75          |
| V       | АН-V-250-11,12 | 150      | 120        | 150      | 250      | 75         | 75          |
| V       | АН-V-300-13-20 | 150      | 120        | 150      | 300      | 75         | 75          |
| VI      | В-VI-50-1,2    | 150      |            | 150      | 50       | 75         | 75          |
| VI      | В-VI-75-3,4    | 150      |            | 150      | 75       | 75         | 75          |
| VI      | В-VI-100-5,6   | 150      |            | 150      | 100      | 75         | 75          |

Одновременно с основными образцами – железобетонными плосконапряженными конструкциями для определения прочностных и деформативных характеристик бетона в возрасте 28 суток и в момент испытаний – изготавливались вспомогательные бетонные образцы из бетона того же состава: кубы  $100 \times 100 \times 100$  – 12 шт., призмы сплошного сечения  $100 \times 100 \times 400$  – 12 шт.

При этом фактическая прочность кубов бетона на сжатие в соответствии с [3] составила: при сжатии образцов пятой серии (выдергивание) 18,74 МПа, для образцов шестой серии (вдавливание) – 18,23 МПа.

Для призм сплошного сечения фактическая прочность бетона на сжатие составила: для проектного класса бетона С16/20 (выдергивание) – 16,24 МПа, то же, для образцов на вдавливание – 16,62 МПа. Переход к нормативным характеристикам позволяет получить нормативную призмную прочность. Для проектного класса бетона С16/20 (выдергивание) она составляет 13,75 МПа, то же, для образцов на вдавливание – 13,42 МПа. Переход к расчетным характеристикам позволяет получить расчетную призмную прочность. Для проектного класса бетона С16/20 (выдергивание) она составляет 10,57 МПа, то же, для образцов на вдавливание – 10,32 МПа.

Фактическая прочность бетона на растяжение составила: для проектного класса бетона С16/20 (образцы на выдергивание) – 1,523 МПа, то же, для образцов на вдавливание – 1,442 МПа. Нормативная прочность бетона на растяжение составила: для проектного класса бетона С16/20 – 1,172 МПа, то же, для образцов на вдавливание – 1,109 МПа.

Начальные модули упругости бетона для проектного класса бетона С16/20 составили  $2,68 \times 10^4$  МПа (образцы на выдергивание),  $2,63 \times 10^4$  МПа (образцы на вдавливание).

**Методика проведения эксперимента.** Испытания экспериментальных образцов на центральное растяжение (рис. 1), внецентренное растяжение (рис. 2), в том числе составных железобетонных конструкций (рис. 3), на выдергивание (рис. 4) арматурного стержня из бетона и вдавливании арматурного стержня в бетон (рис. 5), а также при сдвиге арматурного стержня вдоль дискретной трещины (рис. 6) с целью исследования процесса сцепления арматуры с бетоном проводились на специально разработанных экспериментальных установках (рис. 8, рис. 10), позволяющих посредством задания нагрузки вручную в режиме постоянного приращения перемещений получить ниспадающую ветвь деформирования, которую нельзя получить при испытаниях, выполняемых в режиме постоянного приращения напряжений (например, на лабораторном прессе).

При разработке методики экспериментальных исследований была предусмотрена группа электротензорезисторов, устанавливаемая на основные образцы при центральном (рис. 1) и внецентренном растяжении (рис. 2), в том числе и на внецентренно-растянутые составные конструкции (рис. 3).

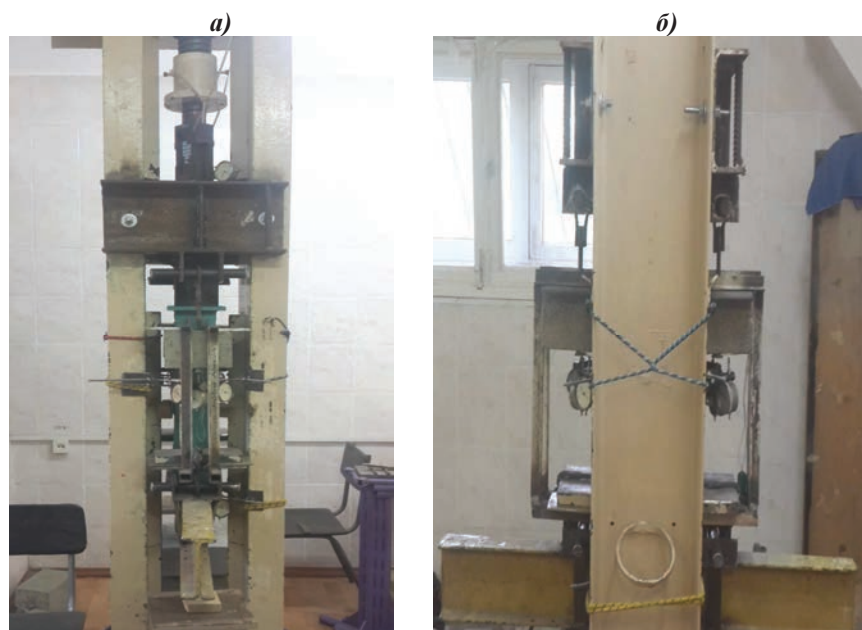


Рис. 8. Экспериментальная установка для испытания образцов на выдергивание арматуры из бетона: *а* – фронтальный вид; *б* – боковой вид



Рис. 9. Экспериментальная установка для испытания образцов на вдавливание арматуры в бетон (*а*) и раскрытие трещины с выдвигением торца образца АН-V-50-1,2 (*б*)

Эта группа электротензорезисторов устанавливалась на бетон на берегах трещин (после их образования) на уровне оси арматуры с помощью клея “Циакрин” (рис. 10). Назначение данной группы электротензорезисторов заключалось в необходимости замера опытных деформаций бетона на уровне оси арматуры в непосредственной близости от трещины.

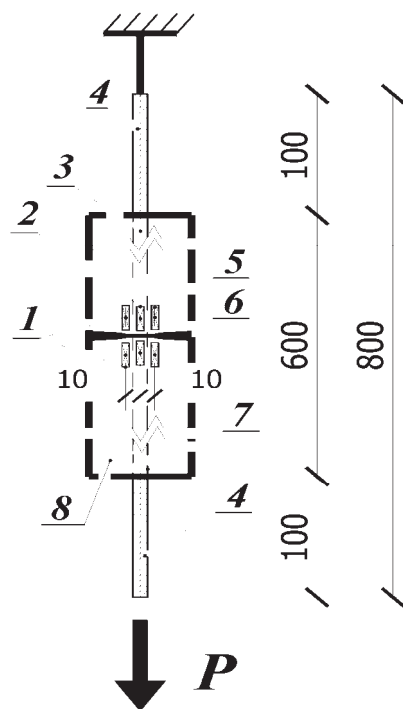


Рис. 10. Расположение группы электротензорезисторов на бетон в опытных образцах (на примере центрального растяжения) на берегах трещин:  
 1 – электротензорезисторы, установленные слева от оси растянутой арматуры (3);  
 2 – электротензорезисторы, установленные вдоль оси растянутой арматуры (3);  
 3 – ось растянутой арматуры (4);  
 4 – исследуемая растянутая арматура;  
 5 – электротензорезисторы, установленные справа от оси растянутой арматуры (3);  
 6 – трещина, появившаяся при нагружении опытного образца;  
 7 – контур арматуры, расположенной в бетонном блоке;  
 8 – опытный образец (представительный объем бетона в виде призмы)

Проводилось кратковременное нагружение образцов. Выдержка на ступени составляла до 20–30 мин. Деформационные воздействия измерялись с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. При этом нагрузка фиксировалась с помощью динамометра. Нагружение передавалось с помощью редуктора через систему штампов.

вертикальное давление штока установки передавалось через динамометр, измеряющий интенсивность нагружения и систему штампов на металлическую двутавровую балку №12, к верхнему поясу которой были приварены металлические уголки L50x4 с отверстиями для размещения в них стержня из круга стального Ø 26мм (марка стали 40Х). Стержни, продевались через специальные петли, выполненные из арматуры Ø 10мм класса А400С, приваренные к металлическим пластинам t=20мм, которые подвешивались на металлические рамки из уголка L50x4. Металлические рамки, в свою очередь, подвешивались на торцы образцов, упираясь в специальные

пластины  $t=10$  мм, расположенные симметрично относительно вертикальной оси образцов.

К концу арматурного стержня, выходящего на 100 мм каждого из образцов, испытываемых на выдергивание, приваривались петли из гладкой арматуры  $\varnothing 8$  мм класса А240С. Образцы через петли подвешивались с обеих сторон установки на стержни из круга стального  $\varnothing 26$  мм (марка стали 40Х), продетые в металлические пластины  $t=10$  мм с отверстиями, которые приваривались к стальным швеллерам [ №18, закрепленным с обеих сторон к стойкам установки посредством приварки к ним.

Таким образом, арматура выдергивалась из представительного объема бетона посредством деформационного воздействия, передаваемого через металлические рамки и пластины на торцы железобетонных призм.

Измерение перемещений арматуры относительно бетона при нагружении выполнялось посредством применения механических индикаторов часового типа ИЧ-10 с базой измерений 10 мм (рис. 11). Прибор П1 использовался для задания нагружения по перемещениям (рис. 11, б), приборы П3, П6 – для измерения вертикальных перемещений арматуры левого и правого образца соответственно и упирались непосредственно в арматурный стержень, выходящий из нижнего торца образца (рис. 11, а, в). Приборы П2/П4 и П5/П7 измеряли перемещения нижнего торца бетона под нагрузкой для левого и правого образца соответственно (рис. 11, а, в) (упирались в нижний торец бетона образцов в левой и правой части сечения относительно арматурного стержня).

Приборы крепились к установке при помощи стальных уголков L50x4 и L40x4, фиксируемых специальными канатами с крюками к стойкам. К уголкам приваривались гайки М6, в которые вкручивалась шпилька  $\varnothing 6$  мм, на которой закреплялась бобышка с прибором. Для создания гладкой и ровной поверхности для упора ножек индикаторов использовалось оргстекло толщиной 1 мм с размерами 40×40 мм, которое крепилось к бетону и арматуре при помощи гипсового раствора. Так как при действии растягивающей нагрузки, выдергивающей арматуру из бетона происходит удлинение арматурного стержня, выдвижение арматуры относительно бетона вычислялось как разница показаний приборов П3/П6 и среднего значения перемещения между показаниями индикаторов П2, П4 / П5, П6 для левого / правого образца соответственно.

Экспериментальная установка на выдергивание арматуры из бетона позволяет проводить испытания одновременно двух образцов. Образцы одной серии (с одинаковыми размерами) испытывались парами, при этом наблюдалось разрушение одного образца, второй образец серии повторно испытывался вместе с другим неразрушенным образцом. Железобетонные призмы с одиночной арматурой, выдергиваемой из бетона испытывались в положении, которое позволяло не только измерять перемещения арматуры относительно бетона, но и наблюдать картину образования, развития и



раскрытия трещин на торце и по бокам, а также выдвижения торца околоарматурной зоны.



Рис. 11. Индикаторы часового типа (ИЧТ), используемые для измерения перемещений арматуры относительно бетона при испытании на выдергивание:

*а* – ИЧТ П2, П3, П4 (слева направо) для левого образца;

*б* – ИЧТ П1 задания нагрузки по перемещениям; *в* – ИЧТ П5,6,7 (слева направо) для правого образца

Расположение образцов, испытываемых на вдавливание было менее информативным ввиду меньших размеров испытательной установки (рис. 9), но при этом все необходимые параметры для экспериментального исследования сцепления арматуры с бетоном при вдавливании были получены.

При испытании на вдавливание арматурного стержня в бетон вертикальное сжимающее давление от установки передавалось через динамометр и стальную балку из 2 [ №12, сваренных между собой на

отшлифованную поверхность арматурного стержня образца. Для фиксации балки в строго горизонтальном положении использовались деревянные вкладыши, располагаемые между полками, ребрами балки и стойками установки.

Вертикальные перемещения арматуры относительно бетона измерялись при помощи индикатора часового типа ИЧТ-10, ножка которого упиралась в нижний пояс стальной балки. Прибор крепился к установке также, как и приборы при испытании на выдергивание арматуры из бетона.

**Выводы.** Таким образом, на основании разработанной методики экспериментальных исследований сцепления арматуры с бетоном, представляется возможным получить достоверные данные о сложном деформированном состоянии околостержневой зоны торца бетона и характере взаимодействия арматуры с бетоном при растяжении арматурного стержня в представительном объеме бетона; выдергивании арматурного стержня из бетона; вдавливании арматурного стержня в бетон и сдвиге вдоль дискретной трещины с варьированием длины анкеровки, классов бетона, арматуры и диаметров арматуры с учетом ниспадающей ветви деформирования. Предложенная методика экспериментальных исследований охватывает широкий круг вопросов, которые так необходимы при разработке новых, более усовершенствованных зависимостей (законов) сцепления и усовершенствовании на их основе методик расчета железобетонных конструкций и их отдельных элементов.

1. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та залізобетонні. Загальні технічні умови : (EN 206-1:2000, NEQ), ДСТУ Б В.2.7-176:2008. – [Чинний з 2009-09-30]. – К. : Мінеріонбуд України, 2010. – 109 с. – (Національний стандарт України). 2. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій : ДСТУ 3760:2006. – [Чинний з 2007-10-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 28 с. – (Національний стандарт України). 3. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона: ДСТУ Б В.2.7-217:2009. – [Чинний з 2009-09-01]. – К. : Мінеріонбуд України, 2010. – 16 с. – (Національний стандарт України).