

## **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ**

Колчунов В.И., Яковенко И.А., Усенко Н. В., Приймак А.А.

Национальный авиационный университет  
г. Киев, Украина

**АННОТАЦИЯ:** В статті розроблено методику експериментальних досліджень залізобетонних складених конструкцій по похилим перерізам при деформаційному навантаженні, яка дозволяє визначити параметри тріщиностійкості, відстані між тріщинами у прогоні «зрізу» та переконатися в адекватності розрахункових гіпотез.

**АННОТАЦИЯ:** В статье разработана методика экспериментальных исследований железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям при деформационном нагружении, которая позволяет определить параметры трещиностойкости, расстояний между трещинами в пролете «среза» и убедиться в адекватности расчетных гипотез.

**ABSTRACT:** The experimental researches methodology of reinforced concrete component constructions on sloping sections at deformation loading is worked out in the article. It determines parameters of cracking, distances between cracks in the span "section" and makes sure in adequacy of calculation hypotheses.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Железобетонные составные конструкции, трещиностойкость, наклонные сечения, деформационное нагружение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Экспериментальные исследования трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям проведены лишь в единичных случаях с ограниченным количеством изучаемых параметров [1, 2]. На сегодняшний день практически отсутствуют фактические данные о напряженно-деформированном состоянии и взаимных смещениях в зо-

нах, прилегающих к шву между разными бетонами; не исследован этот вопрос в тех случаях, когда шов расположен в сжатой или растянутой зонах; не изучены возникающие при этом эффекты, связанные с нарушением сплошности железобетона; не выявлен характер влияния на трещиностойкость железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям при деформационном нагружении. Мало опытных данных о длине и приращении трещин при увеличении деформационной нагрузки. Тем не менее отмеченные параметры являются определяющими для анализа сопротивления областей, прилегающим к местам пересечения трещинами рабочей арматуры, где, как показали последние исследования [1, 2 и др.], возникает эффект нарушения сплошности (деформационный эффект).

Достаточно отметить, что влияние такого эффекта на равновесие усилий в поперечном сечении по результатам обработки опытов Немировского [3, 4], может составлять около 40%. Такое влияние заметно возрастает, когда речь идет о таком дифференциальном параметре, как трещиностойкость.

Такие сведения необходимы, прежде всего, по двум причинам. С одной стороны, это позволит заметно уточнить зависимости для определения основных параметров железобетонных составных конструкций (в частности  $R_{sup,cr,c}$ ), а с другой – эта информация может дать более полное представление об особенностях сопротивления железобетона в целом.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводятся *с целью* выявления закономерностей трещинообразования железобетонных конструкций составного сечения при совместном деформационном действии изгибающего момента и поперечной силы и определения основных параметров, с учетом взаимных смещений арматуры и бетона, эффекта нарушения сплошности и его анализа на различных стадиях нагружения, а также для разработки рекомендаций по эффективному проектированию железобетонных составных конструкций.

В процессе экспериментальных исследований решаются следующие **задачи**:

- 1) разработка методики экспериментальных исследований трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям при деформационном нагружении;
- 2) проверка предлагаемого расчетного аппарата по уточненному расчету трещиностойкости железобетонных составных конструкций по

наклонным сечениям с учетом взаимных смещений арматуры и бетона и эффекта нарушения сплошности;

3) изучение закономерностей напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций составного сечения при деформационном нагружении;

4) экспериментальное определение следующих параметров: значения опорной реакции  $R_{sup.crc}$  в момент образования наклонных трещин в пролете «среза»; фактической высоты сжатой зоны  $x_{fact}$  в сечении I–I (поперечное сечение, проходящее в конце пролета «среза», в зоне действия сосредоточенной силы, по краю опорной пластинки) и высоты сжатого бетона над наклонной трещиной; расстояние по горизонтали  $X$  и по вертикали  $Y$  от опорной реакции и от геометрической оси, соответственно; прогибов; ширины раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  и длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения деформационной нагрузки (с проверкой многоуровневого процесса образования трещин); деформаций сжатого бетона по обе стороны от шва и средних деформаций арматуры.

## КОНСТРУКЦИИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Программа исследований включает лабораторные испытания пяти серий железобетонных конструкций. Объем и основные параметры экспериментальных конструкций приведены в табл. 1 и на рис. 1. Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования диаметра и шага хомутов, продольного армирования, класса основного и дополнительного бетонов и пролета «среза». Для доведения до разрушения второго пролета среза опытной конструкции, используются специальные стяжки, состоящие из шпилек и металлических пластин.

Механические характеристики арматуры определялись в соответствии с действующими стандартами. При этом было испытано по пять стержней длиной 400 мм каждого диаметра.

Фактическая физическая (условная) граница текучести для арматурных стержней составила: гладкой арматуры A240CØ6мм – 256,4МПа, гладкой арматуры A240CØ10мм – 256,2 МПа, арматурных стержней периодического профиля A400CØ10мм – 425,5 МПа, A400CØ16мм – 427,8 МПа.

Изготовление балок осуществлялось в лаборатории строительных конструкций кафедры компьютерных технологий строительства Национального авиационного университета. Состав бетонов (по весу) приведен в табл. 2. При этом использовался щебень крупностью 5...10 мм. Фракции

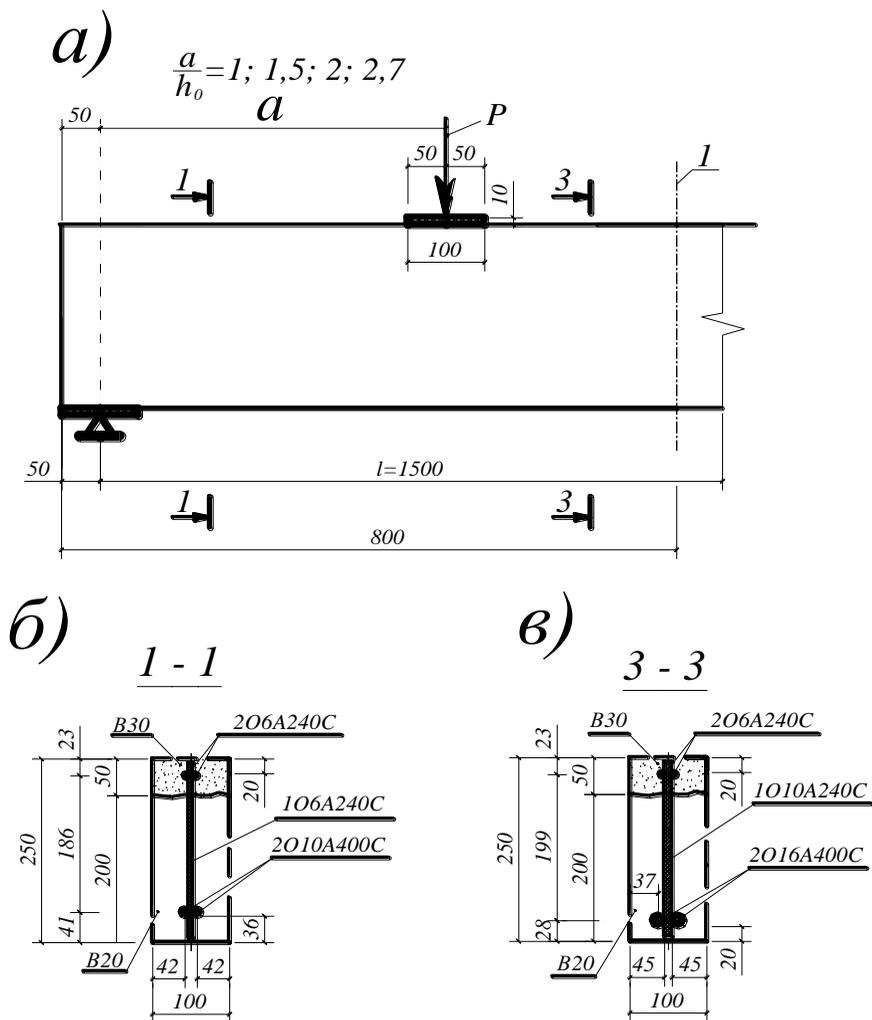


Рис. 1. Схема деформационного нагружения опытных железобетонных составных конструкций (а); поперечное сечение 1-1 и 3-3 соответственно (б), (в)

просеивались в лаборатории строительных материалов перед бетонировкой строго по ситам. Бетонированию предшествовала лабораторная проверка расчетных составов и их корректировка.

Одновременно с основными железобетонными составными конструкциями для определения прочностных и деформативных

Объем, серии и характеристики основных экспериментальных конструкций

№ серии	Шифр конструкции	$h$ , мм	$b$ , мм	$l$ , мм	Арматура растянутой зоны, диаметр – мм, класс	Арматура сжатой зоны, диаметр – мм, класс	Высота слоя старого бетона, мм	Высота слоя бетона усиления, мм	Класс бетона основного образца	Класс бетона усиления
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	БО-I-1,5-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-I-1,5-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-I-1,5-150	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-I-1,5-150	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-I-1,5-100- $l_x$	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-I-1,5-100- $l_x$	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
II	БО-II-2,7-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-II-2,7-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
III	БО-III-2,7-100-320	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-III-2,7-100-320	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БС-III-2,7-100-Ø10 (Ø6 A240C)	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БС-III-2,7-100-Ø10 (Ø10 A400C)	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
IV	БО-IV-1,0-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-IV-1,0-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
	БО-IV-1,0-150	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-IV-1,0-150	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30
V	БО-V-2-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	250	–	B20	–
	БС-V-2-100	250	100	1600	2Ø10A400C	2Ø6A240C	200	50	B20	B30

Примечание. Шифр конструкции включает номер серии, **БО** или **БС** – балка обычного или составного сечения соответственно; 1,5; 2,7; 1,0; 2,0 – пролеты среза; 100; 150; 320 – шаг поперечной арматуры; Ø6, Ø10 – диаметры поперечных стержней в шве, в зоне чистого изгиба;  $l_x$  – конструкции с недостаточной анкерровкой; арматура Ø6A240C раскатывается из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло вытяжки на площадке текучести); после разрушения одного из пролетов среза на него устанавливается стяжка и до разрушения доводится второй пролет среза

характеристик бетона в возрасте 28 суток и в момент испытаний, – изготавливались вспомогательные бетонные образцы из бетонов того же состава: кубы 100×100×100 – 18 шт., призмы сплошного сечения 100×100×400 – 18 шт., составные бетонные призмы 100×100×400 – 24 шт. и составные армированные призмы 100×100×400 – 48 шт.

При этом фактическая прочность кубов бетона на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180–90 составила: для сжатой зоны (домоноличивание новым бетоном) образцов всех серий – 37,7 МПа, для образцов всех серий (растянутой зоны) – 25,8 МПа.



Рис. 2. Опалубочные формы

Таблица 2

**Состав бетона опытных образцов**

Класс бетона	$\bar{R}$ , МПа	В:Ц	Марка цемента	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> бетона в кг				Осадка конуса, см
				цемент	песок	щебень	вода	
В20	25,69	0,6	M400	337	741	1111	202	6...8
В30	37,67	0,48	M400	440	630	1149	211	6...8

Опалубка для бетонирования основных образцов приведена на рис. 2. Она включает деревянные формы, покрытые жстью.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Железобетонные образцы испытываются в горизонтальном положении (со свободным доступом к растянутой зоне), что позволяет детально изучить картину образования, развития и раскрытия трещин. Испытательная установка позволяет реализовывать намеченную схему нагружения с заданными пролетами «среза» (рис. 1, а, 3). Здесь же приведено размещение механических приборов. На рис. 4, а показаны зоны установки электротензорезисторов базой 20 мм.

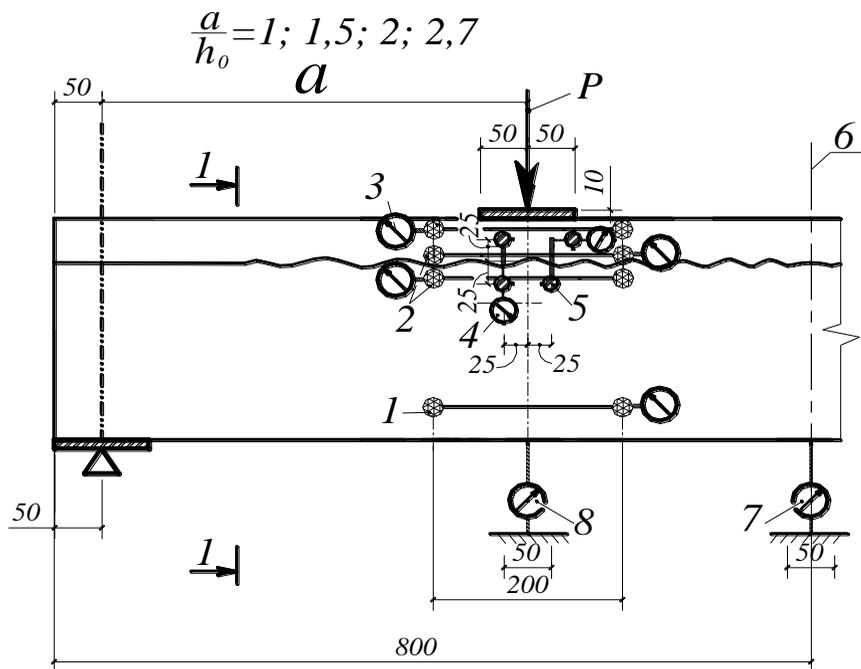


Рис. 3. Нагружение опытных железобетонных составных конструкций и схема расположения механических приборов:

- 1 – механические приборы, расположенные на оси арматуры с помощью специальных приваренных гаек с одетыми на них резиновыми шлангами;
- 2 – механические приборы, расположенные на берегах шва;
- 3 – механические приборы, расположенные на сжатой фибре бетона; 4, 5 – механические приборы, расположенные на берегах шва для измерения его вертикальных и горизонтальных смещений; 6 – ось симметрии опытной конструкции; 7, 8 – прогибомеры, расположенные в середине опытной конструкции и по линиям действия сил, соответственно

Учитывая, что исследования такого дифференциального параметра, как ширина раскрытия трещин, проводятся с позиции механики разрушения, то это находит отражение в методике проведения эксперимента. Электротензорезисторы устанавливаются по высоте поперечного сечения экспериментальных конструкций основных серий в фибровых волокнах, в местах определения нулевой точки, т. е. перехода от удлинения к укорочению и в сжатой зоне бетона (рис. 4, а). Целью установки электротензорезисторов является изучение распределения деформаций по высоте сжатой зоны и в окрестности, прилегающей к шву, определения размеров сжатой зоны и фактической высоты развития трещин.

При разработке методики экспериментальных исследований предусматриваются четыре группы электротензорезисторов на основные опытные железобетонные составные конструкции, и на вспомогательные составные призмы из разных классов бетонов (В30/В30/В30, В20/В30/В20).

**I группа электротензорезисторов** (рис. 4, а). Электротензорезисторы устанавливаются по высоте поперечного сечения I–I экспериментальных железобетонных составных конструкций основных серий в фибровых волокнах, в местах определения нулевой точки, т. е. перехода от удлинения к укорочению, а также на берегах шва (на расстоянии 5 мм от шва) и в слоях, прилегающих к шву между бетонами на расстоянии 10 мм между их центрами. Целью установки электротензорезисторов является изучение распределения деформаций по всей высоте сжатой зоны, определение размеров сжатой зоны и фактической высоты развития трещин. Электротензорезисторы устанавливаются цепочкой по высоте образцов по обе стороны шва (“старого” и “нового”) бетонов. Для обеспечения надежности и дополнения опытной информации предусматриваются мембранные розетки (составляющие II группу электротензорезисторов), расположенные в двух одинаково напряженных (симметричных) сечениях.

**II группа электротензорезисторов** – мембранные розетки, наклеенные на бетон в прилегающих к шву слоях “старого” и “нового” бетонов – рис. 4, а. Целью их установки является исследование сложного напряженно-деформируемого состояния в слоях “старого” и “нового” бетонов, прилегающих к шву. Розетки устанавливаются в зоне сечения I–I экспериментальных составных конструкций, расположенных на расстоянии 25 мм от шва между бетонами, симметрично цепочке электротензорезисторов, составляющих группу I. Цепочка включает в себя две розетки, уставленные с зазором 25 мм к шву. В случае выхода из строя одной из розеток, информацию получаем от электротензорезисторов I группы.

**III группа электротензорезисторов** – розетки над опасной косою трещиной в сжатом бетоне, в зоне, прилегающей к сечению I–I, необходимые для выявления характера разрушения в исследуемой зоне. Схема размещения розеток приведена на рис. 4, а.

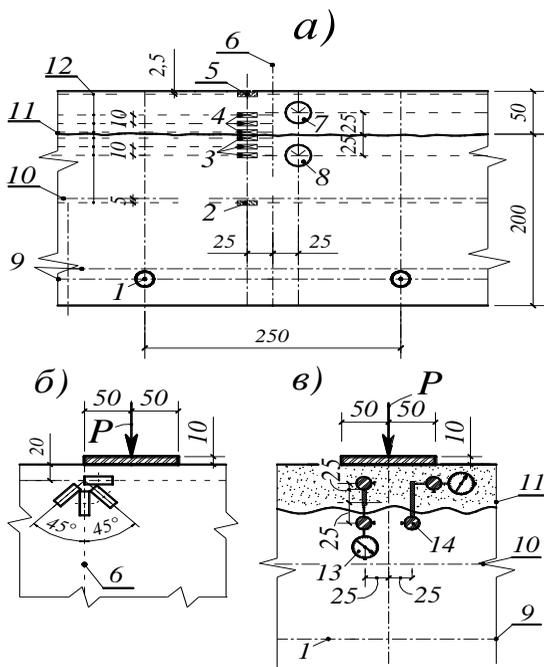


Рис. 4. Схема расположения первой, второй группы электротензорезисторов и механических приборов в исследуемых зонах железобетонных составных конструкций: а) – схема расположения первых двух групп электротензорезисторов и расположение механических приборов вдоль оси продольной арматуры; б) – схема размещения розеток в зоне сечения I–I над опасной наклонной трещиной; в) – схема расположения механических приборов для определения линейных деформаций и деформаций сдвига в окрестности шва; 1 – гайки, приваренные к рабочей арматуре, расположенные перпендикулярно к оси растянутой арматуры 9; 2 – электротензорезисторы, расположенные снизу от нейтральной оси 11; 3 – то же, расположенные в зоне бетона основной конструкции, прилегающей к шву; 4 – то же, в зоне бетона усиления, прилегающей к шву; 5 – то же, расположенные вдоль фибровых волокон бетона усиления; 6 – сечение 1–1; 7 – мембранные розетки электротензорезисторов, расположенные в зоне бетона усиления, прилегающей к шву; 8 – то же, в зоне бетона основной конструкции; 9 – центральная(ые) ось (оси) растянутой арматуры; 10 – средняя нейтральная ось образца; 11 – шов между бетонами; 12 – центральные оси расположения электротензорезисторов, установленных на бетон; 13 – И1 – индикатор часового типа с ценой деления 0,001 мм для измерения линейных деформаций; 14 – И2, то же, для измерения деформаций сдвига

Для повышения достоверности экспериментальных данных работа электротензорезисторов дублируется (там, где это возможно) с помощью механических приборов (с ценой деления 0,001мм) (рис. 4, в). При этом также устанавливаются механические приборы вдоль оси наиболее растянутой арматуры (рис. 4, а), которые дают возможность определить средние деформации арматуры и в сочетании с другими механическими приборами и тензорезисторами, – проверить гипотезу плоских сечений в сечении I–I для средних деформаций в пределах каждого из составляющих стержней.

В окрестности шва между бетонами устанавливаются механические приборы для определения местных линейных деформаций в направлении перпендикулярном к шву (индикатор часового типа с ценой деления 0,001мм – *И1*) и местных деформаций сдвига вдоль шва (индикатор часового типа с ценой деления 0,001мм – *И2*). Схема их расположения приведена на рис. 4, в.

Для измерения максимальных прогибов также устанавливаются прогибомеры (с ценой деления 0,01 мм) – рис. 3 (установленные прогибомеры на опорах на рис. 3 условно не показаны). С целью исключения влияния окружающего бетона на положение гаек при деформациях, на гайки надеваются специальные резиновые трубки перед бетонировкой, а торцы гаек закрываются с помощью пластилина (рис. 3, 4, а).

Перед началом испытаний производится тщательное освидетельствование конструкции, т.е. отмечаются начальные трещины, раковины, искривления и пр.

С целью извлечения максимума информации каждый образец испытывается с доведением до разрушения. Нагружение железобетонных составных конструкций осуществляется плавно, – мелкими ступенями, составляющими  $0,1 M_{cre}$ . Это необходимо для выявления особенностей деформирования при образовании трещин первого, второго и т.п. уровней. Выдержка на ступенях контрольной нагрузки по трещиностойкости и жесткости осуществляется в течение часа. Выдержка на всех ступенях, кроме контрольной, для проверки жесткости и трещиностойкости составляет 0,5 часа. В процессе кратковременного нагружения отсчеты по механическим приборам и датчикам снимаются дважды на этапе: сразу после приложения нагрузки и после выдержки.

Перед ожидаемым моментом трещинообразования растянутая зона каждой балки тщательно осматривается, появление трещин фиксируется визуально и с помощью микроскопа МПБ-2 с 24-х кратным увеличением и ценой деления 0,05 мм с точностью до 0,025 мм. По мере дальнейшего нагружения проводятся наблюдения за появлением новых трещин и развитием уже имеющихся; замеряется ширина раскрытия трещин на двух боковых гранях в выше отмеченных уровнях вдоль всего профиля трещины.

Зарисовка трещин производится на специальных планшетах. Во время проведения экспериментальных исследований, с помощью микро-

скопа МПБ-2 замеряется ширина раскрытия трещин на уровне оси продольной рабочей арматуры и поперечных стержней, а также в нескольких местах по направлению развития трещины. Картина трещин, их раскрытие и распространение на каждой ступени наносится на специальные планшеты в масштабе 1:1. Кроме основных образцов испытываются вспомогательные составные призмы, состоящие из отдельных объемов (с разными классами бетона), разделенных швами. В ходе проведения экспериментальных исследований была разработана испытательная установка (рис. 5), которая позволила реализовывать схему исследования податливости зон, прилегающих к шву разных классов бетона (по два шва в каждой).

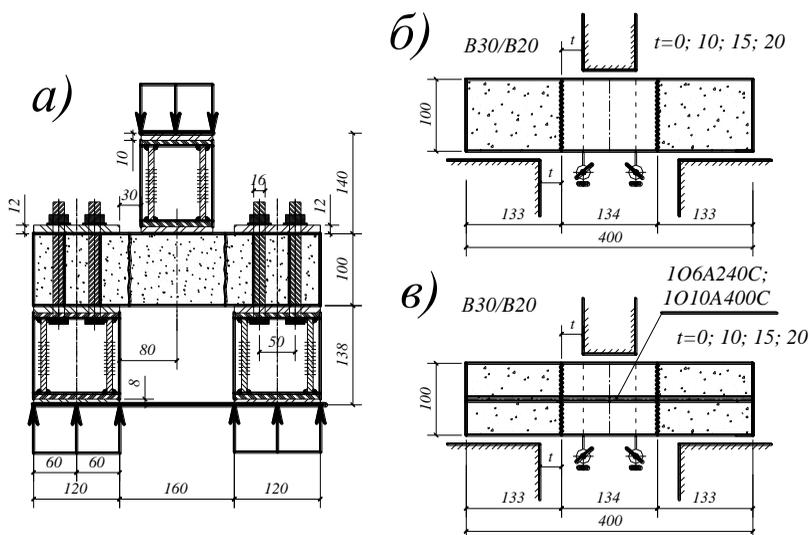


Рис. 5. Экспериментальные исследования податливости шва: а – схема нагружения составных призм; б) – призмы бетонные составные 400×100×100; в) – призмы армированные составные 400×100×100

**IV группа электротензорезисторов** (установка розеток на составные призмы 400×100×100). Аналогично второй группе датчиков, мембранные розетки устанавливаются по 1 розетке с каждой стороны шва. Центр розетки располагается на расстоянии 25мм от шва.

В качестве механических приборов в составных бетонных призмах используются индикаторы часового типа *И2* с ценой деления 0,001мм, для измерения местных линейных деформаций в направлении перпендикулярном к шву, а также индикаторы часового типа *И1* с ценой деления 0,001мм для измерения местных деформаций сдвига вдоль шва между бетонами.

Схема установки механических приборов в окрестности шва на составных призмах аналогична рис. 4, в.

Для измерения прогибов составных призм на удалении 1 см, 1,5 см, 2 см от шва устанавливаются прогибомеры (с ценой деления 0,01 мм).

На достоверность и правильность экспериментальных данных влияет тот факт, что на опытные образцы устанавливаются не только дублирующие группы электротензорезисторов, но также механические приборы и розетки.

Таким образом, на основании разработанной методики экспериментальных исследований железобетонных составных конструкций, представляется возможным получить достоверные данные о сложном напряженно-деформированном состоянии в исследуемых пролетах «среза».

Предложенная методика экспериментальных исследований охватывает широкий круг вопросов, которые так необходимы при разработке нового расчетного аппарата составных железобетонных конструкций.

Подготовленные экспериментальные исследования, представляют возможность проверки достоверности расчетного аппарата трещиностойкости по наклонным сечениям, расстояний между трещинами в пролете «среза» (при проверке многоуровневого процесса их образования) и убедиться в адекватности рабочих гипотез при варьировании диаметра и шага хомутов, продольного армирования, класса основного и дополнительного бетонов, пролета «среза», и в заметной степени дополняют имеющийся фактический материал.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колчунов В.И. Методика экспериментальных исследований внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиливаемых при реконструкции / В.И. Колчунов, И.А. Яковенко // Будівництво України. – К. : 2008. – Вип. 4. – С. 25–28.
3. Яковенко И.А. Методика экспериментальных исследований растянутого бетона между трещинами составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций / И.А. Яковенко, Г.К. Биджосян // Будівництво України. – 2011. – Вип. 5. – С. 33–37.
4. Немировский Я. М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещинами и пересмотр на этой основе теории расчета деформации раскрытия трещин / Я.М. Немировский // Прочность и жесткость железобетонных конструкций ; под. ред. А.А. Гвоздева. – М. : Стройиздат, 1968. – С.152–173.
5. Немировский Я.М. Пересмотр некоторых положений теории раскрытия трещин в железобетоне / Я.М. Немировский // Бетон и железобетон. – 1970. – № 3. – С. 5–8.

Статья поступила в редакцию 06.03.2013 г.