

УДК 624.012, 539.24

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ АРМАТУРЫ И  
БЕТОНА ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Григорян Д. Г., Ширинян Р. А.

Գ. Հ. Գրիգորյան, Ռ. Ա. Շիրինյան

Անրանի և բետոնի համատեղ աշխատանքի ուսումնասիրումը  
բևեռա-օպտիկական մեթոդով

Գիտարկվում է անրանի և բետոնի առաձգականության մոդուլների ազդեցությունը միմյանց համատեղ աշխատանքի վրա: Այդ նպատակով անրանի և բետոնի աշխատանքը մոդելավորվել և ուսումնասիրվել է բևեռա-օպտիկական մեթոդով: Բերված են տարբեր մոդելներում իզոխրոնների նկարների օրինակներ, ինչպես նաև կոմպենսացման մեթոդով որոշված կոնտակտի մակերևույթում գործող շոշափող լարումների բաշխվածություններ՝ ըստ ներքևակի անրակցման երկարության:

D. H. Grigoryan, R. A. Shirinyan

Researching of the combined action of the reinforcing steel and concrete  
by photo-elasticity method

Рассматривается влияние модулей упругости арматуры и бетона на их совместную работу. С этой целью работа арматуры и бетона была смоделирована в исследована поляризационно-оптическим методом. Приведены примеры картинок изохром на разных моделях, а также распределение действующих касательных напряжений на поверхности контакта по длине заделки вкладышей, определенное методом компенсации.

В основе применения железобетона в конструкциях лежит совместная работа бетона и арматуры, которая в действующих нормах [1] оценивается длиной зоны анкерования обычной арматуры, равной:

$$\ell_{\text{ан}} = \left( \omega_{\text{ан}} \cdot \frac{R_s}{R_b} + \Delta\lambda_{\text{ан}} \right) \cdot d \quad (1)$$

где  $R_s$  – расчетное сопротивление арматуры для предельных состояний первой группы,  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для предельных состояний первой группы,  $d$  – номинальный диаметр арматуры,  $\omega_{\text{ан}}$  и  $\lambda_{\text{ан}}$  – коэффициенты.

Длина зоны передачи напряжений для напрягаемой арматуры определяется по аналогичной формуле. В обоих случаях длина зоны анкерования зависит от прочности бетона  $R_b$ . Достаточно ли этой характеристики для того, чтобы описать влияние свойств бетона на сцепление? На этот вопрос нельзя ответить однозначно. Для плотных бетонов естественного твердения при хорошо подобранном составе, обеспечивающем нормальную структуру и небольшую усадку, параметры сцепления удастся связать с прочностью бетона. Но если эти условия не выполнены, картина изменяется.

Так, при изучении влияния пропаривания бетона на сцепление с арматурой, было обнаружено, что при равной кубиковой прочности, бетон, подвергшийся пропариванию, имеет лучшее сцепление, чем бетон нормального твердения [2].

При горизонтальном положении арматуры, когда слой бетона под ней превышает 8–12 см, начинает заметно сказываться явление, которое условно называют "осадкой" бетона. Дело в том, что в результате явлений, происходящих в бетоне, под арматурой возникает слой бетона с недостаточной плотностью, а иногда даже зазор [3]. Итак, мы вновь убеждаемся в недостаточности кубиковой прочности, как единственной характеристики свойств бетона для определения  $l_{ан}$ .

По формуле (1) прочность анкерówki прямо пропорциональна кубиковой прочности бетона, а повышение прочности бетона приводит к увеличению усадки, что, в основном, негативно влияет на сцепление арматуры с бетоном, в результате, когда мы увеличиваем прочность бетона, длина зоны анкерówki может не уменьшаться, а наоборот, увеличиваться [4].

Вышеуказанное обстоятельство относится как к тяжелым бетонам, так и к легким. А для легких бетонов доказательства недостаточности кубиковой прочности как единственной характеристики сцепления бетона с арматурой более очевидны. Так как заполнители для их изготовления более разнообразны, т. е. в зависимости от заданных условий, бетоны одной и той же прочности могут существенно отличаться по составу и иметь в связи с этим различные свойства. Если принять, что при одинаковых условиях твердения и неизменном составе прочность тяжелого бетона возрастает практически в той же степени, что и прочность анкерówki, то для бетонов на пористых заполнителях подобная связь между прочностью бетона и его анкерующей способностью не характерна. Это можно объяснить следующим образом: в легких бетонах в отличие от тяжелых, заполнители, имея относительно малую прочность, различным образом влияют на кубиковую прочность бетона и прочность анкерówki.

В действующих в РА пособиях по проектированию обычных [5] и преднапряженных [6] железобетонных конструкций длина  $l_{ан}$  для всех видов легких бетонов на естественных пористых заполнителях при одинаковой их прочности с тяжелым бетоном должна быть увеличена на 20%. Однако, теоретические и экспериментальные исследования [7], [8] показывают, что при описании длины зоны анкерówki кроме прочности бетона и величины, участвующих в формуле (1), должно учитываться и значение модуля упругости бетона  $E_b$ , тем более, что в конструктивных легких бетонах [5], [6] на местных заполнителях РА, при одинаковой прочности, модули упругости бетонов могут отличаться до 25% в зависимости от их плотности и вида заполнителя.

В табл. 1 приведены значения модулей упругости тяжелых и легких бетонов в зависимости от их класса по прочности на сжатие.

Таблица 1

Класс бетона	Модуль упругости бетона		$E_r/E_b$
	тяжелого $E_r \times 10^{-3}$ , МПа	легкого $E_r \times 10^{-3}$ , МПа	
B10	18.0	14.0	1.28
B20	27.0	17.0	1.59
B25	30.0	18.5	1.62

Как видно из табл. 1, при одинаковой прочности, модули упругости тяжелых и легких бетонов в значительной мере различаются друг от друга. Естественно, что при таких условиях принятие единого коэффициента в формуле (1) неправильно.

По результатам опытов, проведенных в этом направлении [9], после достижения возраста, близкого к 28-дневному, прочность бетона увеличивается более медленно, чем уменьшается длина зоны анкеровки. Авторы объясняют это явление тем, что наличие пористых гранул заполнителей, ограничивающих существенным образом кубиковую прочность, необязательно должно ограничивать анкерующую способность бетона, так как гранулы пористого заполнителя оказывают непосредственное влияние на кубиковую прочность, являясь в момент достижения предельных деформаций и образования микротрещин очагами концентрации местных напряжений, а на прочность анкеровки пористый заполнитель оказывает косвенное влияние, поскольку он отделен от арматуры слоем цементно-песчаного раствора.

Учитывая данное обстоятельство, мы попытались выяснить влияние отношения модулей упругости арматуры и бетона на распределение касательных напряжений, образующихся на поверхности контакта арматуры и бетона. Учитывая сложное распределение напряжений и деформаций на поверхности контакта, они определялись поляризационно-оптическим методом, который обладает преимуществом по сравнению с механическими и оптическими тензометрами, так как он выявляет общую картину распределения напряжений, тогда как тензометры дают сведения лишь для отдельных точек. Эта особенность метода позволяет сравнительно легко исследовать поля напряжений для всех точек [10].

Для исследования совместной работы арматуры и бетона поляризационно-оптическим методом, в изготавливаемых моделях в качестве оптически активного материала были выбраны пластины толщиной 5,5 мм, изготовленные из эпоксидной смолы марки ЭД-16 (фиг.1), модуль упругости которой 3100 МПа.



Фиг. 1.

После изготовления вкладышей и пластин они приклеивались друг к другу клеем из эпоксидной смолы марки ЭД-20, затем образцы выдерживались трое суток для затвердения клея.

Так как в совместной работе арматуры и бетона нас интересовало влияние отношения модулей этих материалов на прочность анкеровки арматуры, мы в качестве вкладышей использовали стержни с разными механическими свойствами, при этом было необходимо, чтобы отношение модулей стержней и эпоксидного компаунда варьировалось в достаточно больших пределах. Для изготовления вкладышей были использованы следующие материалы: сталь, дюралюминий, стекловолокнистые композиционные материалы и дерево, вырезанные по направлению волокон. Из стекловолокнистых композиционных материалов

использовались стекловолокнит АГ-4С и стеклотекстолит марки СТЭФ. В качестве материала для деревянного стержня был использован дуб.

В табл. 2 приведены значения модулей упругости использованных материалов, определенные нами по стандартной методике и их отношения к модулю упругости эпоксидного компаунда. Из табл. 2 видно, что отношение модулей упругости материалов для вкладышей к модулю упругости эпоксидного компаунда изменяется в больших пределах. Соотношение модулей упругости арматуры и тяжелого бетона естественного твердения изменяется в пределах 5...10, а для легких бетонов — в пределах 9...13. То есть, к совместной работе арматуры и бетона более близка работа моделей с вкладышами из стеклотекстолита марки СТЭФ и стекловолокнита АГ-4С.

Таблица 2

	Материалы вкладышей	Модуль упругости, МПа	Отношения модулей упругости вкладышей и эпокс. компаунда
1	Сталь	210000	67.7
2	Дюралюминий Д16	70000	22.6
3	СТЭФ	27300	8.8
4	АГ-4С	22500	7.3
5	Дуб	12650	4.1

Исследования напряжений поляризационно-оптическим методом были проведены в лаборатории фотоупругости Института механики НАН РА. Определение напряжений в моделях было выполнено двумя методами: методом полос и методом компенсации. При определении напряжений методом полос с помощью интерференционных картин определяются оптическая разность хода лучей и направления главных напряжений по всему полю модели. Исследование модели методом полос проведено на поляризационно-проекционной установке ППУ-7 [11].

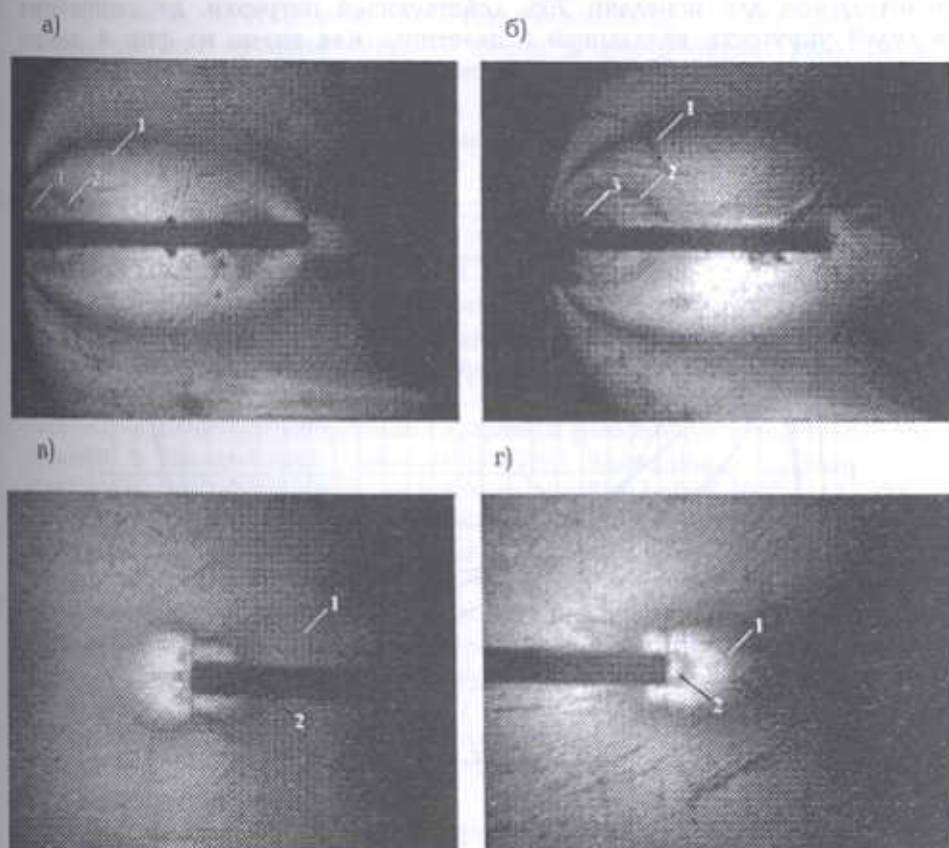
На фиг. 2 приведены примеры картин изохром при использовании в моделях вкладышей из разных материалов. Эти картины подтверждают то мнение, что при больших значениях отношений модулей упругости вкладышей к модулю упругости пластины (67.7 и 22.6), в основном, работают внутренние концы вкладышей, т. е. усилия с вкладышей на пластину передаются главным образом через окончания, а в случаях, когда материалы, из которых изготовлены вкладыши, имеют более низкий модуль упругости, в частности дерево, АГ-4С или, СТЭФ, при которых отношение их модулей упругости к модулю упругости эпоксиды составляет соответственно 4.1, 7.3 и 8.8, касательные напряжения концентрируются вблизи свободной поверхности, что характерно для совместной работы арматуры с бетоном.

Исследование распределения контактных касательных напряжений проведено методом компенсации на координатно-синхронном поляриметре КСП-5 [11].

Касательные напряжения определялись по формуле

$$\tau_{xy} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \sin(2\varphi) \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — главные напряжения в наблюдаемой точке модели ( $\sigma_1 > \sigma_2$ ),  
 $\varphi$  — угол между осью X и главным напряжением  $\sigma_1$ .



Фиг. 2. Картины изохром  
 а) АГ-4С, б) дерево, в) сталь, г) дюралюминий  
 (Цифрами указаны порядок полос)

Разность главных напряжений определяется по закону фотоупругости

$$\delta = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot C_\sigma \cdot d \quad (3)$$

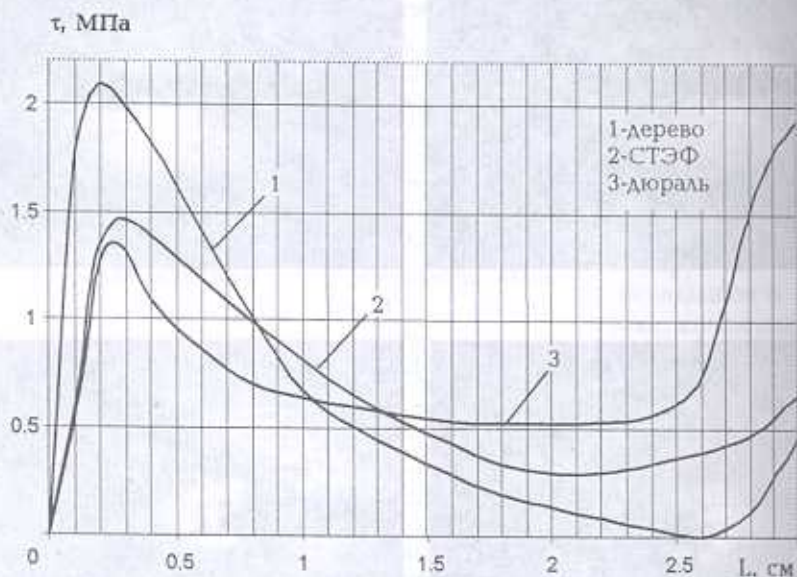
где  $\delta$  — оптическая разность хода, мкм

$C_\sigma$  — относительный оптический коэффициент напряжений, для эпоксиды в наших опытах мы принимали  $C_\sigma = 45 \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$ ,

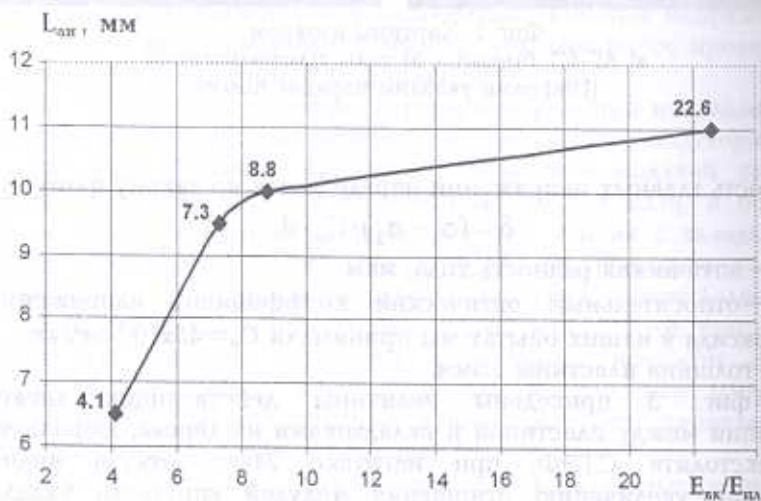
$d$  — толщина пластины 5.5мм,

На фиг. 3 приведены величины действующих касательных напряжений между пластиной и вкладышами из дерева, дюралюминия и стеклотекстолита СТЭФ, при нагрузке 24кгс, откуда видно, что параллельно увеличению отношения модулей упругости вкладыша и пластины, значение касательных напряжений уменьшается вблизи внешнего конца и увеличивается вблизи внутреннего конца вкладыша. Независимо от материала вкладыша, максимальные значения касательных напряжений находятся на расстоянии  $0.1L$  от края пластины.

Полученные результаты позволяют установить зависимость величины длины зоны анкеровки от отношения модулей упругости вкладышей и пластины. На фиг. 4 приведена зависимость длины зоны анкеровки, необходимой для передачи 70% действующей нагрузки, от отношения модулей упругости вкладышей и пластины. Как видно из фиг. 4, длина зоны анкеровки зависит от соотношения модулей упругости применяемых материалов.



Фиг. 3.



Фиг. 4

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1998. 77с.
2. Кучеренко А. А. Изменение величины вытягивания и зоны анкеровки арматуры при пропаривании. // Бетон и железобетон. 1968. № 3. С. 27-28.
3. Гольдфайн Б. С., Ерин Н. Н. Об особенностях сцепления бетона с горизонтально расположенной арматурой. /В сб. Анкеровка арматуры в бетоне. М. 1969. С. 50-64.
4. Ахвердов И. Н. Влияние усадки, условий твердения и циклических температурных воздействий на сцепление бетона с арматурой. // Бетон и железобетон. 1968. № 12. С. 4-7.
5. ՀՀՇՆՉ, ՀՀ հանրապայրերի բնական ծակոտկեն լցանյութերով բերե բետոններից բետոնի և երկաթբետոնե կոնստրուկցիաների նախագծում: Առաջին մաս, Բետոնե և երկաթբետոնե կոնստրուկցիաներ առանց անրանի նախապես լարման: Երևան 2000, է. 118-123:
6. ՀՀՇՆՉ, ՀՀ հանրապայրերի բնական ծակոտկեն լցանյութերով բերե բետոններից բետոնի և երկաթբետոնե կոնստրուկցիաների նախագծում: Երկրորդ մաս, Նախապես լարված երկաթբետոնե կոնստրուկցիաներ: Երևան 2000, է. 135-138:
7. Маилян Р. А. и др. Длина зоны анкеровки высокопрочной арматуры в элементах из бетона на пористых карбонатных заполнителях. //Бетон и железобетон. 1970. №1. С.32-36.
8. Хачикян А. С., Саркисян В. Г. Плоское деформированное состояние предварительно напряженного армированного прямоугольника. // Изв. АН Арм. ССР, Сер. техн. наук. 1973. Т. XXVI, №1. С. 31-38.
9. Корнев Н. А., Вейнер Б. Б. Анкеровка арматуры повышенной прочности в легких бетонах. // Бетон и железобетон. 1966. №10. С.23-26.
10. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику. М.: Мир, 1970. 487с.
11. Эдельштейн Е. И. Приборы научно-исследовательского института математики и механики АГУ для исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. /Тр. конф. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. А.: 1960. С.174-191.

Институт механики НАН Армении,  
Ереванский государственный университет  
архитектуры и строительства

Поступила в редакцию  
23.11.2004