

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА ПРИ РАЗВИТИИ
ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Г.Л. Далакишвили¹, К.Р. Хазалиа¹, Г.П. Иванов²

¹*Грузинский технический университет*

²*Тбилисский государственный университет*

Объектом исследования являются деформации бетона и трещинообразование в контактной зоне матрицы и крупного заполнителя, вызванные температурным воздействием при затвердевании цементного камня. В результате исследований методом голографической интерферометрии получены как качественная, так и количественная оценки усадочных деформаций и формирования напряжённого состояния в микрообъёмах между зёрнами заполнителей и на контактных поверхностях “матрица-заполнитель”.

Ключевые слова: бетон, деформация, перемещение, голографическая интерферометрия, температурное воздействие, трещиностойкость, усадка.

Введение. В гидротехническом строительстве при возведении бетонных плотин важное значение имеет учёт напряжённо-деформированного состояния, температурно-усадочного смещения и трещинообразования межсекционных бетонных блоков при их затвердевании в теле плотины [1].

Деформированное состояние и воздействие физических факторов среды вызывают появление в бетоне внутренних напряжений. Высокое значение внутренних и суммарных напряжений, возникающих при воздействии факторов среды и нагрузки, приводит к образованию в бетоне трещин, снижающих его эксплуатационные показатели, и служит причиной раннего истощения несущей способности конструкций, сокращения срока её службы и т.д.

Основная часть. По общепринятому мнению, причиной возникновения внутренних напряжений является неоднородность как самого цементного камня, так и бетона в целом, т.е. внутренние напряжения являются следствием микро- и макронеоднородности структуры бетона [2,3].

Указанные неоднородности при различии в величинах коэффициентов температурных расширений, упругих характеристик и сорбционных свойств отдельных структурных элементов приводят к тому, что под влиянием внешних механических воздействий, изменения температуры или влагосодержания

структурные элементы деформируются по-разному. Несогласованность же деформации отдельных элементов влечёт за собой возникновение внутренних усилий из-за стеснения их свободного деформирования. Причиной возникновения структурных напряжений являются также и физико-химические процессы, протекающие в твердеющем цементном камне и сопровождающиеся изменением формы и размеров новообразований, развитием кристаллизационного давления и др.

Исследование внутренних напряжений, являющихся причиной возникновения трещин и разрывов, вызывает всё возрастающий интерес. Причем с этой целью исследователи прибегают к различным приёмам: исследованию либо математических моделей, либо различного вида физических моделей.

Несколько больше приближается к реальной структуре бетона модель, рассмотренная в работе Томаса Т.С. и Хсю С. Она состоит из круглых жестких дисков заполнителя, расположенных по углам четырёхугольника и окруженных раствором. При решении задачи принято, что последний изменяется в объёме (в результате взаимодействия цемента и воды) при увлажнении, высыхании, изменении температуры и т.д. Рассматриваются трещины двух видов: 1) в зоне контакта заполнителя с окружающим раствором (трещины сцепления) и 2) в самом растворе (трещины раствора).

Представить аналитическим путём истинное поле напряжений в таком сложном по структуре материале, каким является бетон, практически невозможно. Причём дело не только в сложности структуры. Цементно-песчаная матрица, в которую вкраплены зёрна крупного заполнителя, претерпевает деформации уже на самых ранних стадиях схватывания и твердения цемента. При этом меняются деформационные характеристики цементно-песчаной смеси. Вязкая текучая смесь постепенно переходит в твёрдообразное упруго-вязкое тело, истинное поле напряжений в бетоне не представляется возможным, и, следовательно, характер связи между деформациями и напряжениями, развивающимися при этом, постоянно меняется. Естественно, меняются и упруго-вязкие характеристики тела. Если добавить к сказанному, что при медленном протекании процесса деформирования, как это имеет место при усадке, большую роль играют релаксация и ползучесть, станут ясными те непреодолимые трудности, которые возникают при точном аналитическом рассмотрении задачи. Но сказанное указывает и на сложность задачи определения напряженного состояния экспериментальным путём. Отсюда понятен интерес к поискам методов непосредственного измерения напряжений, позволяющих контролировать формирование напряженного состояния в процессе твердения бетона. Применение тензометрических приборов для этой цели практически исключается, поскольку, как уже отмечалось, связь напряжения с деформацией в процессе твердения цементного камня неизвестна, а также технически сложна установка соответствующих приборов в образцах.

В поисках решения указанной задачи были предложены поляризационно-оптические методы. Так, Теепе, В.Н. Сахаров для определения напряженного состояния бетона использовали оптически-чувствительные покрытия, которые наклеивались с отражающим слоем на область конструкции, где измерялись деформации. Деформации, возникающие в конструкции, передавались на покрытие и вызывали оптический эффект, который измерялся поляризационно-оптическими приборами в отраженном свете. Этим методом авторы получили картины деформированного состояния тяжёлого и легкого бетонов, находящихся под влиянием внешней нагрузки. Но по указанным выше причинам они не могут определять собственные напряжения в бетоне. Следует также отметить, что оптически-чувствительные покрытия можно наносить лишь на сухую поверхность бетона, что является серьёзным минусом при исследованиях явлений, связанных с усадкой.

С целью большего приближения изучаемых физических моделей к реальным свойствам бетона нами была сделана попытка применить голографию, которая также принадлежит к оптическим методам исследования и не требует использования модельных (фотоупругих) материалов. Поэтому использование голографической интерферометрии кажется весьма заманчивым [4-8]. Есть основание предполагать, что она позволит больше приблизиться к раскрытию реальной картины развития усадочных деформаций при температурных воздействиях и формирования напряжённого состояния в микрообъемах между зёрнами заполнителей и на контактных поверхностях “цементный камень-заполнитель”.

Двухэкспозиционная голография, по сравнению с другими методами, обладает рядом неоспоримых преимуществ. В частности, при исследовании деформаций цементного камня в раннем возрасте, когда образцы из цементного камня влажные, применение метода тензометрии практически не представляется возможным, так как не удаётся надежная фиксация датчиков на поверхности образца. Метод же голографической интерферометрии позволяет измерять деформации при любой влажности и в любой точке объекта; можно также определить концентрации напряжений в микрообъемах, составляющих десятки микрон.

Последнее обстоятельство также усиливает интерес к голографической интерферометрии [1], так как используемые приёмы замера деформаций дают интегральные сведения и не позволяют судить о характере распределения деформаций в различных точках бетонного образца.

Для изучения деформации бетона при температурном воздействии была отлита модель размером 310x210x40 мм из песчаного бетона с включениями крупного заполнителя из дюрала. Максимальный размер мелкого заполнителя – 5 мм. В качестве вяжущего использовали шлакопортландцемент марки 400, крупный заполнитель из дюрала, диаметром 20 мм, в количестве 80 штук. Заполнители были втоплены в цементную матрицу, проходя её насквозь. Перед втоплением крупные заполнители предварительно были очищены и термически

обработаны. Во избежание появления усадочных трещин после формовки модель находилась в условиях нормального хранения в течение 28 суток (рис. 1).

Во время эксперимента осуществляли нагрев модели. Измерение её температуры производилось с помощью датчика, соединённого с цифровым вольтметром.

Голографирование производили He-Ne лазером ЛГ-215 мощностью 60 *MВт* двухлучевой схемой, методом двойной экспозиции на голографических фотопластинах ВР-Л. Время экспозиции - 45 *с*, точность измерения - 632,8 *нм*. Во время проведения эксперимента выяснилось, что когда интервал температур между экспозициями превышал 5⁰С, интерферограммы не регистрировались. Поэтому голографирование производили ступенчатым методом при температурах, ⁰С: 42...45, 52...55, 62...65 и 67...70. Перед первой экспозицией образец нагревался до температуры 42⁰С, а спустя 15 *мин*, в течение которых образец нагревался до 45⁰С, производили вторую экспозицию на той же фотопластинке, после чего фотопластинку проявляли и определяли смещение.

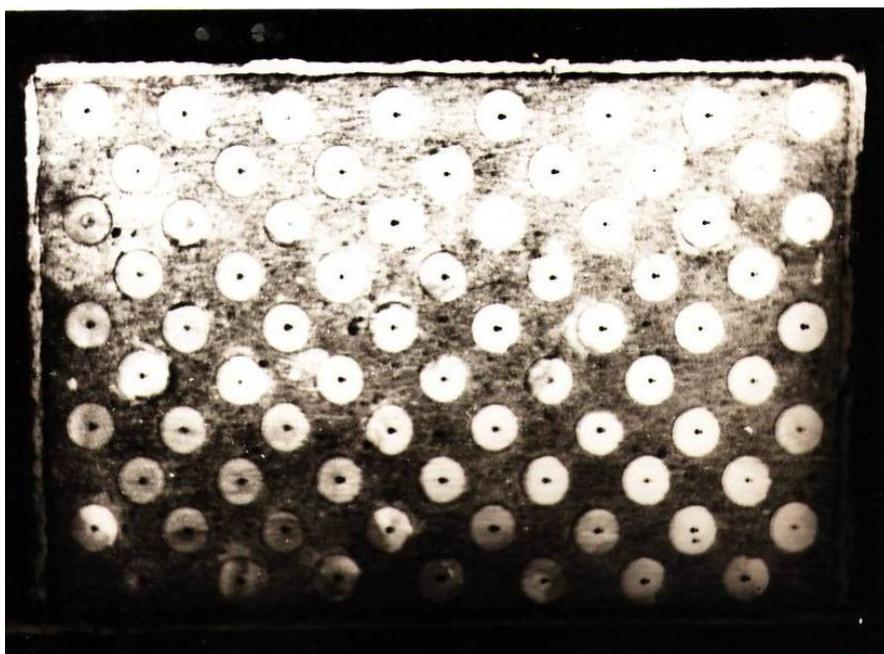


Рис.1. Вид модели

Такую же методику применяли при температурах 45, 55, 65, 70⁰С (рис. 3). Интервал температур между экспозициями - 3⁰С.

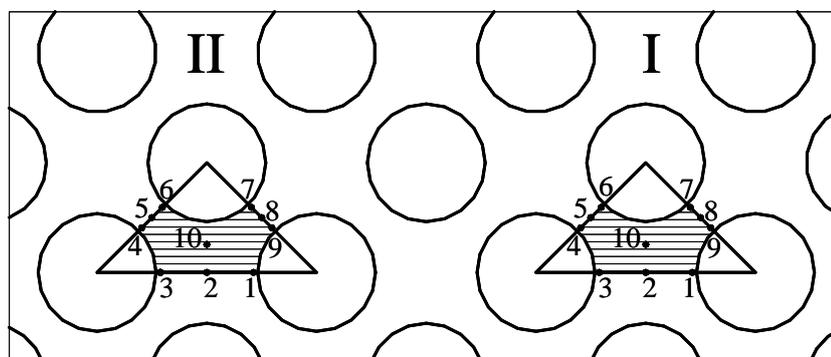


Рис.2. Схема нумерации точек

Для получения количественной оценки производили расшифровку голографических интерферограмм по известной методике, предложенной Е.Б. Александровским и А.М. Бонг-Бруевичем [4]. Смещения были определены в 20 точках в двух последующих ячейках 3, 6. Нумерация точек приводится на рис. 2. В таблице даются смещения (DX и DY) в плоскости модели по оси X и Y.

Таблица

Перемещение отдельных точек по осям X и Y в микрометрах

№ точек		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
45 ⁰ C	I ячейка	DX	2,82	5,67	5,43	8,0	3,61	5,0	2,25	4,71	4,86	7,20
		DY	2,3	2,21	2,7	5,7	2,0	4,2	5,0	5,4	2,70	2,90
	II ячейка	DX	9,2	4,4	7,3	12,0	9,1	13,4	12,5	13,0	21,70	8,70
		DY	3,01	2,02	2,62	3,31	5,4	2,5	4,82	4,0	5,10	2,40
55 ⁰ C	I ячейка	DX	4,37	2,36	2,78	4,61	4,24	2,5	6,81	6,0	3,08	8,30
		DY	5,7	6,43	6,7	9,4	9,25	8,7	6,4	5,81	8,0	7,40
	II ячейка	DX	16,5	17,55	13,5	10,7	13,0	14,5	9,6	20,3	10,8	21,10
		DY	7,81	10,32	7,40	6,92	7,92	7,37	7,07	7,40	6,72	6,30
65 ⁰ C	I ячейка	DX	14,0	8,48	7,85	4,92	9,30	6,30	12,87	15,40	15,80	17,51
		DY	15,3	10,25	11,48	6,41	10,58	7,36	12,63	15,46	13,31	15,43
	II ячейка	DX	18,31	18,11	17,42	12,59	10,31	13,81	10,53	21,37	15,58	19,77
		DY	16,52	15,38	14,45	10,39	11,46	14,58	19,39	18,7	13,43	18,83
70 ⁰ C	I ячейка	DX	16,61	16,61	12,2	22,64	26,58	18,0	15,5	5,6	11,0	18,62
		DY	17,45	16,33	15,55	23,35	28,48	20,31	17,88	10,39	10,49	19,41
	II ячейка	DX	17,51	15,3	13,21	11,4	12,31	13,62	16,73	17,52	17,93	19,24
		DY	15,42	14,32	10,9	11,83	11,93	12,67	10,52	14,3	16,2	17,41

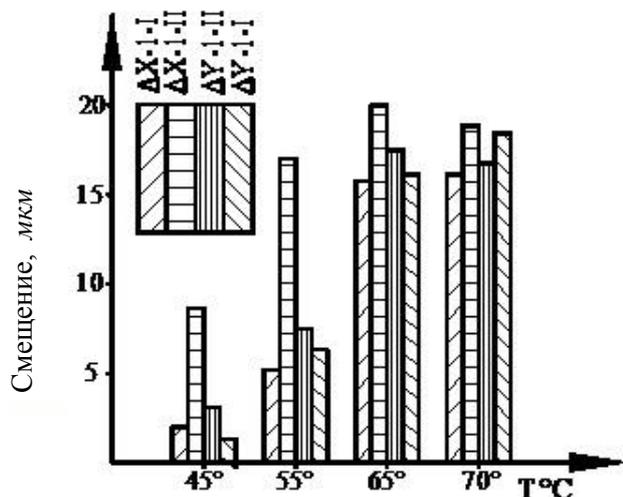


Рис.3. Смещение точек в плоскости образца по направлениям X, Y ($\Delta X, \Delta Y$)

На рис. 3 показаны диаграммы смещения точек в плоскости модели по направлениям X, Y.

В работе приведено лишь несколько качественных и количественных данных, полученных при проведении эксперимента.

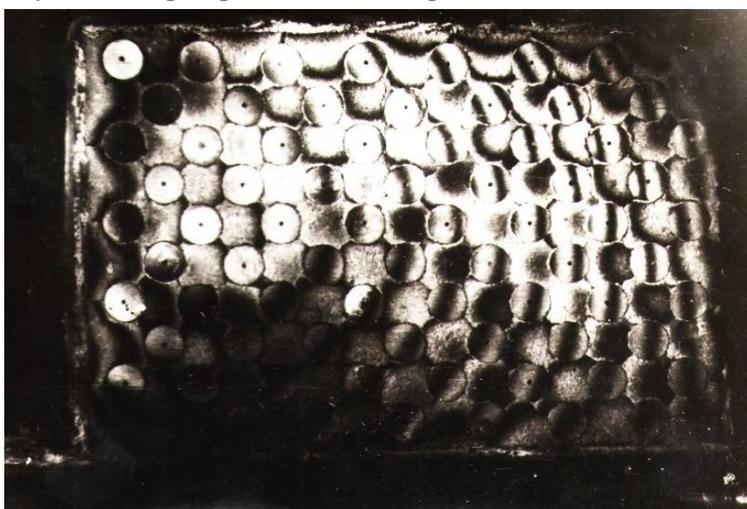


Рис.4. Голографическая интерферограмма, полученная при нагреве модели до 45°C

Анализ интерферограмм (рис. 4) показывает, что при температурном воздействии с самого начала голографирования ($43...45^{\circ}\text{C}$) в модели имелись трещины в контактных зонах между матрицей и зернами заполнителя. Это обстоятельство отразилось на характере развития внутренних напряжений,

которые с ростом температуры в отдельных случаях снижались. Снижение наблюдалось именно в тех случаях, где на интерферограмме были отмечены трещины.

При отсутствии трещин с ростом температуры смещение увеличивалось. Но там, где возникали трещины, наблюдалось нарушение монотонного изменения смещений. Влияние трещин сравнительно слабо отражалось на смещении точек 10, расположенных в средней части ячеек.

Смещение, приходящееся на 1°C повышения температуры, сильно менялось. Максимальные значения, которые были зафиксированы нами, равнялись 9...10 мкм. Большое смещение точки 9-II обусловлено тем, что она попала в зону контактной трещины. В аналогичных местах (точки 1,3,4,7) смещения были меньше.

Заключение. Трещины, возникающие при температурном воздействии на модель, обуславливают большой разброс в величинах смещения. Избегать же возникновения трещин исследуемой модели не представляется возможным.

В дальнейшем для предотвращения возникновения усадочных трещин следует исследовать возможность покрытия поверхности модели влагонепроницаемыми плёнками, либо ограничить величину действующей температуры интервалом 10...30 $^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что для поставленной цели наиболее целесообразно использовать безусадочный цемент.

Литература

1. Данелия Л.И., Микеладзе Г.П., Сеиладзе А.К. К вопросу совершенствования контроля качества бетона // Энергетическое строительство. – 1990. – №12. – С. 29 – 42.
2. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 230 с.
3. Колакот Р. Диагностика повреждений. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
4. Александровский Е.Б., Бонг-Бруевич А.М. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники // Журнал технической физики. -1967. - Т.37, вып.2. - С. 360-369.
5. Tsilosani Z.N., Dalakhishvili G.L., Kakichashvili Sh.D. The effect of cement composition on the Cracking Resistance // 7th international Congress on the chemistry of cement. - Paris, 1980. - Vol. III. – P. 87-92.
6. Tsilosani Z.N., Dalakhishvili G.L., Kakichashvili Sh.D. Shrinkage of concrete at early stages of hardening // International conference on concrete of early ages / National School of Bridges and pavement. – Paris, 1982. – P. 71-75.
7. Dalakhishvili G.L. The Effect Of Cement Composition On The Cracking Resistance // Electronic Journal EOL. – April, 2012. - Issue 6, <http://www.energyonline.ge>
8. Dalakhishvili G.L., Mosiashvili The Study of structure formation in the early stage of hardening of silicate binders by holographic interferometry // Energy. – Tbilisi, 2013. №2(66). – P.103-105.

*Поступила в редакцию 10.05.2016.
Принята к опубликованию 05.12.2016.*

**ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՄԲ ՆԵՐՔԻՆ ԼԱՐՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՋԱՐԳԱՑՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ԲԵՏՈՆԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ԴԱՇՏԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ՀՈԼՈԳՐԱՖԻԿԱԿԱՆ ԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶԱՓՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ**

Գ.Լ. Դալաքիշվիլի, Կ.Ռ. Խազալիա, Գ.Պ. Իվանով

Հետազոտվել են բետոնային մատրիցի և խոշոր լցանյութի հպման գոտում առաջացող դեֆորմացումները և ճաքագոյացումը՝ հրահրված ցեմենտային քարի ամրացման ընթացքում ջերմային ազդեցությամբ: Հետազոտությունների արդյունքում հոլոգրաֆիկական ինտերֆերաչափության մեթոդով լցանյութերի միջհատիկային միկրոծավալներում և «մատրից-լցանյութ» կոնտակտային մակերևույթների վրա ստացվել են նստվածքային դեֆորմացումների և լարվածային վիճակի ձևավորման ինչպես որակական, այնպես էլ քանակական գնահատումներ:

Առանցքային բաներ. բետոն, դեֆորմացում, տեղաշարժ, հոլոգրաֆիկական ինտերֆերաչափություն, ջերմաստիճանային ազդեցություն, ճաքակայունություն, կցկում:

**DETERMINING THE CONCRETE DEFORMATION FIELDS AT INTERNAL
VOLTAGES DEVELOPED BY THE VIA THE HOLOGRAPHIC
INTERFEROMETRY METHOD**

G.L. Dalakishvili, K.R. Khazalia, G.P. Ivanov

The object of the study is the deformation of concrete, crack formation in the contact zones of matrix and coarse aggregate, which is caused by the temperature influence during the process of hardening of a cement stone. As a result of researches by the method of holographic interferometry a qualitative, as well as a quantitative evaluation of the shrinkage deformation and formation of stressed state in microvolumes among the grains of aggregates and on the contact surfaces of “matrix-aggregates” is obtained.

Keywords: concrete, strain, displacement, holographic interferometry, thermal effects, crack, shrink.