

ЛАЗЕРНА ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ РОТАЦІЙНОГО БЕТОНУ

О.Г.Кесарійський¹, *к.т.н.*, **О.В.Кондращенко²**, *д.т.н., проф.*,
О.В.Якіменко², *доц.*, **В.І.Кондращенко³**, *д.т.н., проф.*,
А.Ю.Гусєва³, *к.т.н., доц.*, **В.Д.Кудрявцева³**, *к.т.н., доц.*, **Д.І.Оленіч³**

¹*ТОВ «Лабораторія комплексних технологій», м. Павлоград, Україна*

²*Харківський національний університет міського господарства
ім. О.М. Бекетова, Україна*

³*Московський державний університет шляхів сполучень, Росія*

Бетон, отриманий методом силового набризку бетонної суміші на поверхню, що формують, зустрічно обертовими роторами, виконаними у вигляді металевих циліндрів з пластинами, які розташовані уздовж утворювальної лінії цих циліндрів [1], або циліндрів з еластичною поверхнею у вигляді гумових трубок [2], або іншої конструкції циліндричної поверхні роторів [3] називають бетоном, отриманим за ротаційною технологією, або так званім ротаційним бетоном.

Поведінка бетону під навантаженням визначається напружено-деформованим станом (НДС) елементів його мікро- і макроструктури, для вивчення якого використовуються експериментальні методи, що підрозділяються на методи вимірювання дискретної деформації і поля деформацій. До першої групи належать методи механічної та електричної тензометрії, а також акустичної емісії, а до другої - поляризаційно-оптичний метод, муарових смуг, оптично чутливих покриттів і лазерно-інтерференційні методи [4].

Для дослідження НДС бетону, особливий інтерес являють лазерно-інтерференційні методи, такі як голографічна інтерферометрія і спекл-інтерферометрія, включаючи її сучасну модифікацію – електронну кореляційну спекл-інтерферометрію. Перевагами цих методів є те, що прямі і прецизійні вимірювання проводяться одночасно по всій досліджуваній поверхні і виконуються як на оптично прозорих, так і на дифузно-розсіюючих тілах будь-якої геометричної форми. Зазначені методи є безконтактними і безінерційними, що дозволяє проводити експерименти в широкому діапазоні статичних та динамічних навантажень, реєструючи поля переміщень в діапазоні 0,1-100 мкм.

Особливості поведінки ротаційного бетону під навантаженням встановлювали шляхом аналізу НДС його макроструктури з використанням методів лазерної інтерферометрії. З цією метою дослідження

проводили на віброзахищеній лазерно-інтерференційній установці двома методами – в реальному часі (за схемою Лейта-Упатнієкса і з подвійною експозицією (за схемою Денисюка) [5].

У ході експериментів із застосуванням методу реального часу, було встановлено, що через високу податливість бетонних зразків при стисненні, інтерференційна картина спостерігається в незначному діапазоні навантажень, що дозволило вивчити динаміку поведінки бетону тільки в обмеженому інтервалі навантажень.

Для вирішення цієї проблеми був використаний метод подвійної експозиції, у якому інтерферограма реєструвалася за зміни напруг $\Delta\sigma$, що становить малу величину від руйнівного навантаження бетонного зразка $R_{ст.}$.

Експерименти проводилися на аншлифах бетонних зразків (рис. 1а). При рівні напруг $\sigma = 7,4$ МПа, що становить 16% від руйнівного навантаження $R_{ст.}$, рівномірний характер розподілу смуг свідчить про відсутність аномальних деформацій досліджуваного зразка (рис. 1б).

На початковому етапі навантаження відзначена істотна зміна тиску в гідросистемі (0,1 МПа за 10 с), що можна пояснити адаптацією контактуючих поверхонь зразка та розуцільненням найменш стійких структур бетону: витримка під навантаженням протягом 3 хв. призвела до зниження напружень з 7,4 до 6,33 МПа. При цьому співвідношення незворотних осьових переміщень до зворотних складає 4:1 при поступовому зниженні пружної складової у міру зростання навантаження і числа циклів навантаження.

Збільшення напруження до $\sigma = 8,44$ МПа (при незмінному перепаді напруження $\Delta\sigma = 1,0$ МПа) не вплинуло суттєво на рівень і характер деформації зразка (рис. 1в), у той час як повторне навантаження зразка при тому ж рівні навантаження показало суттєву зміну характеру деформування: максимальні нормальні переміщення зменшилися майже в три рази, а поле деформацій помітно спотворилося (рис. 1г).

Отриманий результат свідчить про необоротний характер деформацій, які, імовірно, є наслідком опресовування контактуючих поверхонь і розуцільнення структури при першому навантаженні, а при повторному навантаженні, – ще й прояви пружно-пластичних деформацій.

Подальше навантаження зразка до $\sigma = 11,2$ МПа не приводить до істотної зміни поля нормальних переміщень (рис. 1д). Ця тенденція зберігається і при збільшенні навантаження до $\sigma = 12,6$ МПа. Однак після 3 год. витримки зразка під навантаженням, при повторному його навантаженні до $\sigma = 12,6$ МПа ($\Delta\sigma = 1,0$ МПа) характер деформування істотно змінюється: спостерігається зменшення частоти смуг, що свідчить

про завершення процесів опресовування мікронерівностей на контактуючих поверхнях і розуцілення внутрішніх структур (рис. 2б).

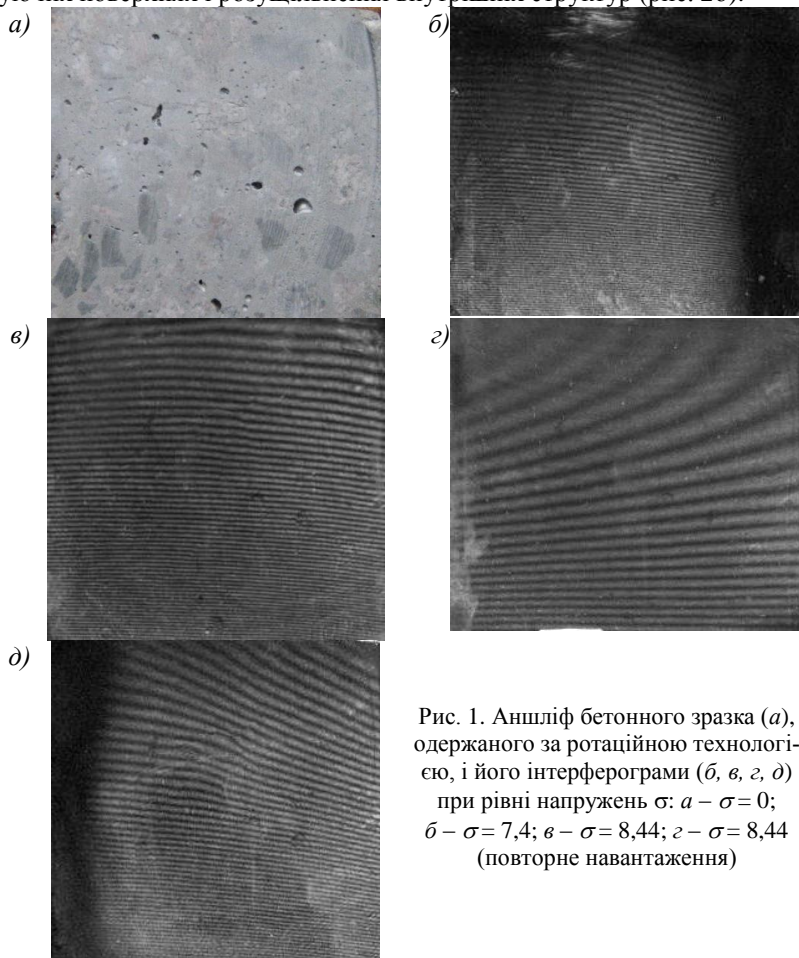


Рис. 1. Аншлиф бетонного зразка (а), одержаного за ротатійною технологією, і його інтерферограми (б, в, з, д) при рівні напружень σ : а – $\sigma = 0$; б – $\sigma = 7,4$; в – $\sigma = 8,44$; з – $\sigma = 8,44$ (повторне навантаження)

Вершини дугоподібних інтерференційних смуг вказують на максимум поперечної деформації центральної частині, що виникає при осьовому стисканні зразка. Крім того, на інтерферограмі виразно проявляються аномальні вигини інтерференційних смуг, характерні для зон початку тріщиноутворення (червона лінія на рис. 2а). При цьому візуальне спостереження зони спотворення інтерференційних смуг навіть при використанні оптичних приладів не дозволяє виявити наявність тріщини.

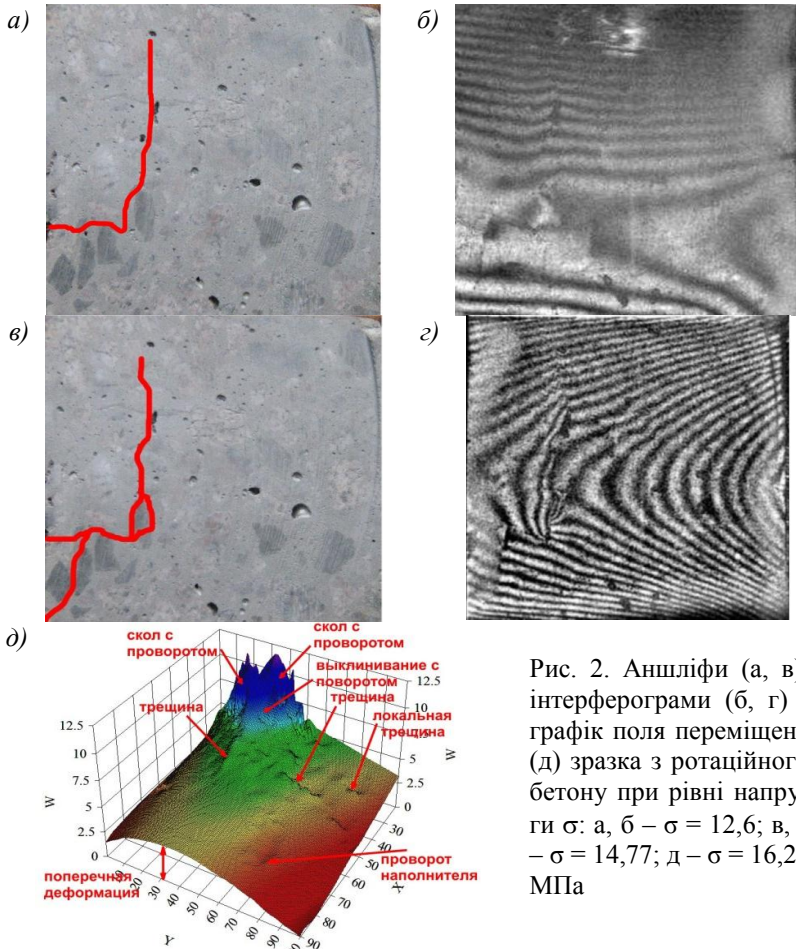


Рис. 2. Аншлифы (а, в), интерферограмми (б, г) і графік поля переміщень (д) зразка з ротатійного бетону при рівні напруги σ : а, б – $\sigma = 12,6$; в, г – $\sigma = 14,77$; д – $\sigma = 16,24$ МПа

Порівнянням результатів лазерної інтерферометрії з даними натурних випробувань встановлено, що перші ознаки формування тріщин відповідають 25 % руйнівних напружень при одноразовому і 44 % при багаторазовому навантаженні зразка. Таке значне збільшення рівня тріщиноутворення пояснюється організацією більш стійкої структури бетону внаслідок її адаптації до навантаження при багаторазових циклах "ущільнення – розуцільнення".

Подальше зростання напруження до $\sigma = 14,77$ МПа ($0,30R_{ст}$. при одноразовому навантаженні) призводить до появи провісників тріщин, що оптично не спостерігаються - аномальних високоградієнтних зон

деформацій, початку формування блоків і локальному повертанні окремих заповнювачів (рис. 2в, г). За класифікацією О.Я. Берга ці процеси відповідають нижній параметричній точці мікротрещіноутворення R_t^0 [6]. При зростанні напружень у зразку, мережа тріщин розвивається, формуючи додаткові блоки. Для наочності сприйняття поля переміщень на рис. 2д наведена 3D-інтерпретація інтерферограми для зразка з ротаційного бетону при $\sigma = 16,24$ МПа (при $\Delta\sigma = 1,47$ МПа).

При $\sigma = 23,2$ МПа частина заповнювачів відокремлюється тріщинами від основного масиву і повертається під навантаженням, як це показано на рис. 3.

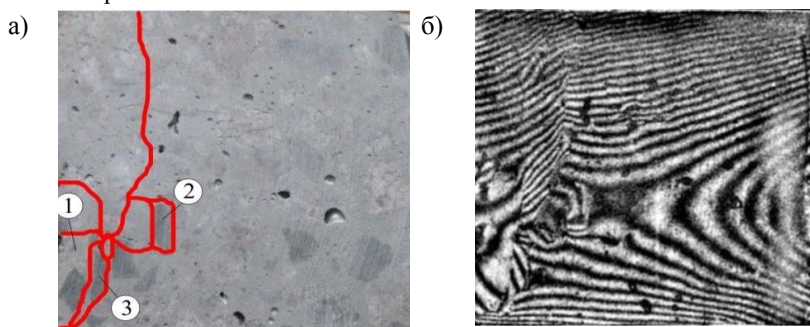


Рис. 3. Розвиток процесу тріщинообразовання при $\sigma = 23,2$ МПа

Зона 1 на рис. 3а являє собою блок у вигляді жорсткого елемента, що несуттєво деформується окремо від основного масиву. Заповнювачі 2 і 3 при цьому зазнають повертання, відмінні від загального поля переміщень. Значення кутів повертання невеликі і при перепаді напруг $\Delta\sigma = 2,1$ МПа складають всього $0,003$ градуса, проте інтерферограма дозволяє чітко виявити аномальну поведінку цих структурних елементів. Такий стан структури відповідає $0,46R_{ст.}$ при одноразовому і $0,81R_{ст.}$ багаторазовому напруженню.

Отримані дані з урахуванням результатів роботи [7] дозволяють віднести процеси повертання заповнювача і утворення блокової структури до верхньої параметричної точки мікротрещіноутворення R_t^v (за О.Я. Бергом), а не тільки розвитку тріщин, як це передбачалося раніше [6].

При $\sigma = 34,8$ МПа, фрагменти зразка, утворені під впливом попереднього навантаження, починають переміщатися навіть за короткий час експозиції $t_c = 8$ с. Ці зони чітко видно на інтерферограмі рис. 4, у вигляді ділянок розмитого зображення інтерференційних смуг.

При подальших навантаженнях деформації цих зон прогресують і після п'яти навантажень зразок руйнується при рівні напруг $\sigma = 28,6$ МПа.

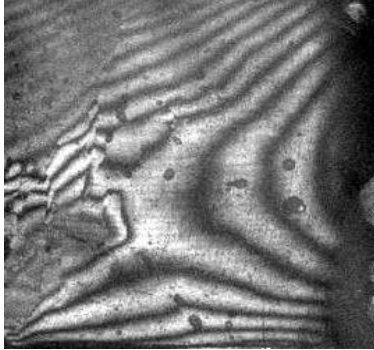


Рис. 4. Розвиток процесу тріщиноутворення при $\sigma = 23,2$ МПа

Висновки

Таким чином, з використанням високоінформативного методу лазерної голографічної інтерферометрії уточнено механізм поведінки ротаційного бетону під навантаженням і встановлені деякі нові елементарні акти процесу руйнування важкого бетону. До них відносяться утворення високоградієнтних лінійно-протяжних зон підвищених пружно-пластичних деформацій і, можливо, оптично не ідентифікованих областей мікротрещіноутворення, провертання заповнювача в матриці і утворення блокової структури деформації бетону, що складається з окремих "пружних" блоків, оточених високоградієнтними лінійно-протяжними зонами. Ці, експериментально отримані, дані узгоджуються, зокрема, з раніше опублікованими результатами: а) по провертання заповнювача – експериментальною роботою [7] і теоретичною моделлю бетону [8]; б) по утворенню блокових структур - стосовно до бетону за теоретичною роботою [9], експериментально-теоретичними роботами в галузі гірських порід акад. М.А. Садовського [10].

Утворення в бетоні високоградієнтних лінійно-протяжних зон на ранніх стадіях навантаження в $(0,25-0,35)R_{ст}$ і їх трансформація під навантаженням, є не настільки очевидним, але дуже важливим не тільки для розуміння процесів руйнування бетону і подібних йому багатокомпонентних системах, а й створення адекватних реальним процесам математичних моделей. Наприклад, у роботах Ю.В. Зайцева [11] не враховується формування блокової структури, а сам процес руйнування бетону і компонентів його макроструктури описується у вигляді росту тріщин, розташованих по всьому аншліфу зразка без їх локалізації в лінійно-протяжних зонах, виявлених методом голографічної інтерферометрії.

Summary

Methods of a laser holographic interferometry specified the mechanism of behavior of rotational concrete under loading and some new elementary acts of process of destruction of heavy concrete are established.

Література

1. Дюженко М.Г. Выбор и обоснование параметров роторных метательных устройств для безвибрационного уплотнения бетонных смесей. – Дисс....докт. техн. наук, Харьков, 1986. – 364 с.

2. Гусев Б.В., Кондращенко В.И., Дюженко М.Г., Носальский С.А. Метательное устройство для укладки и уплотнения бетонных и др. строительных смесей // Патент России № 2217302. Бюл. № 33, 2003, с. 24.

3. Кондращенко В.И., Кондращенко Е.В., Гузенко С.В., Гребенников Д.А., Ковревский А.П., Чан Тхи Тху Ха Установка для ротационной укладки растворных и бетонных смесей // Патент на полезную модель № 84294 от 04.03.2009.

4. Измерения в промышленности. Справ. изд.: В 3 т.: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1990. – Т. 1: Теоретические основы. – 492 с.

5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 504 с.

6. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон / Под ред. О.Я. Берга – М.: Госстройиздат, 1971. – 208 с.

7. Кондращенко В.И., Полонский Ю.В., Христюк В.В., Бабушкин В.И. Исследование деформации цементного камня и бетона при механическом и тепловом воздействии методом голографической интерферометрии // Механика композиционных материалов. 1996. Т. 32. № 2. С. 202-208.

8. Никишкин В.А. Влияние структуры и плотности на прочность и деформативность плотного строительного бетона и его составляющих. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 269 с.

9. Скоробогатов С.М. Блочно-поворотная структура реального твердого пористого тела // Вестник отделения строительных наук. Вып. 4, 2001, с. 173-176.

10. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойстве дискретности горных пород // Известия АН СССР. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3-19.

11. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.