

УДК 691.32: 620.191.33

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ, МІЦНОСТІ І ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНУ В УМОВАХ ЗГИНУ

Солодкий С.Й., к.т.н., доцент,

Національний університет „Львівська політехніка”, м. Львів

Розробка бетонів із спеціальними властивостями вимагає розуміння процесу руйнування через зародження і поширення тріщин. Тому прогрес бетонознавства на сучасному етапі значною мірою пов'язується з розвитком уявлень у галузі механіки руйнування бетону. Використання засад механіки руйнування для дослідження процесів деформування та руйнування бетонів відкриває нові можливості для виявлення закономірностей зародження і розвитку мікротріщин, утворення і поширення макротріщин залежно від структурних особливостей в контексті поліструктурної теорії бетону.

Аналіз літературних джерел. Дослідженню взаємозв'язку структури з показниками міцності і тріщиностійкості бетону присвячені роботи І.М. Ахвердова, Ю.М. Баженова, В.М. Вирового, С.С. Гордона, І.М. Грушка, Є.А. Гузєєва, Ю.В. Зайцева, П.В. Кривенка, К.О. Пірадова, А.М. Шейніна та інших. Найбільш повно характеризує роботу бетону з тріщиною повна діаграма деформування, яку отримують при рівноважних механічних випробуваннях зразків із штучно створеною тріщиною нормального відриву [1]. Ю.В. Зайцев стверджує, що „досліджень, в яких вивчався би вплив структури матеріалу на параметри повної діаграми зовсім мало – їх немає взагалі”[2]. Особливої актуальності такі дослідження набувають при використанні модифікованих цементів, у тому числі, композиційних.

Метою даної роботи є виявлення закономірностей впливу характеристик структури на показники міцності, деформативності і тріщиностійкості бетонів на модифікованих цементах І і V типів в умовах напружено-деформованого стану розтягу при згині.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження реалізовані шляхом випробування цементних матриць (Ц:П=1:0), отриманих внаслідок тверднення тіста нормальної густоти, дрібнозернистих бетонів (Ц:П=1:3), цементогрунтів (Ц:П=1:8), крупнозернистих важких бетонів складу 1:1,91:3,67:0,43 із витратою цементу 350 кг/м³.

Як в'язуче використовували два види композиційних цементів, модифікованих комплексною хімічною добавкою (натрію сульфат + ЛСТ): КЦ V/A-300 – “портландцементний клінкер (50 % мас.) – доменний гранульований шлак (15 % мас.) – перліт (35 % мас.)”, КЦ V/A-400– “портландцементний клінкер (64 % мас.) – доменний гранульований шлак (20% мас.) – зола-виносу ТЕС (16 % мас.)”, а також бездобавочний портландцемент ПЦ І-400, модифікований ЛСТ.

Визначення фізико-механічних властивостей та характеристик тріщиностійкості здійснювали у віці 120 діб на зразках розміром 0,1х 0,1х 0,1 м і 0,1х 0,1х 0,4 м, які зберігалися 90 діб в нормальних умовах і 30 діб у повітряно-сухих умовах лабораторії (t=16±3°C, W=60...85%). Міцність на

розтяг при згині визначали за формулою (19) [3]. Дослідження структури бетонів здійснювали методом електронної мікроскопії на скануючому електронному мікроскопі „TESLA BS 300”.

Характеристики тріщиностійкості бетонів визначали у відповідності до вимог [3] за схемою рівноважних випробувань із побудовою та комп'ютерним записом повністю рівноважних діаграм деформування бетонів із тріщиною нормального відриву (ПРДД) [4]. Термінологія параметрів тріщиностійкості прийнята згідно з [3].

Аналіз експериментальних результатів. Процеси деформування та руйнування будівельних композитів (БК) розглядали в контексті поліструктурної теорії [5,6], сутність якої полягає в представленні матеріалів поліструктурними, а саме: у виділенні в єдиній структурі багатьох взаємопов'язаних структур, що проникають одна в одну.

Згідно із рис. 1 площа повністю рівноважних діаграм деформування, а отже і робота, що витрачається на деформування і руйнування матеріалів незалежно від типу цементу зростає в наступній послідовності: цементогрунт < цементна матриця < дрібнозернистий бетон < важкий бетон. Відповідно найвищі показники силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості (табл. 1) притаманні крупнозернистим важким бетонам. Для важкого бетону характерні найбільші значення переміщень, які передують дефрагментації зразка.

Залежності „навантаження–переміщення” будівельних композитів є подібними, проте спостерігаються суттєві відмінності у діаграмах деформування залежно від типу цементу, виду і кількості заповнювачів, а саме:

- кут нахилу висхідної вітки діаграми до осі абсцис, що характеризує пружні властивості матеріалу, залежить від типу цементу, виду і кількості заповнювачів;
- значення критичного навантаження і переміщення, за яких відбувається злам діаграми, відрізняються для однакових матеріалів на різних цементах;
- точка перегину спадаючої вітки діаграми і повнота діаграми у закритичній стадії залежить від типу цементу;
- переміщення, за яких відбувається дефрагментація зразків для різних матеріалів на цементі одного типу відрізняється у 2-3 рази;
- використання цементу КЦ V/A-400 обумовлює найбільш крихкий характер руйнування матеріалів, КЦ V/A-300 – найбільші в'язко-пластичні деформації, композити на бездобавочному портландцементі займають проміжне положення, що кореспондується зі значенням критерію крихкості (характеристичної довжини).

Ці відмінності пов'язані із структурними особливостями досліджуваних будівельних композитів.

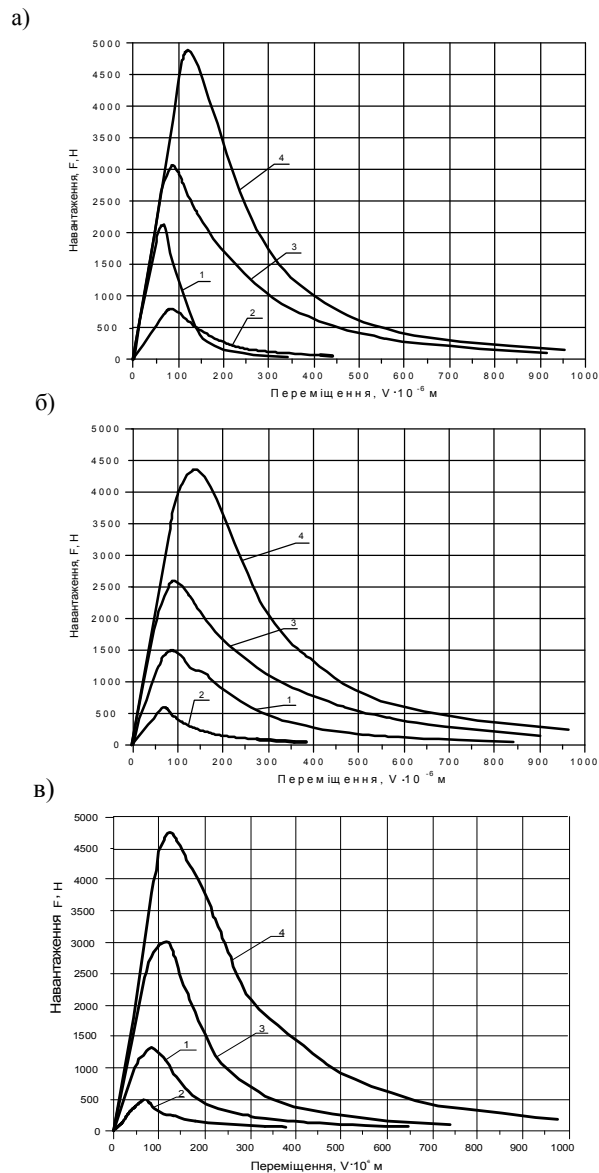


Рис. 1.

Повністю рівноважні діаграми деформування будівельних композитів на КЦ V/A-400 (а), КЦ V/A-300 (б) і ПЦ I-400 (в): 1- цементна матриця; 2 – цементогрунт; 3 – дрібнозернистий бетон; 4 – важкий бетон.

Таблиця 1

Показники міцності, деформативності і тріщиностійкості будівельних композитів

№	ПОКАЗНИКИ	ПЦ I-400			КЦ V/A-300			КЦ V/A-400			
		ЦМ	ЦГ	ВБ	ЦМ	ДБ	ЦГ	ДБ	ЦГ	ДБ	
1	Міцність на розтяг при згині, МПа, R_{cb}	2,2	0,9	8,0	2,5	4,5	1,0	3,6	5,2	1,4	8,2
2	Міцність на стиск, МПа, R	49,1	8,6	34,0	35,6	26,0	7,2	46,9	30,3	12,5	33,9
3	Модуль пружності при згині, МПа, $E_{cb} \cdot 10^3$	13,8	9,9	27,5	15,1	23,1	10,2	24,2	11,6	11,6	28,9
4	Статичний критичний КН, МПа m^{-1} , K_i	0,22	0,09	0,82	0,25	0,42	0,10	0,34	0,51	0,12	0,77
5	Критичний КН, МПа m^{-1} , K_c	0,16	0,06	0,67	0,20	0,39	0,06	0,28	0,08	0,08	0,63
6	Енерговитрати на деформування в зоні магстральної тріщини, Н m , $W_L \cdot 10^2$	18	5	108	29	64	5	13	6	6	88
7	Питомі ефективні енерговитрати на руйнування, Дж/м 2 , $G_{f,2}$	37	12	224	57	122	13	32	15	15	191
8	Критерій крихкості, m , $\chi_f = (G_{f,2} / R_{cb}^2) \cdot 10^3$	104	79	96	133	140	124	59	95	95	82

Цементна матриця на основі бездобавочного портландцементу характеризується найбільшою міцністю на стиск і найменшою – на розтяг при згині. Якщо перевага за міцністю на стиск матеріалу з найбільшою когезією не викликає сумнівів, то розтягу при згині, якому притаманний найвищий ступінь локалізації процесів руйнування [5], щонайкраще опирається матеріал із більшою неоднорідністю структури. При використанні модифікованих КЦ із вмістом мінеральних добавок різної природи активності забезпечується більший ступінь неоднорідності мікроструктури ЦМ. На користь цього твердження свідчить перевага за показником в'язкості руйнування ЦМ на композиційних цементах як в докритичній стадії деформування (Кі), так і з урахуванням стадії розповсюдження макротріщини (Кс). Так, використання КЦ V/A-400 забезпечує перевагу за цими показниками в 1,54-1,75 рази, а КЦ V/A-300 – в 1,14-1,25 рази порівняно із ПЦ I-400. Зміна модуля пружності при згині ЦМ залежно від типу цементу підтверджує виявлену закономірність.

Після зрушення макротріщини характер деформування досліджуваних матриць змінюється. Так, використання КЦ V/A-400 обумовлює крихкий характер руйнування. Це підтверджується найменшими значеннями переміщення, за якого відбувається злам діаграми деформування ($65 \cdot 10^{-6} \text{м}$), енерговитрат на локальне деформування в зоні магістральної тріщини (W_L), граничного переміщення, що передує дефрагментації зразка ($350 \cdot 10^{-6} \text{м}$) і характеричної довжини (критерію крихкості – $\chi_F = 59 \cdot 10^{-3} \text{м}$). На стадії розвитку макротріщини найбільші в'язко-пластичні деформації і повноту діаграми забезпечив цемент КЦ V/A-300 із найменшим вмістом клінкеру (50%), що пояснюється переважним вмістом новоутворень у гелевидному стані. Здатність структури до мікропластичних деформацій підвищує ефективну енергію руйнування [7]. Збільшення кількості клінкеру спричиняє посилення крихкого характеру руйнування, проте не за прямо пропорційною залежністю.

Зростання інтегральної енергетичної характеристики тріщиностійкості – питомих ефективних енерговитрат на статичне руйнування (G_F) відбувається в наступній послідовності застосування цементів: КЦ V/A-400, ПЦ I-400, КЦ V/A-300.

Хіміко-мінералогічний склад цементу, природа модифікатора, умови тверднення обумовлюють такі характеристики мікроструктури як склад і основність новоутворень, морфологія кристалів, тип зв'язків, характер пористості, співвідношення гелевидної і кристалічної фаз [8], а також інтенсивність процесів мікротріщиноутворення внаслідок власних об'ємних деформацій цементного каменю [6]. Мікротріщини поділяють цементний камінь на окремі блоки (рис. 2, б), які при високих рівнях напруження можуть бути локалізовані, що призведе до пластичного деформування матеріалу. Особливе значення відіграє розподіл пор за формою та розмірами: замкнуті сферичні пори гелю (рис. 2, а) здатні до поглинання субмікротріщин, капілярні – до ініціювання зародження та розвитку [9]. За даними [10] коефіцієнт концентрації напружень при розтязі цементного каменю для капілярних і гелевих порожнин становить 1,7-4,3.

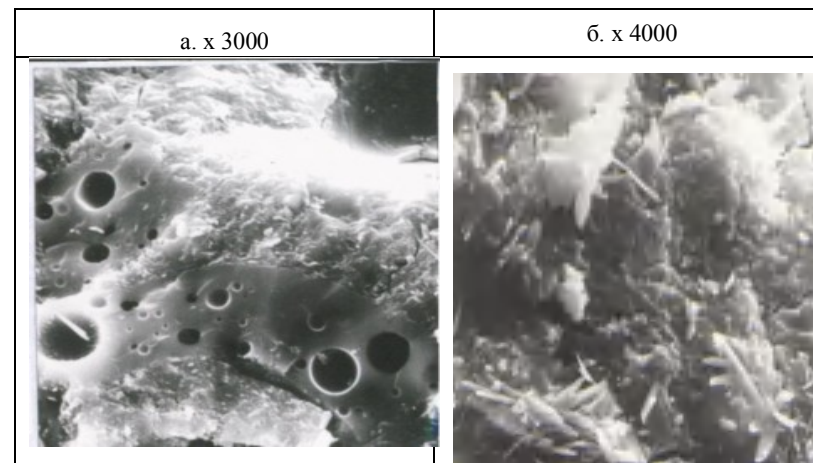


Рис. 2. Мікроструктура цементної матриці на композиційному цементі

На прикладі використання цементів різних типів із різною природою модифікатора виявлено наступну закономірність – відмінності характеристик мікроструктури забезпечили матрицям на основі модифікованих композиційних цементів більшу в'язкість руйнування для тріщин нормального відриву, вищі показники міцності і пружності при згині через механізм гальмування розвитку і злиття мікротріщин структурними неоднорідностями – порами гелю, мікрокапілярами, поверхнями поділу фаз, зернами мінеральних добавок і клінкеру, що не були залучені у процес гідратації, кристалами AF_1 і AF_m – фаз. Крім того, здатність до мікропластичних деформацій матриці на основі КЦ V/A-300 обумовлює найвищі значення енерговитрат на різних стадіях деформування. Водночас, в умовах напружено-деформованого стану при стиску внаслідок відмінності механізму руйнування перевага забезпечується мікроструктурою на основі бездобавочного портландцементу.

Вплив наповнення ЦМ піском на характеристики міцності та тріщиностійкості досліджували в двох системах – дрібнозернистому бетоні (ДБ) і цементогрунті (ЦГ), які можна розглядати відображенням мезоструктури важкого бетону.

Введення в ЦМ піску у співвідношенні Ц:П=1:3 призвело до значного зростання міцності на розтяг при згині та падіння міцності на стиск, що пояснюється проявом адгезійних сил і зменшенням ролі когезійних сил у формуванні міцності композиційного матеріалу. Роль зерен піску полягає у затримці розвитку і гальмуванні матричних мікротріщин в зонах контакту, що сповільнює процес руйнування матеріалу в цілому (рис. 3, а). Крім того, за даними [11] при невеликих концентраціях пісок здійснює армуючу функцію. Водночас, зерна піску є концентраторами напружень, що обумовлює появу внаслідок власних об'ємних деформацій цементного каменю (ЦК) вже у

доексплуатаційній стадії мікротріщин на поверхнях поділу компонентів (рис. 3, б).

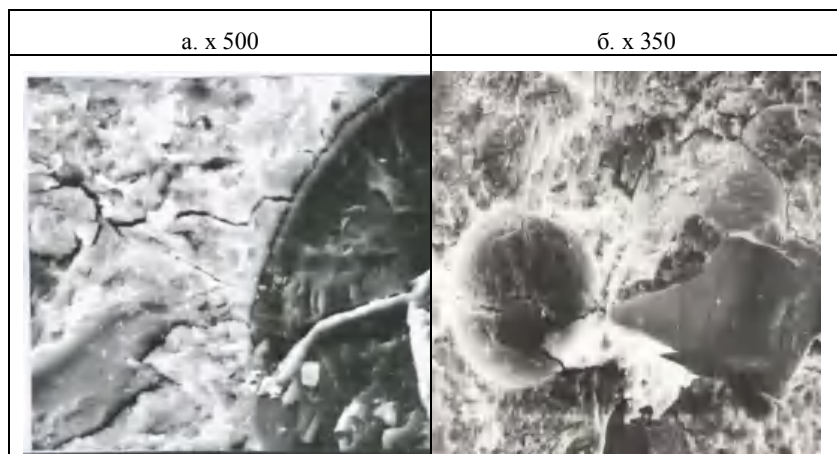


Рис. 3. Гальмування (а) та ініціювання розвитку (б) матричних мікротріщин зернами піску.

Перевага процесів гальмування або розвитку тріщин залежить від стану такого елемента мезоструктури, як контактні зони. За даними [12] ефективна ширина контактного шару цементного каменю із заповнювачами оцінюється значенням 10...20 мкм, інші дослідники вважають її більшою – 50...65 мкм [5,7,13]. Ступінь зміцнення структури ЦК у контактних шарах бетону різного віку коливається від 200 до 500% [12].

Спостерігається зростання модуля пружності при згині: в 1,64 р. – для ПЦ І-400, в 1,52 р. – для КЦ V/A-300 і в 1,12 р. – для КЦ V/A-400, що свідчить про зростання здатності структури матеріалу сприймати зовнішнє навантаження без мікроруїнувань порівняно з ЦМ. Це кореспондується із значним (у 1,5-2,3 р.) збільшенням в'язкості руйнування до моменту зрушення макротріщини. Більшою мірою це зростання стосується ДБ на бездобавочному ПЦ, що призвело до вирівнювання показника статичного критичного КІН (Кі) у ДБ на цементах різних типів.

Проте, урахування закритичної стадії деформування свідчить про наявність більш дієвого механізму гальмування розвитку макротріщини та досягнення її критичних розмірів у матеріалах на композиційних цементах. Це пояснюється тим, що сульфатно-лужний модифікатор композиційних цементів активує мінеральні поверхні зерен піску і забезпечує хемосорбційну взаємодію на поверхнях поділу компонентів (рис. 3, а), на протигагу застосуванню бездобавочного портландцементу (рис. 3, б). Це, в свою чергу, обумовлює зменшення кількості мікротріщин в контактних зонах, які

полегшують просування макротріщини. На користь цього твердження свідчать значення енергетичних характеристик тріщиностійкості (W_L , G_F), які на 31-63% перевищують відповідні значення для ДБ на ПЦ І-400.

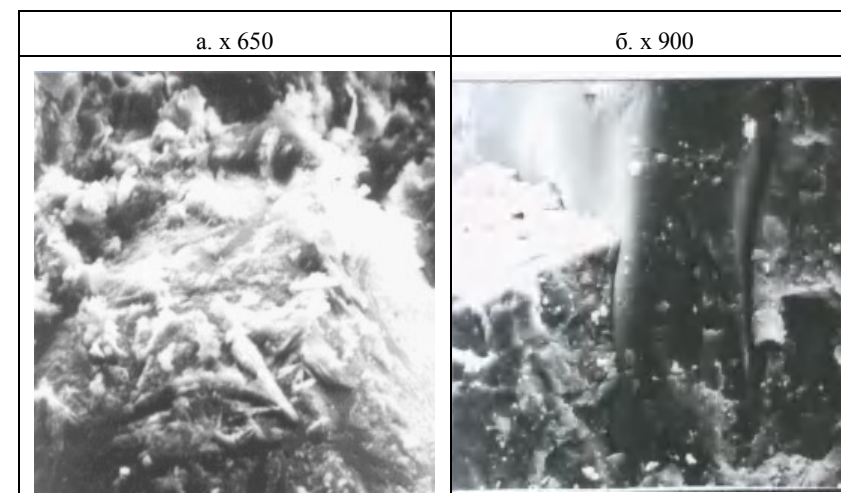


Рис. 4. Поверхні піску в бетоні на основі модифікованого композиційного цементу (а) і бездобавочного портландцементу (б).

Отже, в досліджуваних ДБ при приблизно рівних показниках міцності і деформативності вирішальну роль у підвищенні тріщиностійкості відіграє стан контактних зон цементної матриці і зерен піску.

Збільшення адгезії цементного каменю до поверхонь дрібного заповнювача, щільності і мікротвердості контактних зон, зменшення кількості пор і мікротріщин на поверхнях поділу забезпечують формування підвищеної тріщиностійкості на рівні мезоструктури. В наших дослідженнях такий ефект спричиняє застосування модифікованих композиційних цементів, що підтверджується і показником критерію крихкості, який має найменше значення у випадку застосування бездобавочного портландцементу ($79 \cdot 10^{-3} \text{м}$).

Наповнення ЦМ піском у співвідношенні Ц:П=1:8 (цементогрунт) призводить до значного падіння показників міцності і деформативності композиційних матеріалів незалежно від типу цементу. Властивості матеріалу значною мірою обумовлюють розвинуті поверхні поділу між компонентами. Фактор активації мінеральних поверхонь у зв'язку з малою витратою цементу не відіграє суттєвої ролі, проте забезпечує незначну перевагу цементогрунтам на композиційних цементах. Показники в'язкості руйнування зменшилися у 4-5 разів порівняно з ДБ. Значення питомих ефективних енерговитрат на статичне руйнування (G_F) цементогрунтів у 2,5-4 рази менші, ніж у цементних матрицях, що з точністю до навпаки стосується дрібнозернистих бетонів.

Таким чином, оптимальні характеристики мезоструктури за критерієм ефективного гальмування процесу поширення мікротріщин розмір яких за даними [1] становить, переважно, 0,2...0,4 мм, досягаються в певному діапазоні вмісту дрібного заповнювача, перевищення верхньої межі якого призводить до падіння міцності та тріщиностійкості. Межі діапазону суттєво залежать від стану контактних зон.

Введення в цементнопіщаний розчин крупного заповнювача спричиняє суттєве зростання міцності на розтяг при згині, що кореспондується із більшим, ніж у 1,5 рази зростанням в'язкості руйнування важких бетонів порівняно із дрібнозернистими. Це можна пояснити зростанням розміру елементу структурної неоднорідності на порядок при переході від мезо- до макроструктури, що обумовлює значне збільшення зони передруйнування в околі вершини тріщини і ефективної енергії руйнування, а відтак тріщиностійкості і міцності на розтяг при згині. Модуль пружності при згині набуває найвищих значень порівняно з ЦМ, ДБ і ЦГ. Водночас, міцність на стиск важкого бетону на цементгах різних типів приблизно однакова і незначно перевищує цей показник для дрібнозернистих бетонів, що пов'язано із збільшенням неоднорідності матеріалу.

Наявність крупного заповнювача, як елемента макроструктурної неоднорідності, тріщини і пори в зонах контакту відіграють як негативну роль концентраторів напружень (рис. 4, б), що ініціюють процес зародження і поширення тріщин, так і позитивну роль внаслідок гальмування і поглинання тріщин (рис. 4, а). Для напружено-деформованого стану при стиску переважають негативні процеси, що гальмує зростання міцності при введенні крупного заповнювача на відміну від міцності на розтяг при згині.

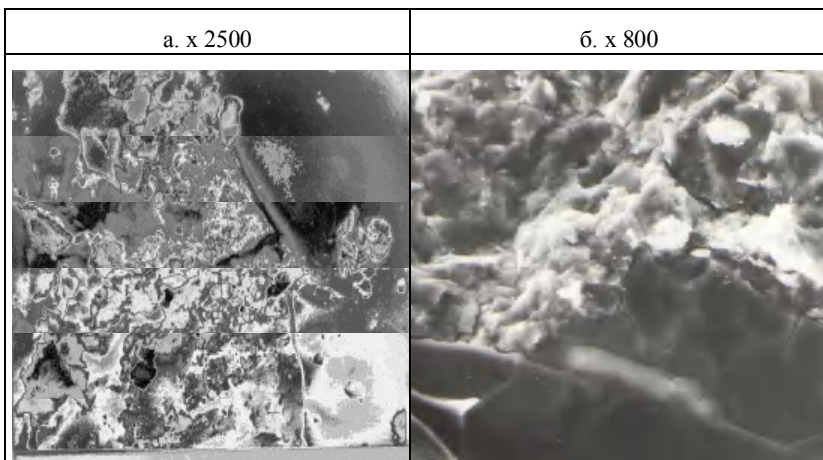


Рис. 5. Контактні зони цементного каменю з крупним заповнювачем

У важких бетонах застосування бездобавочного портландцементу забезпечило на 0,03-0,09 МПа^{1/2} вищі показники в'язкості руйнування. Це

кореспондується з енергетичними характеристиками тріщиностійкості, які у важкого бетону на ПЦ І-400 на 5-18% вищі, ніж у випадку застосування композиційних цементів. Більшою мірою поступається бетон на КЦ V/A-400, що підтверджується крихким характером його руйнування ($\chi_f=82 \cdot 10^{-3}$ м).

Причиною такої переваги, на нашу думку, є стан контактних зон цементно-піщаного розчину із зернами щебеню. Якщо мінеральна поверхня піску (кварц) забезпечує внаслідок кристалохімічної подоби найкращі умови для взаємодії з продуктами гідратації модифікованих композиційних цементів, то мінеральна поверхня зерен щебеню (вивержені ультракислі породи) – найбільш сприятлива підкладка для кристалізації новоутворень бездобавочного портландцементу.

Отже, на рівні макроструктури вирішальну роль у формуванні міцності, деформативності і тріщиностійкості, особливо, в умовах напружено-деформованого стану розтягу при згині, відіграють контактні зони цементно-піщаного розчину і зерен щебеню, стан яких залежить від хіміко-мінералогічного складу цементу, природи модифікатора і петрографічного складу гірської породи.

Висновок. Відображенням взаємозв'язку структури, міцності і тріщиностійкості бетонів є повністю рівноважні діаграми деформування, які дозволяють якісно описати процеси руйнування бетонів і кількісно оцінити їх тріщиностійкість за силовими та енергетичними критеріями. Сумісний аналіз діаграм деформування будівельних композитів дозволив порівняти їх здатність чинити опір зародженню, розвитку і поширенню тріщин. Виявлено, що за енергетичним критерієм тріщиностійкості бетон із різною ефективністю працює на докритичній (за відсутності макротріщини) і закритичній стадіях деформування (за наявності макротріщини). Це пояснюється тим, що момент зрушення макротріщини визначається характеристиками субмікро- і мікроструктури, а її розвиток до критичної довжини – характеристиками мезо- і макроструктури, а саме станом поверхонь поділу між компонентами бетону.

Виявлено присутність тріщин на всіх рівнях структури бетону вже у доексплуатаційній стадії. На рівні мезо- і макроструктури вирішальний вплив на показники тріщиностійкості здійснюють контактні зони, стан яких обумовлюється фізико-хімічною взаємодією на поверхнях поділу компонентів. Хіміко-мінералогічний склад цементу і природа модифікатора визначають ступінь неоднорідності мікроструктури і характер пористості, а відтак її можливості гальмувати розвиток мікротріщин.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.:Стройиздат, 1982. – 196 с.
2. Зайцев Ю.В., Сахи Д.М., Пирадов К.А. Механика разрушения бетонов различной макроструктуры. – М.: МГОУ, 2002. – 225с.

3. ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. - М.: Госстандарт, 1991. – 35 с.
4. Солодкий С.И., Поваляшко М.В. Вплив типу макроструктури на тріщинотійкість бетону // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 43,- Дн-вск, ПГАСА, 2007. – С.523-532.*
5. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чихладзе Э.Д. Повышение прочности и выносливости бетона. – Х.: Вища шк., 1986. – 152 с.
6. В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, А.Н. Бобрышев и др. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. –Ташкент: ФАН, 1991. – 345 с.
7. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Высш. Шк., 1987. – 415 с
8. Кривенко П.В. Роль вяжущих веществ в формировании структуры бетона как конструкционного материала // *Будівельні конструкції: зб. наук. пр – К: НДІБК., 2003. – вип. 59. – С.43 - 51.*
9. Гузев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. – Брест: БПИ, 1999. – 215 с
10. Гордон С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. – М.: Стройиздат, 1969. – 151 с.
11. И.Н. Ахвердов, А.Е. Смольский, В.В. Скочеляс. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. – Минск: «Наука и техника», 1973. –232 с.
12. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. М.: Транспорт, 1991. – 151 с.
13. А.Г. Ольгинский. Особенности контактообразования в цементных бетонах с минеральными микрозаполнителями // *Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури „Композиційні матеріали для будівництва”, вип. 2004-1(43), т. 2, Макіївка. – 2004. – С.134 -140.*

УДК 624.21

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

В. И. Соломка, к.т.н., с.н.с.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. И. Лазаряна, г. Днепропетровск

В современных условиях хозяйствования на железнодорожном транспорте, как и в других отраслях, огромное значение имеет вопрос получения экономического эффекта от эксплуатации искусственных сооружений. Следует отметить, что искусственные сооружения, эксплуатируемые на железной дороге, не приносят прибыли в денежном исчислении непосредственно. Поэтому определение прибыли, которая

получается в результате эксплуатации сооружений в исправном состоянии, является сложной задачей.

Подход к определению экономической эффективности эксплуатации искусственных сооружений должен базироваться на трактовке уменьшения затрат от неработоспособного (ограниченно работоспособного) состояния искусственного сооружения как условной прибыли, для сооружения находящегося в эксплуатации (без учета капитальных вложений на его строительство). Отсюда при оценке экономического эффекта потери на приведение искусственного сооружения в работоспособное состояние не должны превышать уменьшения потерь прибыли от перевозного процесса, связанных с неработоспособностью или частичной работоспособностью сооружения.

Все искусственные сооружения, эксплуатируемые на железной дороге, являются восстанавливаемыми системами. Для таких систем экономический эффект, согласно [1], определяется по двум вариантам:

- экономический эффект от продления долговечности сооружения;
- экономический эффект от повышения надежности сооружения.

В первом варианте, экономический эффект связан с заменой устаревших и вышедших из строя конструкций на более современные.

Во втором варианте применяются современные методы ремонтов и усиления эксплуатируемых сооружений.

Для того, чтобы оценить какой из двух вариантов реконструкции эксплуатируемых сооружений является более эффективным и какой из них принять к действию, необходимо определить затраты для того и другого варианта, сравнить их и принять решение по дальнейшей эксплуатации сооружения.

Критерием целесообразности замены конструкций, согласно [2], является следующее выражение

$$\Delta c = c_n - \sum_{i=1}^n \frac{C_{z_i}}{T_{np_i}} \geq 0,$$

где Δc - удельный показатель эффективности;

c_n - удельные (на принятую единицу времени) возможные потери из-за ограничения работоспособности искусственного сооружения;

n - количество элементов конструкции, подлежащие замене;

C_{z_i} - стоимость замены i -го элемента конструкции, включая стоимость выполнения работ и стоимость элемента;

T_{np_i} - назначенный срок службы i -го элемента конструкции.

В случае замены устаревшей конструкции на новую удельный показатель эффективности должен быть выше нуля. Это значит, что новая конструкция должна удовлетворять повышенным требованиям по качеству исполнения и по продолжительности срока службы, т. е. способствовать продлению долговечности всего сооружения.