

Драган В.И., Радзишевский П., Загуляев С.В., Строк М.Н.

## ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕННЫХ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ БЕТОНА НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Неизбежным для всех строительных конструкций является старение – изменение с течением времени прочностных и деформационных свойств, приводящих к невозможной их дальнейшей эксплуатации. Основной причиной старения для бетонных и железобетонных конструкций являются структурные изменения, связанные с образованием, накоплением и развитием микротрещин. Хотя процесс развития микротрещин может занимать длительное время, образование макротрещины происходит внезапно и приводит к разрушению конструкции за короткое время. Поэтому, изучая процессы старения, влияния положительных и отрицательных факторов на старение, накопление микрповреждений, можно заранее предотвратить разрушение, как конструкции, так и всего здания.

На сегодняшний день наиболее важным научным направлением являются изучение долговечности. До сих пор не решены актуальные и наиболее главные вопросы, такие как, изменение прочностных характеристик бетона с течением времени, интенсивность развития процесса старения и влияние на бетон негативных факторов, прогнозирование остаточной прочности материала и остаточного срока эксплуатации всей конструкции. Длительные многолетние исследования по изучению структуры бетона в течение всего срока их эксплуатации могут дать ответ на эти и другие вопросы.

Для проведения испытаний изготавливались цилиндрические образцы диаметром 100мм, длиной 200мм. Определение влияния накопленных микрповреждений на характеристику трещиностойкости коэффициент интенсивности напряжений –  $K_{IC}$  осуществлялось на цилиндрических образцах с теми же габаритными размерами и с кольцевым концентратором. Концентратор создавался при помощи металлического кольца, шириной 10 мм и толщиной 1 мм установленного в опалубку при бетонировании (рис. 1). Внутренняя грань кольца затачивалась до радиуса закругления 0,01 мм. Для предотвращения соприкосновения концентратора с бетоном, кольцо смазывалось маслом перед бетонированием.

Для бетонной смеси использовался щебень с крупностью 5-20мм, гравелистый песок с максимальной крупностью зерна 5мм. Состав бетонной смеси определялся соотношением цемент: песок: щебень Ц:П:Щ=1:1,49:2,81 В/Ц=0,43; ОК=5 ... 7 см. Образцы твердели 28 суток в пропарочной камере при  $t=22\pm 25^\circ\text{C}$ ,  $w=100\%$ .

Испытания проводили на разрывной машине ИР 5145-500. Бетонные образцы клеились клеем «ЭДП» к захвату, разработанному специально для испытаний на разрывной машине (рис. 1). Скорость нагружения в процессе испытаний составляла  $8,3 \cdot 10^{-3}$  мм/с.

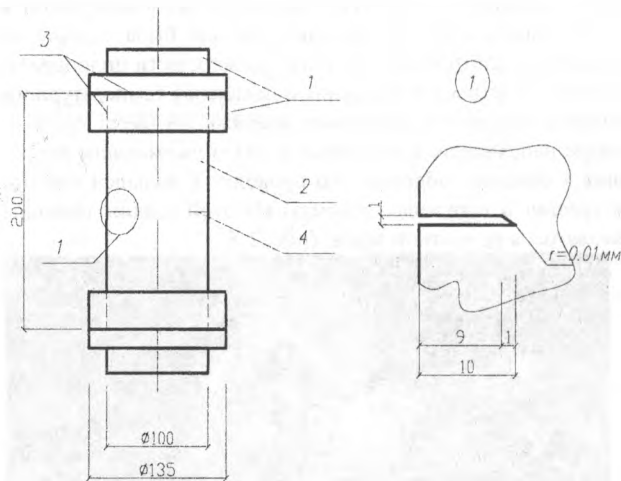


Рис. 1. Захваты для испытания бетонных образцов. 1 – захватные приспособления; 2 – бетонный образец; 3 – клей «ЭДП»; 4 – кольцевой концентратор.

Накопление микротрещин производилось в следующей последовательности. Торцевая часть цилиндра полировалась. Затем образцы помещались в муфельную печь и нагревались до температуры  $350^\circ\text{C}$ . Скорость подъема температуры в печи составляла  $30^\circ\text{C}$  в минуту. При температуре  $350^\circ\text{C}$  образцы выдерживались около 15 минут, после чего вынимались из печи и сразу погружались в воду с температурой  $10-12^\circ\text{C}$  на 5-7 минут. Окончательно остывшие и высохшие на воздухе образцы исследовались на наличие микротрещин с использованием ярко-желтого красителя с размером частиц около 0,1 мкм, разведенного в воде. Нанесение красителя осуществлялось путем легкого втирания сухой ветошью на подготовленную поверхность с последующим удалением излишков [1]. Наблюдение микротрещин осуществлялось с помощью микроскопа МКИ-2М-1 при увеличении 60 крат трещины, фотографировались при помощи цифровой камеры и транслировались на экране компьютера. Распечатанные изображения микрошлифов обмерялись при помощи измерителя. Разработанная методика позволила распознать, и измерить трещины длиной начиная с 5 мкм.

Образование микротрещин происходило в результате неодинаковых температурных деформаций отдельных компонентов бетона (крупный и мелкий заполнители, цементный камень) имеющих различные значения температурных коэффициентов линейного расширения при нагреве и охлаждении, а также из-за температурных напряжений, возникающих в образце при быстром охлаждении.

Разрушение контактной зоны является в нашем случае наиболее типичным случаем микротрещинообразования

Драган Вячеслав Игнатьевич. Профессор, к.т.н., первый проректор Брестского государственного технического университета.

Радзишевский Петр. Д.т.н., профессор Политехнической Белостокской, Польша.

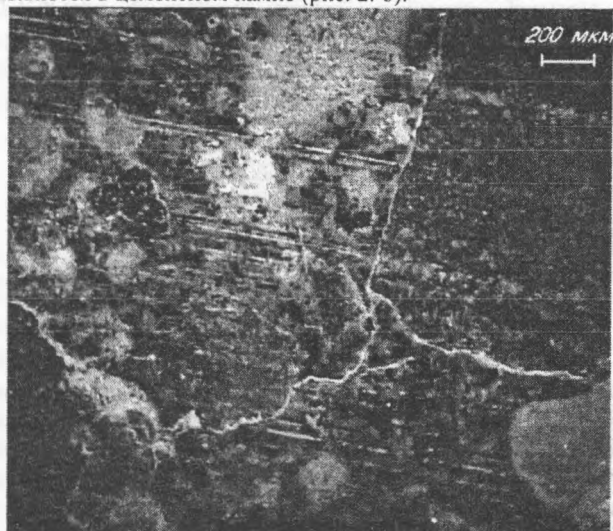
Загуляев Станислав Валерьевич. Аспирант каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Строк Михаил Николаевич. Аспирант каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

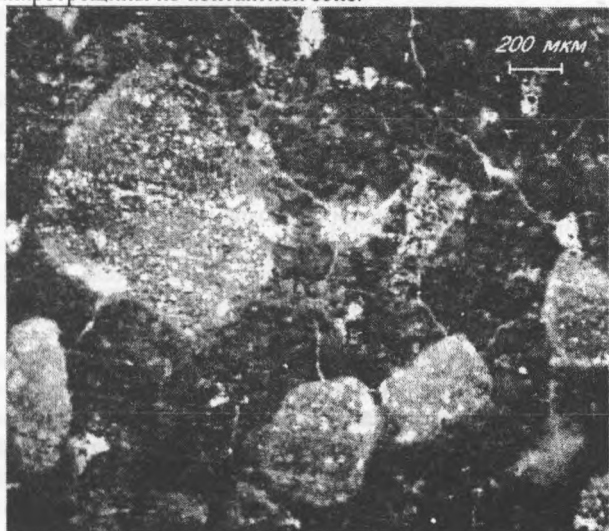
Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

(рис.2. а). Усилия от неодинаковых температурных деформаций больше сил сцепления, существующих на контактных участках между заполнителем и цементным камнем. Химические изменения в бетоне не происходили, нагрев осуществлялся непродолжительное время.

Изучение концентрации микротрещин по всему объему после температурных воздействий выполнялось путем разрезания цилиндра пополам. При наблюдениях в микроскоп в центре сечения образца плотность трещин была меньше по сравнению с плотностью в местах у поверхности цилиндра. В результате быстрого охлаждения и появления температурного градиента эпюра температурных напряжений имеет растягивающие напряжения в наружных слоях и сжимающие напряжения в середине образца. Это приводит к большей плотности трещин в наружных объемах. На этой стадии трещины появляются в цементном камне (рис. 2. б).



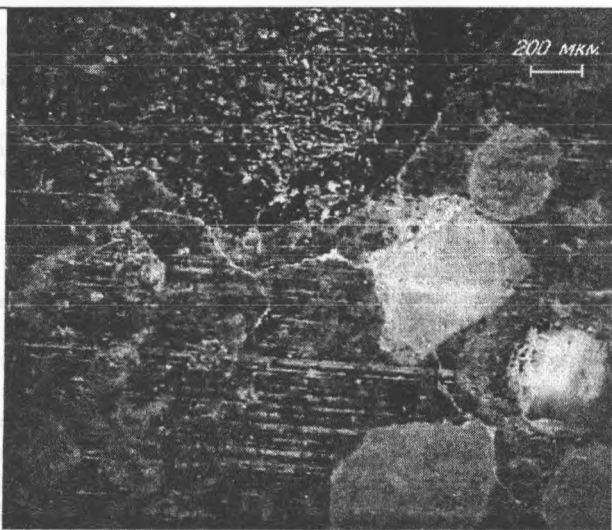
а) микротрещины по контактной зоне.



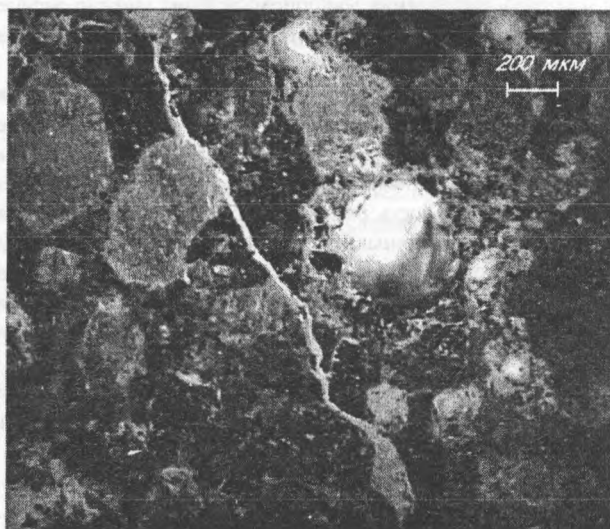
б) микротрещины в цементном камне.

Рис. 2. Фотография структуры бетона с микротрещинами.

В связи с рассеянностью микротрещин по объему подтверждается возможность использования термоудара для имитации процесса старения. За параметр поврежденности структуры принята плотность трещин – это суммарная длина трещин на единице поверхности образца. На рис. 3 представлены фотографии с плотностью трещин  $10,5 \text{ мм/мм}^2$  и  $4,8 \text{ мм/мм}^2$ .



а)



б)

Рис. 3. Фотографии структуры бетона с плотностью трещин, а)  $10,5 \text{ мм/мм}^2$  и б)  $4,8 \text{ мм/мм}^2$ .

Для увеличения плотности трещин образцы повторно подвергались нагреву и охлаждению. В результате циклического температурного воздействия значения плотности трещин достигали значений  $10-11 \text{ мм/мм}^2$ .

В табл. 1 представлены характеристики поврежденности бетона с различным расположением микротрещин в структуре бетона. Из табл.1 следует, что наиболее поврежденным участком структуры является контактная зона -  $60-75\%$  от общей плотности трещин. При этом микротрещины в цементном камне являются в основном связующими между микротрещинами, проходящими по контактной зоне.

Образцы с различной степенью поврежденностью бетона испытывались на центральное растяжение. На рис. 4 представлены характерные диаграммы деформирования бетона. На диаграммах просматривается характерная зависимость от плотности трещин. С увеличением плотности трещин в бетоне резко снижается не только несущая способность, но и сильно уменьшается модуль упругости. При высокой плотности микротрещин, более  $10 \text{ мм/мм}^2$  диаграмма принимает пологое положение, где практические исчезает упругая зона и развиваются пластические деформации.

Таблица 1. Характеристики структуры бетонных образцов с различной остаточной прочностью.

Кубиковая прочность, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Общая плотность трещин, мм/мм <sup>2</sup>	Плотность трещин по контактной зоне, мм/мм <sup>2</sup>	Плотность трещин в цементном камне, мм/мм <sup>2</sup>	Остаточная прочность при растяжении, МПа
19.1-20.2	2,62-2.35	6,8	4,0	2,8	1,09
		8,0	4,63	3,37	0,92
		13,2	7,7	5,5	0,72
		10,8	8,8	2,0	0,52
		10,0	5,9	4,1	0,5
		10,8	5,8	5,0	0,43
22-24.3	2,02-2,5	7,1	6,57	0,53	1,31
		6,0	4,3	1,7	1,12
		7,8	4,53	3,5	0,55
		7,7	6,0	1,7	0,32
		6,8	4,4	1,4	0,32
		10,0	6,45	3,55	0,29

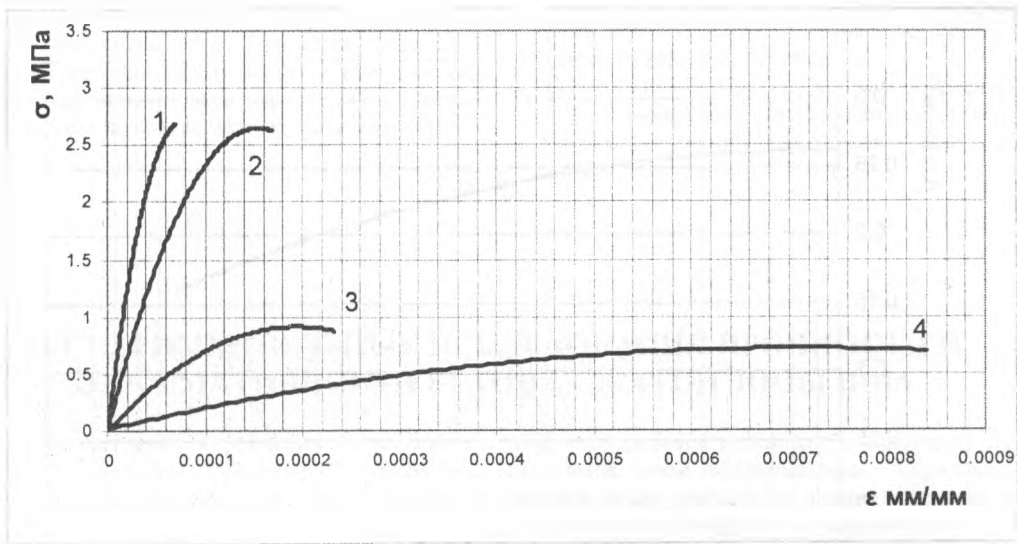


Рис. 4. Диаграммы растяжения бетонных цилиндров с различной плотностью трещин. 1,2 – диаграммы растяжения неповрежденных бетонных образцов; 3 – диаграмма растяжения бетонных образцов с плотностью трещин 8,0 мм/мм<sup>2</sup>; 4 – 13,2 мм/мм<sup>2</sup>.



Рис. 5. Зависимость прочности и предельных относительных деформаций при растяжении от плотности трещин.

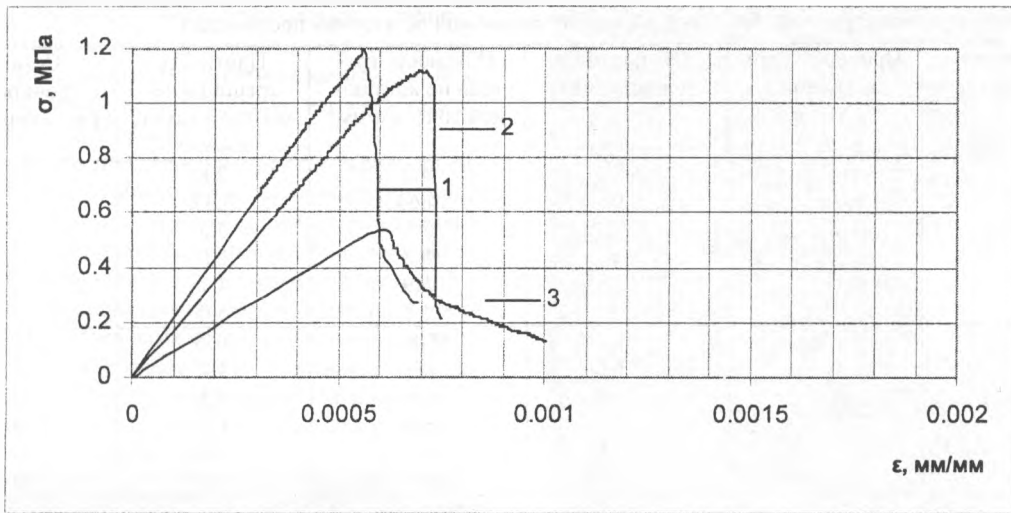


Рис. 6. Диаграммы деформирования бетонных образцов с кольцевой трещиной. 1 – плотность дефектов 2,95 мм/мм<sup>2</sup>; 2 – 3,3 мм/мм<sup>2</sup>; 3 – 5,85 мм/мм<sup>2</sup>.

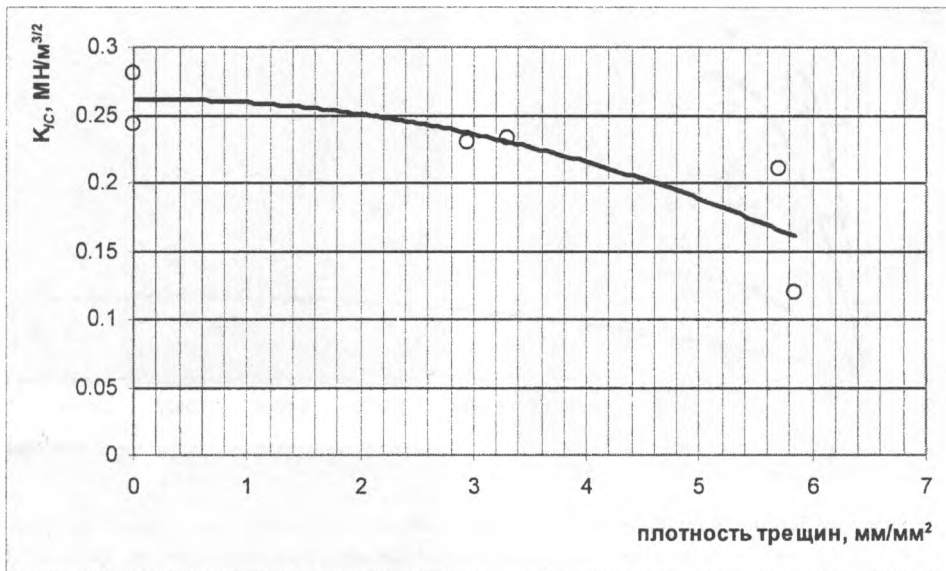


Рис. 7. Зависимость  $K_{IC}$  от плотности дефектов.

Предельная деформативность наиболее поврежденных образцов превышает в несколько раз предельные деформации неповрежденного образца. Наличие микротрещин резко повышает неупругие свойства бетона. Разрушение поврежденных образцов происходило вязко, в отличие от неповрежденного, где разрыв происходил мгновенного и хрупко. Многочисленные наблюдения за реальными конструкциями подтверждают, что с возрастом у железобетонных конструкций сильно увеличиваются остаточные деформации.

Для выявления связи между концентрацией микротрещин и остаточной прочностью была построена зависимость плотности трещин и прочностью при растяжении (рис. 5).

Из графика (рис. 5) видно как с увеличением плотности микротрещин уменьшается прочность. При плотности трещин до 3-4 мм/мм<sup>2</sup> наблюдается незначительное уменьшение прочности, при плотности 6-8 мм/мм<sup>2</sup> происходит снижение прочности в 2-3 раза. Дальнейшее накопление повреждений делает бетон не пригодным для эксплуатации.

На рис. 6. представлены диаграммы деформирования бетонных образцов с концентраторами напряжений. С увеличением плотности микротрещин (диаграммы 2, 3) прочность образцов снижается и увеличивается предельная растяжи-

мость. Из диаграмм видно как с увеличением плотности трещин в 2 раза, во столько же раз уменьшается прочность бетона.

Для определения характеристики вязкости разрушения бетона в зависимости от накопленного повреждения рассчитывали коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$  по формуле [6]:

$$K_I = F'_I \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{\pi \cdot d \cdot c / D}, \quad (1)$$

где

$$F'_I = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} \lambda + \frac{3}{8} \lambda^2 - 0.363 \lambda^3 + 0.731 \lambda^4 \right) \cdot 1 + 0.1 \left[ \left( \frac{2c}{D} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{2c}{D} \right)^2 \right], \quad \lambda = \frac{d}{D}, \quad c = \frac{D-d}{2},$$

$d = 80 \text{ мм}$ ,  $D = 100 \text{ мм}$ ,  $c = 10 \text{ мм}$ .  $F'_I$  - безразмерный коэффициент интенсивности напряжений.

На рис. 7. представлена зависимость  $K_{IC}$  от плотности трещин. При увеличении плотности трещин в 5-6 раза  $K_{IC}$  уменьшается в 1-1,5 раза, по сравнению с неповрежденными образцами.

При плотности трещин близких к нулю образец разрушался хрупко. У поврежденных образцов наблюдалось медленное подрастание магистральной трещины в процессе нагружения.

### ВЫВОДЫ

1. Установлена зависимость прочности и трещиностойкости бетонов от плотности накопленных повреждений. Плотность дефектов величиной 13 мм/мм<sup>2</sup> является предельной и приводит к полной непригодности дальнейшей эксплуатации бетонной конструкции.
2. Предельная деформативность увеличивается в зависимости от уровня накопленных повреждений и может в несколько раз превышать предельную деформативность неповрежденного бетона.
3. С увеличением плотности дефектов коэффициент интенсивности напряжений уменьшается. При достижении предельных значений плотности дефектов бетон разрушается вязко. Предлагается использовать параметры трещиностойкости бетона, основанные на энергии разрушения.

УДК 624.012.46.046

*Жукьян А.П.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ БЕТОНА СЖАТОЙ ЗОНЫ ШВА

Одним из распространенных и эффективных способов усиления плит перекрытий является усиление созданием неразрезности. Конструктивно неразрезность осуществляется установкой надпорной арматуры с последующим замоноличиванием швов на опорах и устройством наращивания.

На образованных после усиления плит перекрытия неразрезных опорах сжатая зона состоит из бетона основной (усиливаемой) конструкции и бетона замоноличивания (наращивания). При этом толщина шва между торцами усиливаемых плит перекрытий является переменной. Устройство наращивания и замоноличивание швов на неразрезных опорах выполняется бетоном одного состава, прочностные и деформационные характеристики которого могут отличаться от бетона усиливаемой конструкции. Соответственно возникла необходимость изучения прочности и деформативности бетона сжатой зоны шва.

Для моделирования работы бетона шва сжатой зоны были изготовлены опытные образцы в виде призм 150x150x600мм, состоящие из сборных элементов и бетона замоноличивания шва (рис.1). Состав бетонной смеси для изготовления сборных элементов соответствовал составу для изготовления многослойных плит перекрытий. После формирования сборные элементы подвергались температурно-влажностной обработке в пропарочных камерах завода железобетонных изделий.

В лаборатории Полоцкого государственного университета сборные элементы попарно были объединены в опытные образцы в виде призм посредством замоноличивания между

- ### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
1. Драган В.И., Строк М.Н. Методика исследования накопления дефектов и повреждений при помощи микроструктурного анализа// Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. №1(13). – С. 22-25.
  2. Драган В.И., Загуляев С.В.. Методика исследования механических свойств материалов с использованием разрывной машины ИР 5145-500-10.// Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. №1(13). – С. 25-29.
  3. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат. 1979. – 128 с.
  4. Макагонов В.А. Бетон в условиях высокотемпературного нагрева. – М.: Стройиздат. – 1979. – 84 с.
  5. Kjellsen K.O., Wallevik O.H., Fjallberg L. Microstructure and microchemistry of the paste – aggregate interfacial transition zone of high – performance concrete. *Advances in Cement Research*, 1998, 10, №1, Jan. 33-40.
  6. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах.: Пер.с англ./Под ред. Ю.Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с., ил.
  7. Шевченко В. И. Энергетический подход к оценке вязкости разрушения цементного камня и бетона.//Бетон и железобетон, - 1985. №1. – С.35-36.
  8. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 18с.

ними шва заданной толщины. До испытания опытные образцы в виде призм выдерживались в нормальных условиях в течении 28-ми суток после замоноличивания швов. Уход за бетоном замоноличивания не производился, так как в реальных условиях при усилении созданием неразрезности сжатая зона плит перекрытий и покрытий на образованных после усиления неразрезных опорах является недоступной. Дополнительно для определения характеристик бетона замоноличивания шва были изготовлены цельные призмы 150x150x600мм также по три образца для каждой серии.

В качестве варьируемых факторов были приняты: ширина шва  $\Delta$  (20мм, 90мм, 200мм) и призмная прочность бетона замоноличивания (15.6 МПа, 23.9 МПа, 39.5 МПа). Были изготовлены и испытаны по три призмы-близнеца каждой серии. Испытание на центральное сжатие опытных образцов в виде призм производилось на гидравлическом прессе П-125 с измерением деформаций на каждой из граней посредством индикаторов часового типа с ценой деления 0,01мм закрепленных на базе 400мм при помощи металлических рамок. Дополнительно для измерения деформаций были наклеены по каждой грани тензорезисторы с базой 50мм на бетон сборных элементов и бетон замоноличивания (за исключением стыка 20мм). При работе с тензорезисторами использовался тензометрический мост ЦТМ-5. Для измерения деформаций контактной зоны шва использовались тензометры Гугенбергера с ценой деления 0,001 мм. Нагрузка прикладывалась ступенями не более 10% от разрушающего значения, сохраняя в пределах каждой ступени скорость нагружения 0,6±0,2 МПа/с.

*Жукьян А.П. Магистр технических наук, аспирант каф. железобетонных и каменных конструкций Полоцкого государственного университета.*

*Беларусь, ПГУ, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.*