
5 6.0000E+00 1.5000E+00 4.3687E-04 -2.5980E-03
Truss Element
Elmt Matl 1-coord 2-coord 3-coord Force Strain
1 1 0.000E+00 7.500E-01 0.000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
2 1 1.500E+00 0.000E+00 0.000E+00 -2.00000E+01 -4.85413E-05
3 1 1.500E+00 7.500E-01 0.000E+00 -2.23607E+01 -5.42709E-05
4 1 1.500E+00 1.500E+00 0.000E+00 4.00000E+01 9.70827E-05
5 1 3.000E+00 7.500E-01 0.000E+00 1.00000E+01 2.42707E-05
6 1 4.500E+00 7.500E-01 0.000E+00 -2.23607E+01 -5.42709E-05
7 1 4.500E+00 1.500E+00 0.000E+00 2.00000E+01 4.85413E-05

Листинг 2. Результаты расчета фермы

Программы FEAP и FEAPrv могут успешно использоваться в учебных курсах сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и подобных для демонстрации значения различных типов конечных элементов и моделирования различных алгоритмов решения задач.

Программы FEAP и FEAPrv могут успешно использоваться в исследовательских целях для решения задач, которые требуют разработки новых алгоритмов решения или расширения возможностей существующих алгоритмов.

Программы FEAP и FEAPrv могут решать статические и динамические задачи строительной механики в линейной и нелинейной постановках. При использовании программы FEAPrv все данные хранятся в оперативной памяти. Это обстоятельство определяет размер решаемых задач, который не может превышать нескольких десятков тысяч неизвестных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сеницын С.Б. Строительная механика в методе конечных элементов стержневых систем. – М. : Изд-во АСВ, 2002. – 320 с.
2. Hutton D.V. Fundamentals of finite element analysis. – New York : McGraw-Hill, 2004. – 494 p.
3. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. – London : McGraw-Hill, 1971. – 521 p.
4. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Vol. 1. Basic formulation and linear problems. – London, New York : McGraw-Hill, 1989. – 648 p.
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Vol. 2. Solid and fluid mechanics. – London, New York : McGraw-Hill, 1991. – 807 p.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Vol. 1. The basis. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. – 707 p.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Vol. 2. Solid and structural mechanics. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. – 459 p.

В.Б. СТЕПАНОВ, Б.Н. МЕЛЬКОВ, В.В. БЕЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ: СТЕПЕНЬ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ – СЦЕПЛЕНИЕ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ – ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ

Железобетонные конструкции зданий и сооружений, испытывающие воздействия силовых нагрузок и агрессивных эксплуатационных сред, подвержены необратимым изменениям структуры и механических характеристик составляющих компонентов – бетона и арматуры.

Подход к определению вклада коррозии арматуры и бетона в работу изгибаемых и сжато – изгибаемых железобетонных конструкций, должен основываться на следующих положениях:

- влияние коррозионной среды на бетон рассматривается как фактор, изменяющий его структуру и деформативно-прочностные свойства;

- коррозия арматуры учитывается уменьшением площади ее расчетного сечения, а также количеством продуктов коррозии. Коррозия арматуры производит продукты, которые имеют в несколько раз больший объем, чем сталь до коррозии, что приводит к возникновению внутренних усилий в бетоне, окружающем арматуру. Когда напряжения превышают предел прочности бетона на растяжение, появляются трещины в бетоне, которые в конечном счете раскрываются на поверхности бетона.

- совместная работа арматуры и бетона обеспечивается силами сцепления, которые, в свою очередь определяют работу железобетонной конструкции как единого монолитного тела. В общепринятых расчетных методиках определения прочности и жесткости изгибаемых железобетонных элементов надежное сцепление арматуры с бетоном подразумевается и учитывается в виде допущений в расчете. В зависимости от уровня коррозионного поражения компонентов и напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций величина сил сцепления может значительно изменяться, что приводит к уменьшению изгибной жесткости и значительному снижению несущей способности конструкции.

В лаборатории института проводились экспериментальные исследования серий железобетонных образцов в неагрессивной и агрессивной средах при постоянных физико – механических характеристиках бетона с учетом работ отечественных и зарубежных авторов [3] – [5]. Коррозионное поражение арматуры достигалось электрохимическим способом – см. Рис 1.

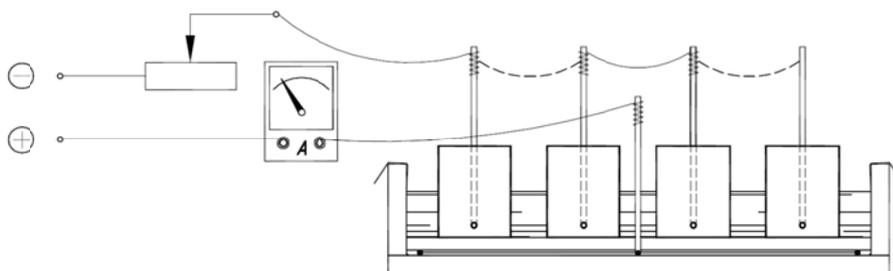


Рис. 1. Установка для электрохимической коррозии арматуры

Образцы серии укладываются на деревянную подкладку в резервуар с 5% раствором NaCl. Выпуски арматуры (см. Рис 2) позволяют последовательно соединить цепь из образцов – близнецов к аноду источника постоянного тока. Катод выполнен в виде изогнутого И – образного стального стержня, обеспечивающего одинаковый электрический потенциал железобетонных образцов. Изменением собственного сопротивления арматуры в железобетонных балках и стального катода по длине участка электрической цепи пренебрегаем, ввиду их малого значения по отношению к сопротивлению бетона защитного слоя и раствора соли. Установка дополнительно оснащается амперметром с ценой деления 0,005А и реостатом. Сила тока в цепи регулируется реостатом до значения 0,1А и подается от блока питания постоянного тока.

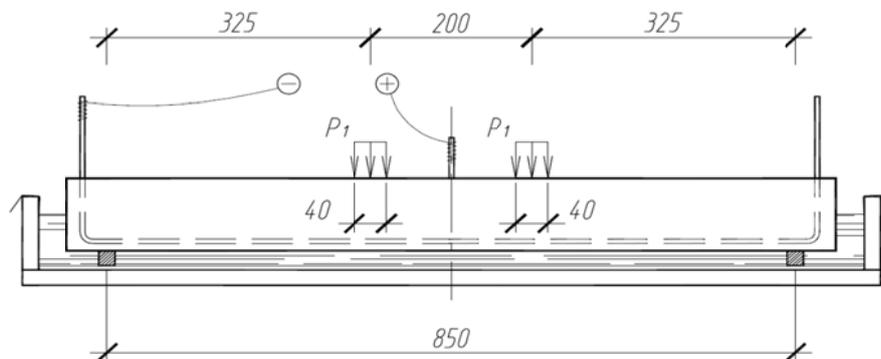


Рис. 2. Совмещенный вид и схема испытания образцов

Каждая из 7 серий (всего 21шт.) балок с размерами (Lxbxh) 950x80x100мм. изготавливаются из мелкозернистого бетона В25 с составом (по объему):

Щебень гранитный фр. 5-11мм. с маркой по дробимости М1000 – 7 о.ч.; песок Мкр.=2,2 – 3 о.ч.; цемент класса 42,5 производства СЕМІ – 3 о.ч.; отношение В/Ц=0,45; добавка FeCl₃ – 2% от массы цемента.

Варианты армирования железобетонных образцов в сериях:

- серия 1, 2 и 3 – одиночная арматура \varnothing 10A240 с защитным слоем 10, 17 и 25 мм. соответственно;

- серия 4 и 5 - одиночная арматура \varnothing 6A400 по два образца с защитным слоем 11, 17 и 24мм;

- серия 6 и 7 - две арматуры \varnothing 6A400 с расположением стержней на расстоянии равном диаметру арматуры с защитным слоем 11мм;

Каждая серия образцов изготавливается в один прием, с помощью бетоносмесителя емкостью 50л. Образцы выдерживаются в помещении с температурой $20\pm 2^\circ\text{C}$ и влажностью 60% до набора распалубочной прочности в течении 14 часов. Затем их помещают в пропарочную камеру с режимом термообработки: нагрев от 20°C до 60°C – 1,5 часа; изотермический прогрев – 6 часов; охлаждение 60° до 25° - 16 часов.

После завершения процесса коррозии арматуры (появления на образцах продольной раскалывающей трещины шириной 0,1 – 0,7мм.) балки извлекают из раствора, и через 2 часа подвергают испытанию на изгиб - см. Рис 2.

Также производится оценка сцепления арматуры образцов с бетоном. Для этого в приопорной части балки вырезается фрагмент длиной 8-10см., оставляя свободный конец арматуры достаточной длины для захвата и выдергивания.



Рис. 3. Сечение с продуктами коррозии



Рис. 4а. Арматура \varnothing 6A400 до коррозии



Рис. 4б. То же после коррозии



Рис. 4в. То же очищено в 10% HCl

Нагрузка, достаточная для выдергивания арматуры не превышает соответствующие пределы текучести для некорродировавших образцов арматурных стержней, что

позволяет достоверно определять процент коррозии арматуры по образцам без учета остаточного удлинения - см. рис 3, рис 4.

Продукты коррозии с арматурных стержней удаляются совместно механическим способом и 10% раствором HCl. На рис 3 и 5 показано характерное трещинообразование для одиночной (серии 4 и 5) и сдвоенной арматуры (серии 6 и 7). В последнем случае растягивающие напряжения в бетоне создают магистральную трещину, раскалывающую защитный слой бетона. Она раскрывается на нижней поверхности образца в интервале между арматурными стержнями.



Рис. 5. Продольная трещина, характерная для элементов с двумя стержнями арматуры в растянутой зоне

По результатам испытания образцов серий 1-7 составлены графики. Разброс уровня коррозии арматуры для серий балок, осредненный по площади сечения составляет: серия 1 – 8,8 до 14,2%; серия 2 - 2,8 до 6,6%; серия 3 – 10,1 до 12,2%; серии 4 и 5 для защитного слоя 11мм – 12,0 до 22,8%, для защитного слоя 17мм – 9,5 до 12,4%; для защитного слоя 24мм. – 7,2 до 10,1%; серии 6 и 7 – 6,2 до 9,8%.

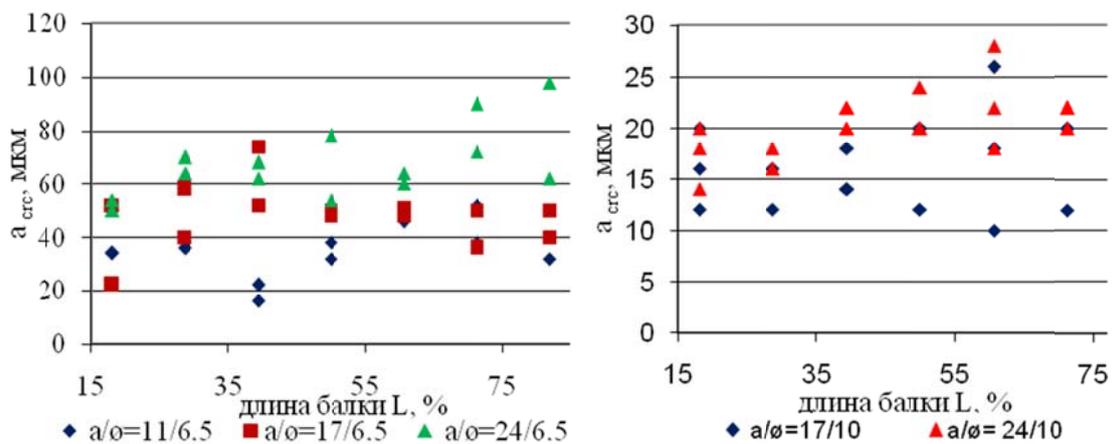


График 1 и 2. Зависимость ширины раскрытия трещины от коэффициента a/δ (защитный слой бетона/диаметр арматуры) для арматуры $\delta 6A400$ и $\delta 10A240$

Полученные данные указывают на то, что соотношение a/δ для балок, находящихся в одинаковых условиях электро-химической коррозии, оказывает влияние на ширину раскрытия продольной трещины. Данные нуждаются в осмыслении и статической обработке с учетом величины коррозии арматуры.

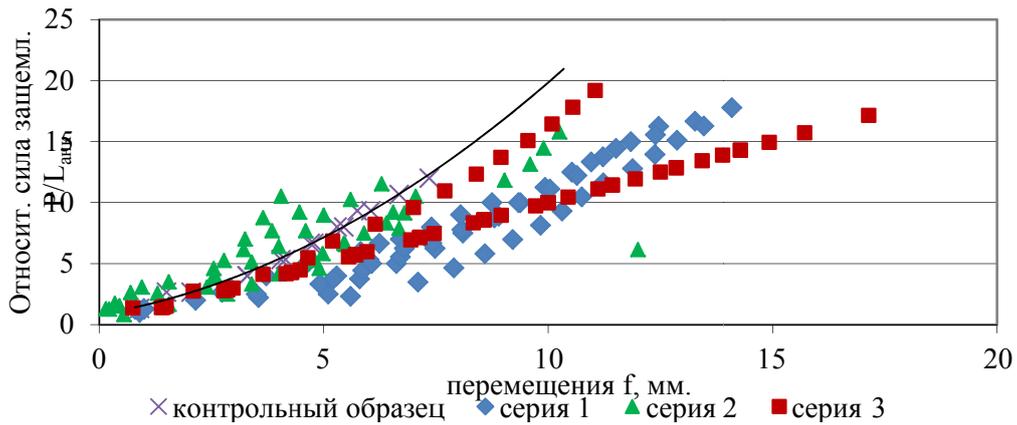


График 3. Зависимость вида $f(P/L_{анк})$ для арматуры $\varnothing 10A240$

На графике 3 отображены зависимости сил сцепления арматуры с бетоном (выраженных в виде $P/L_{анк}$) для разных серий балок. Поле точек зависимости силы заземления – перемещения для образцов серии 2 (с меньшим уровнем коррозии относительно серий 1 и 3 - 2,8 до 6,6% по площади сечения арматуры) показывает незначительное улучшение свойств сцепления бетона с арматурой при небольшом уровне коррозии.

На графиках 4 и 5 построены полиномиальные кривые, описывающие зависимости силы сцепления от степени коррозии арматуры, при соответствующих отношениях a/\varnothing . Для образцов представленных серий характерно увеличение относительных деформаций проскальзывания при увеличении степени коррозионных повреждений.

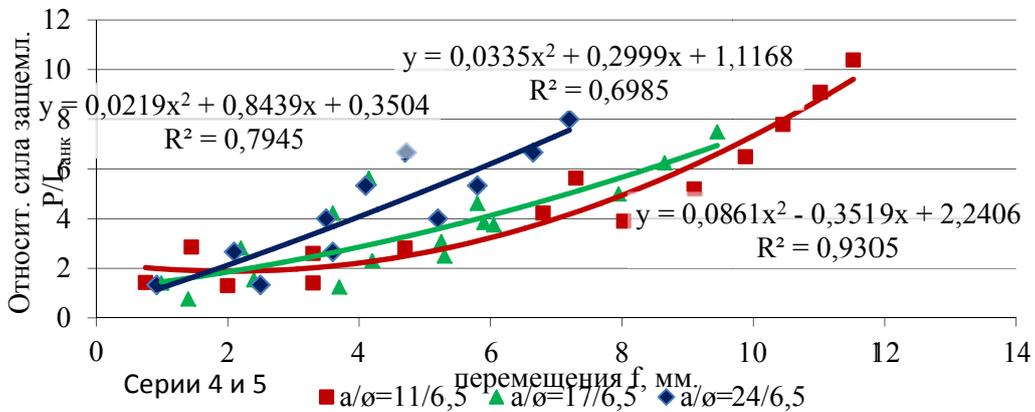


График 4. Зависимость вида $f(P/L_{анк})$ для арматуры $\varnothing 6A400$

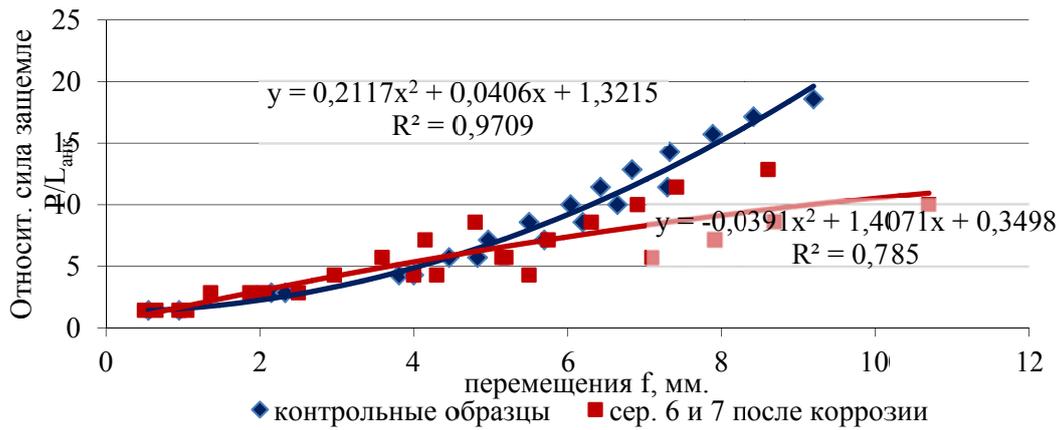
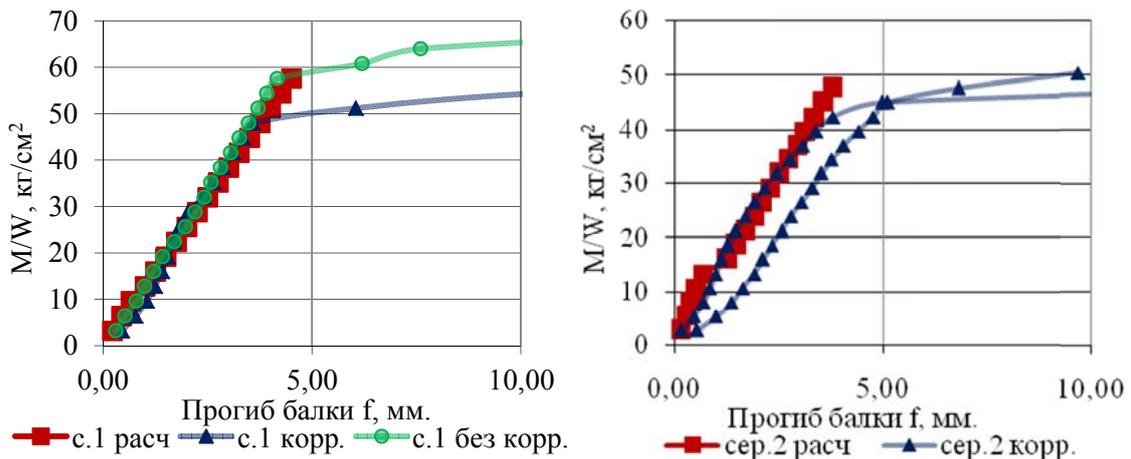
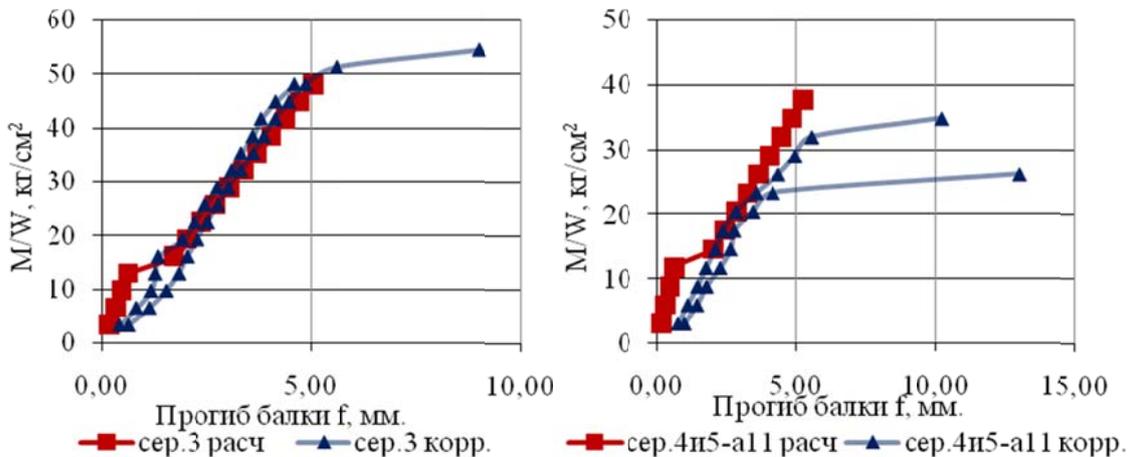


График 5. Зависимость вида $f(P/L_{анк})$ для арматуры 2ØБ400

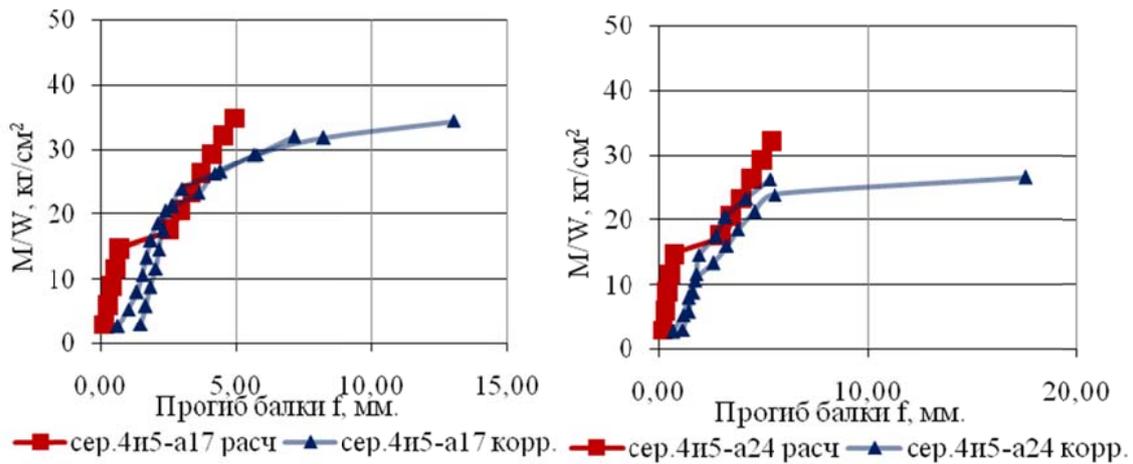
Графики 6-12 построены по результатам испытания балок серий 1-7 и их расчета по нормам СП 52-101-2003. Результаты расчета прогибов по нормам СП 52-101-2003 совпадают с значениями испытаний натуральных балок, не подверженных коррозии арматуры.



Графики 6 и 7. Результаты испытаний образцов - балок серий 1 и 2



Графики 8 и 9. Результаты испытаний образцов - балок серий 3, 4 и 5



Графики 10 и 11. Результаты испытаний образцов – балок серий 4 и 5

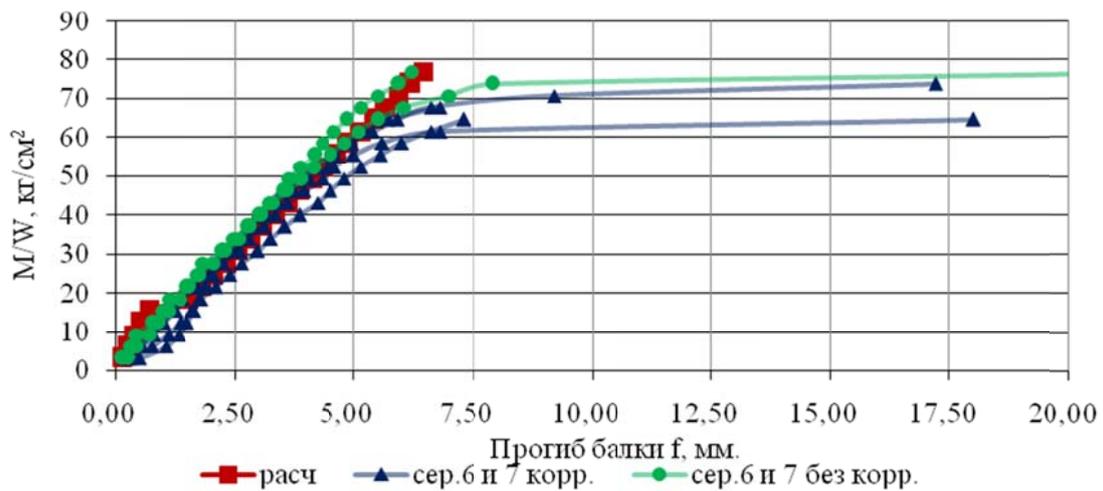


График 12. Результаты испытаний образцов – балок серий 6 и 7

Результаты экспериментальных исследований обобщены в следующих положениях:

Характер трещинообразования для одиночной (Рис. 3) и сдвоенной арматуры (Рис. 5) имеют существенные различия. В последнем случае растягивающие напряжения в бетоне создают магистральную трещину, раскалывающую защитный слой бетона. Она раскрывается на нижней поверхности образца в интервале между арматурными стержнями.

Для балок, находящихся в одинаковых условиях электро-химической коррозии, соотношение a/\varnothing оказывает влияние на ширину раскрытия продольной трещины (см. графики 1 и 2; для отношений a/\varnothing 11/6,5 – средняя ширина продольной трещины 38мкм.; 17/6,5 - 48мкм.; 24/6,5 - 68мкм.; а также 17/10 – 16мкм. и 24/10-20мкм.). Данные нуждаются в статической обработке и доработке с учетом величины коррозии арматуры.

Для образцов представленных серий характерно увеличение относительных деформаций проскальзывания арматуры относительно бетона при увеличении степени коррозионных повреждений (графики 4 и 5). При незначительном уровне коррозии арматуры (в среднем до 4 – 5%) происходит улучшение свойств сцепления бетона с арматурой, что вызвано дополнительными обжимающими напряжениями на границе контакта арматуры с бетоном от продуктов коррозии (график 3).

Методика расчета прогибов по нормам СП 52-101-2003 довольно точно описывает поведение железобетонных изгибаемых конструкций, неподверженных коррозии арматуры (графики 6, 12), однако при значительных коррозионных повреждениях разрушение балок происходит при значительно меньшей нагрузке (в среднем на 15-20%

относительно образцов без коррозии). Определение порогового значения коррозии арматуры, до которого происходит улучшение свойств сцепления арматуры с бетоном – отдельная задача, которой следует уделять внимание в будущих исследованиях.

Отмечено, что существует зависимость между уровнем коррозии арматуры, показателями сцепления арматуры с бетоном, прочностных и деформативных свойств изгибаемых балок, при учете набора следующих факторов, определяющих степень и характер коррозионного поражения железобетонных конструкций:

1. Физико-механические характеристики бетона: начальные значения модуля упругости, прочности на сжатие и растяжение, пористость. Изменение свойств бетонного камня во времени учитывается известными зависимостями с учетом режима твердения и среды эксплуатации.

2. Физико-механические характеристики арматуры – прочностные и деформативные свойства, марка стали, вид переменного сечения.

3. Защитный слой бетона (a) и диаметр арматуры (\emptyset). Показательно их соотношение - a/\emptyset .

4. Отношение внешнего изгибающего момента, образующего растягивающие или сжимающие напряжения в бетоне околоарматурной зоны, к моменту трещиностойкости железобетонного элемента. Следует учитывать характер нагружения (кратковременные или длительные при постоянном плановом местоположении точек нагружения).

5. Уровень концентрации агрессивных компонентов среды на поверхности бетона. Этот фактор принято моделировать определенным значением силы тока в арматуре как при электрохимической коррозии (интеграл от силы тока по времени).

6. Степень агрессивного воздействия среды по отношению к бетону и арматуре. Предлагается устанавливать экспериментальным путем для разных типов и концентраций агрессивных компонентов среды на эталонных образцах и при постоянных вкладах других факторов (пп. от 1 до 5).

ЛИТЕРАТУРА.

1. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного натяжения арматуры..
2. СНиП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
3. В.Н. Мигунов. Влияние переменной ступенчато-повторной нагрузки и агрессивной среды на кинетику жесткости и ширины раскрытия трещин изгибаемых железобетонных конструкций // Изв. Вузов. Строительство, 1998. – № 6. – С. 124-127.
4. Rodriguez J., Ortega L., Garcia A. (1994): Corrosion of reinforcing bars and service life of reinforced concrete structures: Corrosion and bond deterioration. Int. Conference, Concrete across borders, Denmark. – Vol. II. – P. 315-326.
5. Andrade C., Alonso C. and Molina F. (1993): Cover cracking as a function of bar corrosion. Experimental test. Materials and Structures. – Vol. 26, № 162. – P. 453-464.