

## Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред с учетом коррозионного растрескивания

### Current state of the calculation of reinforced structures that are exposed to aggressive medium with consideration of corrosive cracking

к.т.н., доцент Овчинников Илья Игоревич  
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
кафедра «Транспортное строительство»,  
bridgeart@mail.ru

Ph.D., Associate professor Ilya Igorevich Ovchinnikov  
Saratov State Technical University n.a. Y.A. Gagarin,  
Department "Transport construction",  
bridgeart@mail.ru

**Ключевые слова:** расчет, армированные конструкции, моделирование, коррозии, карбонизация.

В статье описан процесс коррозионного растрескивания под напряжением. Приведены два подхода для описания кинетики коррозионного растрескивания. Поэтапно описан процесс коррозионного разрушения армированных элементов конструкций, находящихся под воздействием агрессивных сред.

**Key words:** calculation, reinforced structures, modeling, corrosion, carbonization.

The process of corrosive cracking on tension described in article. Furthermore, two methods for description of kinetics corrosive cracking are given. The process of constructive reinforced elements destruction by corrosion under influence of aggressive medium is described by stages.

Коррозионное растрескивание под напряжением изучалось многими исследователями, ему посвящено множество работ, но проблема борьбы с этим явлением по-прежнему остается актуальной [59, 60, 61, 62, 63, 64]. Коррозионное растрескивание (коррозия под напряжением) является наиболее опасным видом коррозионно-механических повреждений металлов, что обусловлено в основном трудностями его обнаружения в конструктивных элементах. Для коррозионного растрескивания характерны следующие особенности: хрупкий характер трещин направление трещин перпендикулярно растягивающим напряжениям; образование межкристаллитных, транскристаллитных или смешанных трещин с разветвлениями; зависимость времени до растрескивания от уровня извне приложенных растягивающих напряжений.

Процесс развития трещин при коррозии под напряжением, по данным Н.Д. Томашова [65], состоит из трех периодов: первый - инкубационный - постепенное образование на поверхности металла первичных коррозионно-механических трещин; второй - развитие коррозионной трещины; третий - конечное лавинообразное разрушение. Изучение кинетики развития трещины при коррозии под напряжением высокопрочных сталей показало, что на первой стадии происходит постепенное образование коррозионной трещины. Для большинства металлов время первой стадии составляет более 85% от общего времени растрескивания. На основании этих положений было установлено, что зависимость времени до растрескивания  $t$  от величины приложенных растягивающих напряжений  $\sigma$  описывается уравнением [66]:

$$(\sigma - \sigma_{кр})t = K, \quad (13)$$

где  $K$  - константа;  $\sigma_{кр}$  - критическое или пороговое напряжение, ниже которого сплав в данной коррозионной среде не обнаруживает коррозионного растрескивания.

Из уравнения (13) следует, что с увеличением приложенных растягивающих напряжений время до растрескивания уменьшается. Графическое изображение зависимости времени до растрескивания от уровня растягивающих напряжений в координатах  $\sigma - t$  представляет собой гиперболу, смещенную по оси  $\sigma$  на величину  $\sigma_{кр}$ . На величину критического напряжения, которое является количественной характеристикой сопротивления коррозионному растрескиванию, влияют состав коррозионной среды, химический и фазовый состав металла или сплава, характер и величина внутренних напряжений,

неравномерность распределения растягивающих напряжений. Чтобы произошел процесс коррозионного растрескивания, необходимо наличие поверхностных или внутренних растягивающих напряжений. Коррозионное растрескивание никогда не наблюдалось в результате действия поверхностных сжимающих напряжений: наоборот, сжимающие поверхностные напряжения могут использоваться для защиты от коррозионного растрескивания [67].

При увеличении приложенных напряжений уменьшается время до полного разрушения металла. Для коррозионного растрескивания обычно необходимы высокие напряжения, приближающиеся к пределу текучести, однако часто разрушение может наступить и при напряжениях, значительно меньших предела текучести. Для многих систем сплавов наблюдается какой-то «порог» или «предел» напряжений, т.е. напряжения, ниже которых коррозионное растрескивание не происходит за определенный период времени. Имеются доказательства [68], что основное влияние при коррозионном растрескивании напряжения оказывают незадолго до полного разрушения, т.е. наличие напряжений не сказывается до определенного периода времени, после чего наступает внезапное разрушение. Этот вывод подчеркивается рядом наблюдений, в которых указывается на зависимость времени до полного разрушения от времени приложения напряжений. Показано также [68], что время до полного разрушения не зависит от того, приложены ли напряжения в начале испытания или на последующих стадиях его.

Предлагаемые подходы к исследованию природы возникновения и развития процесса коррозионного растрескивания должны объяснить наиболее общие экспериментальные факты и установить количественные зависимости между основными факторами, обуславливающими коррозионное растрескивание.

Кинетика разрушения при водородном охрупчивании может зависеть от типа источника водорода (внешнего или внутреннего) и условий его транспортировки [63]. Внутренним считается водород, попавший в металл в результате предварительного наводороживания, а внешним - поступающий из внешней среды в процессе совместного воздействия нагрузки и среды. Коррозионное растрескивание можно рассматривать как проявление водородной хрупкости, обусловленной внешним водо-родом.

Коррозионное растрескивание нельзя полностью сводить только к водородной хрупкости, но именно водородное охрупчивание, обусловленное внешним водородом, определяет и механизм, и кинетику разрушения металлов в условиях коррозии под напряжением [62]. Коррозионное растрескивание в этом случае связано с выделением водорода при коррозионных реакциях, его адсорбцией на поверхности раздела «среда-металл» и растворением в металле с развитием водородной хрупкости.

Существует определение коррозии под напряжением как увеличение скорости коррозионного процесса под действием статических напряжений. Коррозионное растрескивание, как предельный случай коррозии под напряжением, представляет собой полное разрушение металла в результате одновременного воздействия на него напряжений и коррозии. Но нужно отличать коррозионное растрескивание от процесса коррозии, ускоряющегося при воздействии напряжений.

В металле, подверженном коррозионному растрескиванию, при отсутствии внешних напряжений обычно происходит очень незначительное коррозионное разрушение, а при отсутствии коррозионной среды под воздействием напряжений почти не происходит изменения прочности или пластичности металла. Таким образом, в процессе коррозионного растрескивания, т.е. при одновременном воздействии статических напряжений и коррозионной среды, наблюдается существенно большее ухудшение механических свойств металла, чем это имело бы место в результате отдельного, но аддитивного действия этих факторов. Коррозионное растрескивание является характерным случаем, когда взаимодействуют химическая реакция и механические силы, что приводит к структурному разрушению. Такое разрушение носит хрупкий характер и возникает в обычных пластичных металлах, а также нержавеющей стали в присутствии определенной коррозионной среды.

Коррозионное растрескивание в последние годы стало одним из характерных видов коррозионного разрушения магистральных трубопроводов, поэтому подавляющее большинство исследований было проведено именно специалистами и научными коллективами, исследующими коррозионное растрескивание трубопроводов, которое получило название - стресс-коррозия трубопроводов. В связи со сказанным основные модели коррозионного растрескивания и методы расчета разрабатывались применительно к трубопроводным конструкциям.

Антонов В.Г. и Кантов М.М. [69] считают, что разрушение трубопроводов вследствие коррозии под напряжением можно рассматривать как частный случай замедленного разрушения, когда зарождение и распространение трещин обусловлено совместным действием механических напряжений и коррозионно-

агрессивной среды, причем роль последней сводится к разупрочнению металла вблизи вершины трещины.

Следует отметить, что работ, вскрывающих характер причин и степень их влияния на процесс коррозионного разрушения газопроводов, которые были бы основаны на значительных экспериментальных исследованиях, немного. В [70] обобщены результаты исследования причин возникновения коррозионных повреждений и стресс - коррозии на подземных трубопроводах и газопроводах, причем в основу исследования положен анализ факторов коррозионных повреждений, зафиксированных на газопроводах в Швейцарии и Германии в период с 1986 по 1991 г.

Коррозионное растрескивание под напряжением (или стресс-коррозия) нефте - и газопроводных систем является причиной их аварийных разрушений во многих странах. Многочисленные официальные расследования, лабораторные стендовые, полевые исследования выявили общие признаки и условия эксплуатации, создающие повышенный риск коррозии под напряжением. Однако до настоящего времени полное понимание механизма коррозии под напряжением отсутствует, и проблема преждевременного «стресс - коррозионного» разрушения труб сохраняет свою актуальность [71]. При различных видах коррозионного растрескивания ответственным за возникновение трещин в теле трубы и их распространение обычно является водород, легко проникающий в металл в виде атомов или ионов. Их распространению способствует охрупчивание металла под влиянием диффузии водорода, распределенного по толщине трубы неравномерно. Наибольшие его концентрации должны наблюдаться вблизи поверхностей, контактирующих с источником водорода. В связи с этим исследуются методы коррозионных испытаний, которые выявляют локальную коррозионную стойкость участков, прилегающих к поверхностным слоям труб [70]. Установлено, что в задачах коррозионного растрескивания под напряжением учет напряженного состояния весьма важен из-за быстрого изменения толщины образца вследствие воздействия коррозионно-активной среды.

Применяемые в разных странах противокоррозионная изоляция и системы электрохимической защиты полностью предохранить металл труб от воздействия агрессивных грунтов не в состоянии, и потому металл значительных участков отечественных газопроводов подвержен одновременному воздействию механических напряжений и коррозионно-агрессивных грунтов, т.е. коррозии под напряжением. При длительной эксплуатации газопроводов в таких условиях даже при соблюдении всех технических норм и правил в металле протекают процессы, в результате которых газопровод переходит в так называемое предельное состояние, т.е. дальнейшая эксплуатация его становится невозможной [72]. Отказы, обусловленные подобными самопроизвольно протекающими в металле процессами (например, вследствие коррозии под напряжением), называют деградационными. Механизмы повреждений, приводящие к деградационным отказам вследствие коррозии под напряжением, зависят от длительности и режима нагружения. При эксплуатации газопроводов материал, из которого они изготовлены, подвергается длительному стационарному нагружению давлением транспортируемого продукта. Пренебрегая небольшими колебаниями внутреннего давления, а также внутренними напряжениями, возникающими в металле труб вследствие изменения условий взаимодействия трубы с грунтом на отдельных участках газопровода, механизмом преждевременного разрушения газопроводов вследствие коррозии под напряжением считают коррозионное растрескивание под напряжением металла труб.

Коррозионное растрескивание можно рассматривать как специфическую модификацию более общего явления - статической усталости, т.е. разрушения материала, происходящего под действием длительно приложенного статического напряжения за время, которое на несколько порядков превышает необходимое для прохождения упругой деформации. В ситуации, когда прочность материала зависит от длительности приложения напряжений и режима нагружения, фундаментальной характеристикой способности материала сопротивляться разрушению оказывается долговечность - время от момента приложения напряжения до момента разрушения материала. Исходя из этого, рекомендация определять длительную прочность при статическом нагружении как зависимость в которой в качестве характеристик материала входят только временное сопротивление и предел текучести [73], во многих случаях неправомерна. Тем самым, во-первых, исключается возможность разрушения в результате процессов, протекающих при длительном приложении статических нагрузок, таких как замедленное разрушение, коррозионное растрескивание под напряжением, водородная хрупкость. Ведь все они происходят под действием приложенных напряжений, меньших предела прочности стали. Во-вторых, игнорируется описанная выше специфика механизма и кинетики разрушения в условиях одновременного действия на материал трубопроводов механических напряжений и коррозионно-агрессивных сред.

Разрушение в условиях коррозионного растрескивания следует рассматривать как кинетический процесс, критической характеристикой которого является долговечность металла, а не его временное сопротивление, определяемое в результате кратковременных статических испытаний.

Для моделирования поведения конструкций, подвергающихся коррозионному растрескиванию И.Г. Овчинниковым с учениками была разработана методология, на основе которой предложен и обоснован ряд моделей.

В [74, 75] для описания кинетики коррозионного растрескивания применили скалярный параметр поврежденности, а для описания кинетики его развития использовали модель Москвитина, модифицированную с целью учета влияния воздействия агрессивной среды и жесткости схемы напряженного состояния.

В работах Астафьева В.И. и Ширяевой Л.К. [76,77] для описания процесса коррозионного растрескивания был применен подход Качанова-Работнова [78, 79] широко распространенный для случая высокотемпературной ползучести металлов. В.И. Астафьевым и Л.К. Ширяевой предложена модель, основанная на скалярном варианте поврежденности и учитывающая влияние уровня поврежденности на предельное сопротивление материала в условиях коррозионного растрескивания.

Для моделирования кинетики коррозионного растрескивания можно было бы выбрать различные пути, но применение для этих целей теории накопления повреждений, с нашей точки зрения - наиболее оправданный выбор. Ибо коррозионное растрескивание - это процесс, скрытно развивающийся в материале конструкций и применение для его моделирования подхода, основанного на введении в число механических переменных дополнительных структурных параметров (типа параметра поврежденности) это довольно эффективный путь.

В работах [80,81] для описания кинетики коррозионного растрескивания материалов предложено использовать различные модели накопления повреждений и, в частности, теорию длительной прочности А.Р. Ржаницына [82]. Построена модель для сложного напряженного состояния, проведена ее идентификация. Получены уравнения, описывающие поведение толстостенной и тонкостенной цилиндрических оболочек в условиях коррозионного растрескивания. Численно исследовано напряженно - деформированное и коррозионное состояние толстостенной оболочки.

К сожалению, отечественных исследований, посвященных экспериментальному изучению коррозионного растрескивания арматуры в предварительно напряженных железобетонных конструкциях, немного. Нам известна работа В.В. Извольского и Н.Н. Сергеева [83], в которой рассмотрены наиболее опасные виды хрупкого разрушения металлов и сплавов – коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание – применительно к малоуглеродистым низколегированным сталям, используемым для напрягаемой арматуры. Ими предложена методика прогнозирования долговечности сплавов по результатам ускоренных лабораторных испытаний.

К настоящему времени значительное развитие получило направление исследований, связанное с моделированием коррозионного растрескивания трубопроводов, проблема же моделирования коррозионного растрескивания арматурных сталей, а также прогнозирования поведения предварительно напряженных армированных конструкций с учетом воздействия агрессивных сред, вызывающих коррозионное растрескивание, только начинает разрабатываться.

За рубежом это направление исследований интенсивно развивается. Укажем работу [84], в которой рассматривается метод прогнозирования деформаций и напряжений в предварительно напряженном бетоне мостового пролетного строения с предварительно напряженной или обычной арматурой. Учитывается накопление повреждений, ползучесть бетона, усадка бетона, релаксация напрягаемой арматуры основывается на равновесии в деформированном состоянии. При моделировании авторам пришлось ввести 21 параметр, включая параметры материала и геометрии бетона, свойства предварительно напряженной и обычной арматуры.

В статье [85] рассматриваются модели усталостного предельного состояния для предварительно напряженных арматурных прядей в бетонных пролетных строениях. Использование таких моделей при оценке существующих сооружений, оправдывается тем, что предварительно напряженная сталь в них подвержена процессу коррозионного растрескивания под напряжением.

В этих и других иностранных публикациях анализ проводится не для всего конструктивного элемента, а только для определенного сечения элемента, что объясняется трудностями численной реализации построенных моделей. Правда при рассмотрении сечений авторы нередко вместо

детерминированного анализа используют вероятностный анализ и учитывают имеющий место разброс основных механических характеристик и других параметров.

В наших работах [86-93, 45] предпринята попытка построить ряд моделей, описывающих и коррозионное растрескивание напрягаемой арматуры и поведение предварительно напряженных железобетонных элементов конструкций, арматура которых подвергается коррозионному растрескиванию.

Предварительно напряженные конструкции весьма широко применяются в гражданских и промышленных зданиях [94, 95], в конструкциях атомных электростанций [94], в морских сооружениях и судостроении [94], в мостостроении [96, 97].

Использование предварительного напряжения позволяет достичь больших пролетов конструкций, уменьшения их сечения. Предварительное напряжение повышает трещиностойкость конструкций и ограничивает ширину раскрытия трещин, вследствие чего повышается долговечность конструкций, уменьшается их деформативность. Предварительно напряженные армированные конструкции обладают высокой усталостной прочностью, так как разброс напряжений арматуры даже при частичном преднапряжении небольшой, а их значения далеки от усталостной прочности. Железобетонные конструкции с предварительным напряжением без большого ущерба могут воспринимать завышенные против проектных значений нагрузки. Образующиеся при этом трещины способны закрываться, пока напряжения в арматуре остаются ниже предела упругости.

Условия работы предварительно напряженной армированной конструкции имеют некоторые особенности по сравнению с работой обычной армированной конструкции:

1) предварительно напряженная конструкция находится под действием двух видов нагрузок: усилия предварительного натяжения и эксплуатационной нагрузки. При этом в отличие от эксплуатационной нагрузки, которая во многих случаях действует кратковременно и не всегда в расчетном сочетании, усилие предварительного натяжения загружает конструкцию постоянно в течение всей жизни сооружения;

2) в процессе эксплуатации под постоянным воздействием усилия натяжения арматуры в бетоне в течение нескольких лет протекают неравномерные по высоте необратимые деформации ползучести, которые могут даже вызвать увеличение строительного подъема [97]. В обычных же армированных (железобетонных) конструкциях, наоборот, со временем под нагрузкой накапливаются остаточные прогибы, направленные вниз;

3) в предварительно напряженных конструкциях основную часть потерь предварительного напряжения составляют потери, вызванные усадкой и ползучестью бетона [98,99].

Из-за статической неопределимости либо армированных сечений, либо целиком армированных конструкций влияние этих процессов может привести к значительному перераспределению усилий;

4) в случае эксплуатации армированных конструкций в условиях воздействия агрессивной среды в предварительно напряженной арматуре развивается процесс коррозионного растрескивания, который может привести к преждевременному обрыву напряженной арматуры и последующему разрушению конструкции.

Результаты сравнительных испытаний наиболее распространенных марок арматурных сталей в состоянии поставки (таблица 1) приведены на рисунке 4 [83].

Таблица 1. Характеристики исследованных сталей

Сталь	Диаметр, мм	Класс прочности	Механические свойства		
			$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_{5d}$ , %
Ст.5	14	Ат-IV	980	820	11
Ст.5	14	Ат-VI	1270	1160	6,5
20ХГ2Ц	12	А-IV	950	590	16
20ХГ2Ц	12	А-V	1230	910	13
80С	12	АтIV	1070	720	10
20ГС2	14	Ат-VI	1300	1180	8,5
35ГС	14	Ат-V	1140	890	12
23Х2Г2Т	12	А-V	1080	840	11,5

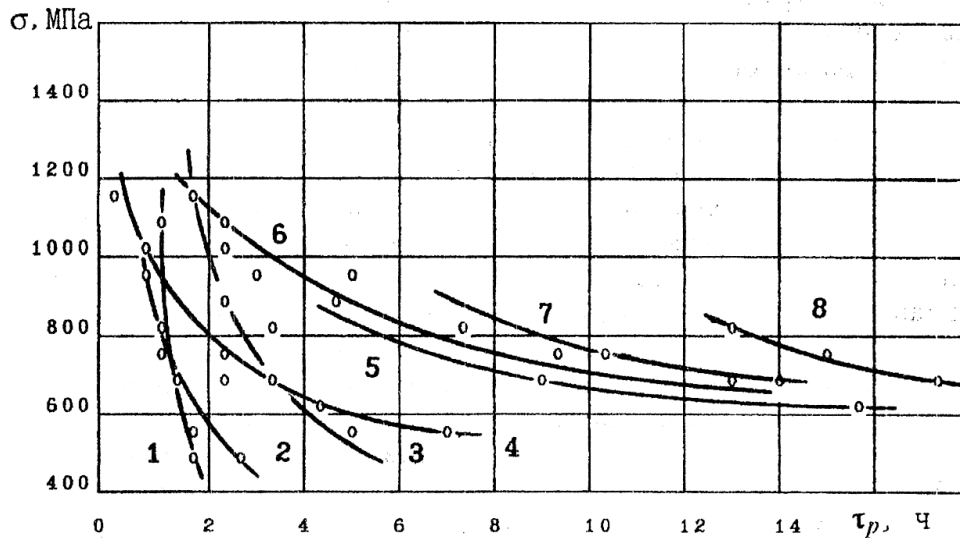


Рисунок 4. Сравнительная стойкость против растрескивания наиболее распространенных марок арматурных сталей в кислой среде:

1 – Ст.5 – АтVI; 2 – 35ГС – Ат-V; 3 – 20ГС2-Ат-VI; 4 – 20ХГ2Ц-Ат-V;  
 5-80С-А-IV; 6 – 23Х2Г2Т-А-V; 7 – 20ХГ2Ц-А-IV; 8 – Ст.5-Ат-IV

Овчинниковым И.И. [87,89,45] в результате предварительного анализа установлено, что для описания кинетики коррозионного растрескивания арматурных элементов конструкций можно применить два подхода. Согласно первому уровень коррозионного растрескивания характеризуется параметром поврежденности Ю.Н. Работнова П, кинетика изменения которого описывается уравнением накопления повреждений в виде:

$$d\Pi / dt = \frac{A \cdot \exp(\alpha \sigma)}{(1 - \Pi)^m}, \quad \Pi(0) = 0, \quad (14)$$

Коэффициенты А, α, m являются функциями температуры Т, концентрации агрессивной среды С, изменяющихся с течением времени. При  $\sigma = \text{const}$  с учетом условия разрушения  $\Pi(t_p) = 1$  из (11) имеем:  $t_p = B \exp(-\alpha \sigma)$ , где  $B = 1/A(m + 1)$ .

Согласно второму подходу коррозионное растрескивание трактуется как постепенное снижение предельного сопротивления материала, вызванное влиянием коррозионной среды и напряженного состояния. Для описания кинетики коррозионного растрескивания вводится параметр мгновенной прочности А.Р. Ржаницына r, изменяющийся во времени и равный напряжению, при котором происходит разрушение арматуры в данный момент времени. Уравнение коррозионного растрескивания для этого параметра имеет вид:

$$\frac{dr}{dt} = -A \cdot e^{m\sigma} (r_0 - r)^\alpha (r_0 - \sigma)^{1-\alpha}; r(t = 0) = r_0, \quad (15)$$

где А, α, m - коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Была проведена идентификация моделей (14) и (15) по экспериментальным данным [88], а затем сопоставление двух предложенных подходов для описания кинетики коррозионного растрескивания арматурных сталей (рисунок 5).

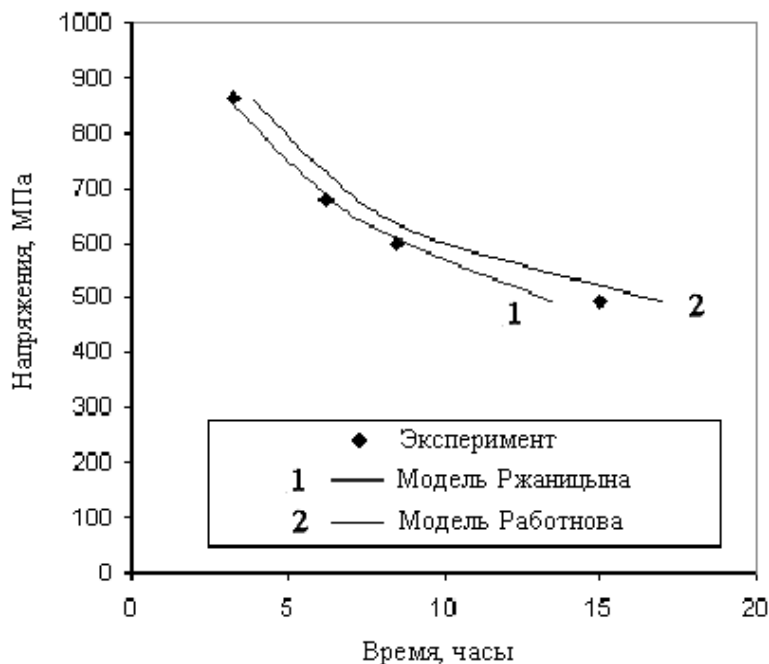


Рисунок 5. Сравнение кривых коррозионного растрескивания по двум моделям с экспериментом при концентрации  $C=39\%$  и температуре  $T=1100C$ .

Сопоставление показывает, что в данном случае (для этих экспериментальных данных) лучшие результаты дает модель Ржаницына. Однако при выборе подходящей модели для моделирования кинетики коррозионного растрескивания следует учитывать, что модель А.Р. Ржаницына более корректно, чем модель Ю.Н. Работнова описывает процесс коррозионного растрескивания при высоких уровнях напряжений, близких к пределу прочности арматурных сталей. Но модель Ю.Н. Работнова позволяет отразить влияние кинетики коррозионного растрескивания на процесс деформирования арматурной стали, путем включения параметра поврежденности в физические соотношения модели деформирования предварительно напряженной арматуры.

В работе [45] рассмотрена задача моделирования поведения одномерных армированных предварительно напряженных элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивной среды. При этом учитывается упругое деформирование ненапрягаемой и напрягаемой арматуры, нелинейное неодинаковое сопротивление деформациям растяжения и сжатия бетона, проникание агрессивной среды и ее влияние на свойства бетона, коррозионный износ ненапрягаемой арматуры, коррозионное растрескивание напрягаемой арматуры.

### Выводы:

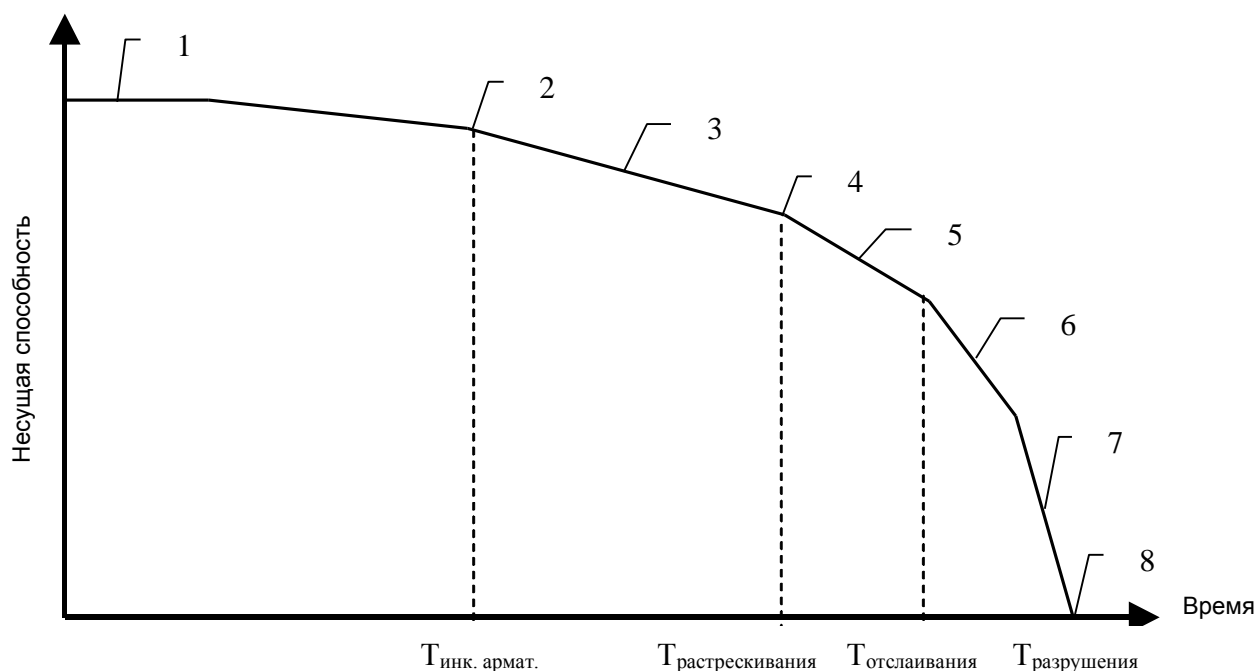
1. Анализ случаев сокращения срока службы и преждевременного выхода армированных конструкций из строя показал, что значительная часть этих случаев вызвана воздействием хлоридсодержащей среды, которая, проникая в объем конструктивных элементов, приводила к деградации бетона, коррозии арматуры, последующему отслаиванию защитного слоя, нарушению сцепления арматуры с бетоном. Расчеты и проектирование таких конструкций ранее выполнялись без учета воздействия агрессивной эксплуатационной среды.

Анализ экспериментальных исследований по взаимодействию армированных элементов конструкций с хлоридсодержащими средами, позволяет заключить, что процесс их коррозионного разрушения можно представить состоящим из следующих этапов:

1) проникание хлоридов в армированный конструктивный элемент и распределение по его объему, появление наведенной неоднородности механических свойств материала, изменяющейся с течением времени и определяемой концентрацией хлоридов в данной точке материала

- 2) наступление условий, при которых начинается коррозия арматуры;
- 3) развитие коррозионного поражения арматуры, приводящего к уменьшению её сечения, образованию продуктов коррозии, объем которых превышает первоначальный;
- 4) наступление условий, при которых начинается процесс коррозионного растрескивания материала вокруг корродирующей арматуры;
- 5) прорастание трещины сквозь материал до поверхности конструктивного элемента;
- 6) отслаивание защитного слоя материала под давлением продуктов коррозии арматуры;
- 7) работа конструктивного элемента с отслоившимся защитным слоем и нарушение сцепления прородированной арматуры с материалом ядра конструктивного элемента;
- 8) разрушение конструктивного элемента вследствие наступления предельного состояния какого-либо вида.

Снижение несущей способности конструктивного элемента вследствие коррозионного разрушения отображено на рисунке 6.



**Рисунок 6. Диаграмма снижения несущей способности армированного конструктивного элемента под воздействием хлоридсодержащей среды**

2. Моделирование проникания хлоридов - один из важных этапов расчетного анализа армированных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия хлоридсодержащих сред. Выше отмечалось, во многих существующих методах прогнозирования срока службы конструкций его стремятся связать с инкубационным периодом, т.е. периодом времени, затрачиваемым на проникание хлоридов через защитный слой бетона и инициализацию коррозии арматуры. Коррозионный износ рабочего сечения армирующих элементов существенно снижает несущую способность армированного элемента конструкции и может даже привести к изменению его модели нагружения. Образующиеся продукты коррозии могут вызвать растрескивание, и даже отслаивание защитного слоя бетона, что может вызвать нарушение сцепления арматуры с окружающим материалом.

На рисунке 7 схематично показаны (эффекты, к которым может привести воздействие хлоридов на армированную конструкцию.



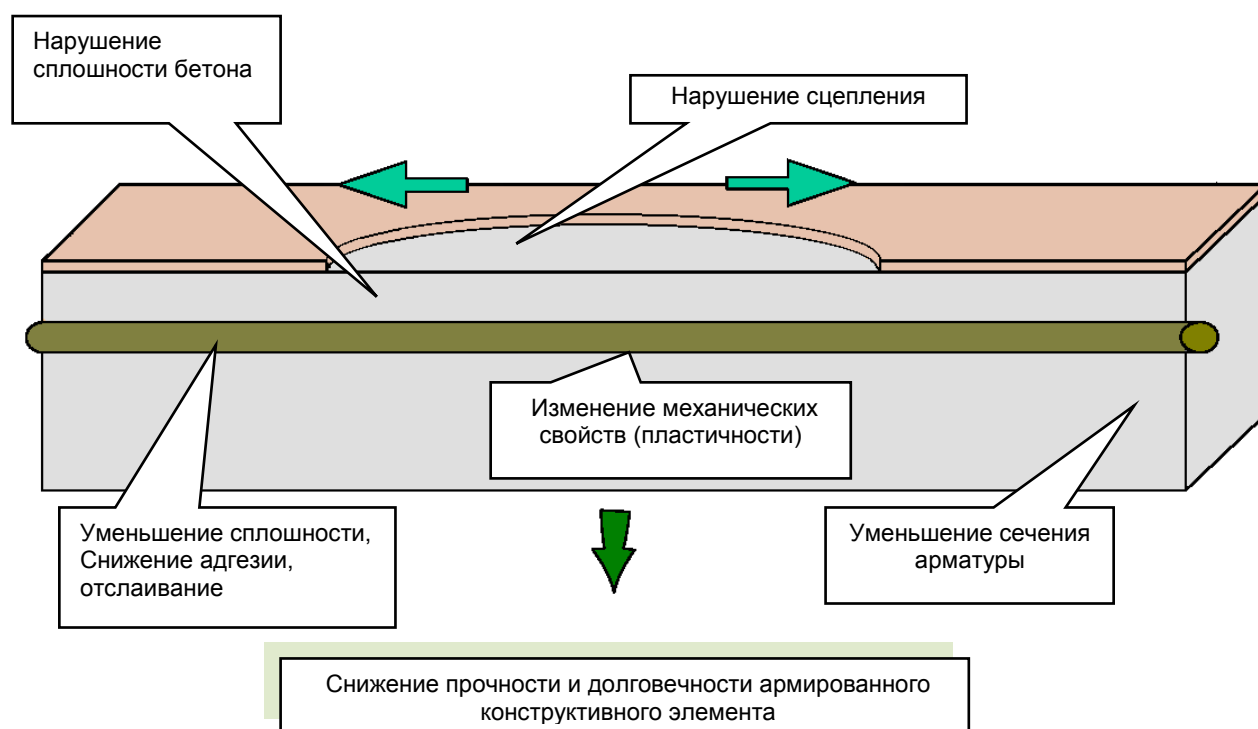


Рисунок 7. Последствия коррозионного поражения железобетонной конструкции

В работах [32, 100] отмечается, что моделирование проникания хлоридов и коррозионного поражения арматуры является важной задачей не только потому, что понижение рабочего сечения армирующих элементов существенно снижает прочность сечения, но и потому, что объем продуктов коррозии больше объема проржавевшей стали. Пористая структура матрицы (бетона) может до некоторой степени поглощать более высокий объем продуктов коррозии, некоторая часть их может быть рассеяна через капилляры в бетоне. Однако в некоторый момент времени, когда общее количество продуктов коррозии превысит количество, необходимое для заполнения пористой области вокруг армирующего элемента, дальнейшее образование продуктов коррозии будет создавать расширяющее давление на окружающий бетон. Накопление продуктов коррозии на арматурных стержнях и понижение в высоте ребер профиля арматуры приводит к понижению прочности связи между арматурой и окружающим бетоном. Расширение бетона вокруг арматуры вызывает растягивающие напряжения в бетоне. Через некоторое время, при продолжающемся процессе коррозионного поражения арматуры, растягивающие напряжения достигнут критической величины и инициируют развитие коррозионных трещин в защитном слое бетона, ориентированных вдоль арматурных стержней. С дальнейшим ростом объема продуктов коррозии ширина раскрытия трещины увеличивается, что в результате часто приводит к отслаиванию защитного слоя бетона. Каждое из описанных явлений в той или иной степени вызывает понижение прочности связи между арматурой и бетоном, результатом чего может стать потеря их совместного действия, что значительно понизит прочность и изменит работу конструктивного элемента. Модель этого процесса рассмотрена в работе [101].

3. Коррозионное растрескивание также является весьма опасным видом разрушения армированных элементов конструкций, так как особую чувствительность к коррозионному растрескиванию проявляют стали повышенной и высокой прочности, используемые в качестве предварительно напряженной арматуры. Этот вид разрушения во многих случаях приносит значительный материальный ущерб и может быть причиной серьезных аварий.

Расчет армированных предварительно напряженных конструкций, работающих в агрессивной эксплуатационной среде, с учетом всех развивающихся во времени процессов (проникание агрессивной среды, изменение свойств составляющих материалов, деформирование и накопление повреждений, усадка, коррозионное поражение ненапряженной арматуры, коррозионное растрескивание напряженной арматуры) представляет собой весьма сложную задачу, так как требует построения корректных моделей, описывающих развитие указанных процессов, наличия достаточного количества экспериментальных данных и отработанных методик идентификации построенных моделей, разработанных методов решения сложных моделей деформирования и разрушения армированных предварительно напряженных конструкций с учетом сопровождающих эффектов.

## Литература

1. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Землянский А.А. Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. - 232 с.
2. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Гарибов Р.Б. Работоспособность сталежелезобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2002. - 156 с.
3. Овчинников И.Г., Кривцов А.В., Скачков Ю.П. Влияние хлоридсодержащих сред на прочность и долговечность пластин на упругом основании - Пенза: ПГАСА, 2002. - 214 с.
4. Овчинников И.Г., Пшеничников В.В., Раткин В.В. Моделирование ползучести железобетонных элементов конструкций транспортных сооружений в агрессивных средах - Саратов: СГТУ, 2001. - 140 с.
5. Овчинников И.Г., Инамов Р.Р., Гарибов Р.Б. Прочность и долговечность железобетонных конструкций в условиях сульфатной агрессии - Саратов: изд-во Сарат. ун-та, 2001. - 163 с.
6. Bamforth P.B. Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments // Proc. 4th Int. Symp. On Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. - Cambridge, 1996. - Pp. 176-188.
7. Vassie P.R. Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges // Proc. Inst. Civ. Eng. 1984. - Vol. 76. - № 8. - Pp. 713-723.
8. Найвельт В.В., Слободчиков А.Н., Феднер Л.А. Почему разрушаются мосты // Автомобильные дороги. 1989. - № 10. - С. 10-11.
9. Brown B.F. Research and Standarts // Standartization News, 1975. - №5. - Pp. 8-16.
10. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях - М.: Изд-во АСВ, 2004. - 216 с.
11. Бондаренко В.М., Боровских А.В. Износ, повреждения и безопасность железобетонных конструкций - М.: ИД Русанова, 2000. - 144 с.
12. Элементы теории реконструкции железобетона / В. М. Бондаренко, А.В. Боровских, С.В. Марков, В.И. Римшин // Нижегород. гос. архит. -строит. ун-т. - Н. Новгород: Изд-во нижегор. ун-та, 2002. - 190 с.
13. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
14. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов - Рига: Зинатне, 1978. - 294 с.
15. Карпенко Г.В. Про фізико-хімічну механіку металів - Киев: Наукова думка, 1973. - 176 с.
16. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. - М., 1970. - Т. 1. - 492 с.
17. Гузев Е.А., Савицкий Н.В., Тютюк А.А. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов (физические основы) - М.: Наука, 1978. - 128 с.
18. Овчинников И.Г., Петров В.В. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах: межвуз. научн. сб. - Саратов: СПИ, 1983. - С. 3-11.
19. Овчинников И.Г. О методологии построения моделей конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами / И. Г. Овчинников // Долговечность материалов и элементов конструкций в агрессивных и высокотемпературных средах: межвуз. научн. сб. - Саратов: СПИ, 1988. - С. 17-21.
20. Подстригач Я.С., Осадчук В.А. К определению напряженного состояния тонких оболочек с учетом деформаций, обусловленных физико-химическими процессами // Физико-химическая механика материалов. 1968. - Т. 4. - № 2. - С. 218-224.
21. Киялбаев Д.А. О влиянии химических превращений на напряженное и деформированное состояние // Сб. трудов Ленингр. ин-та инж. ж-д. трансп. - Л., 1971. - Вып. 326. - С. 169-175.
22. Чудновский А.И. О разрушении макротел // Исследования по упругости и пластичности. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. - Вып. 9. - С. 3-41.

23. Никольский С.С. Термодинамика механико-химических процессов в упругих телах // Журнал физической химии, 1973. - Вып. 47. - № 4. - С. 171-176.
24. Дзюба В.С. Уравнения состояния армированных пластиков с учетом механической поврежденности и физико-химических превращений // Докл. АН УССР, 1974. - Серия А. - № 11. - С. 987-991.
25. Павлина В.С. О взаимодействии процессов деформации и физико-химических явлений в упруго-вязких телах // Мат. методы и физ.-мех. поля. 1978. - Вып. 7. - С. 64-67.
26. Шевчук П.Р. Методика расчета элементов конструкций с покрытиями // Мат. методы и физ. - мех. поля, 1978. - Вып. 7. - С. 52-55.
27. Степанов Р.Д., Шленский О. Ф. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах. - М.: Машиностроение, 1981. - 136 с.
28. Кинетические модели при прогнозировании долговечности полимерных материалов / Е.В. Деюн, Г.Б. Манелис, Е.В. Полянчик и др. // Успехи химии, 1980. - Т. 49. - Вып. 8. - С. 1574-1593.
29. Аввакумов Е.Г. Механические методы активизации химических процессов - Новосибирск: Наука, 1979. - 129 с.
30. Манелис Г.Б., Смирнов Е.В., Полянчик Е.В. Закономерности объемной механической деструкции полимеров // Высокомолекулярные соединения, 1977. - Серия А. - № 19. - С. 86-93.
31. Качанов Л.М. Основы механики разрушения - М.: Наука, 1974. - 308 с.
32. Овчинников И.Г. К расчету долговечности элементов конструкций, подвергающихся механическому и химическому разрушению / И. Г. Овчинников // Задачи прикладной теории упругости. - Саратов: Изд-во СГУ, 1985. - С. 107-117.
33. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. - 288 с.
34. Andrade C., Izquierdo D., Rodriguez J. Advances In Design And Residual Life Calculation With Regard To Rebar Corrosion Of Reinforced Concrete // Бетон и железобетон. Материалы конференции. - М., 2005. - Pp.36-39.
35. Berke N.S., Hicks M.C. Predicting Chloride Profiles in Concrete // Corrosion (USA). 1994. - № 3. - Pp. 234-239.
36. Gaal G.C., Veen C., Djorai M. H. Prediction of deterioration of concrete bridges in the Netherlands // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - Barcelona, 2002. - Pp. 61-63
37. Pommersheim Clifton I. Prediction of Service-Life // Mater. et Constr. 1985. - Vol. 18. - № 103. - Pp. 21-30.
38. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - Barcelona, 2002. - Pp. 65-69.
39. Гузев Е.А., Савицкий Н.В. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. - М., 1988. - С. 16-19.
40. Гузев Е.А., Савицкий Н.В., Тытюк А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов с учетом кинетики сульфатной коррозии бетона // Защита бетона и железобетона от коррозии. Сб. тр.; под ред. С. Н. Алексеева, В.Ф. Степановой. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1990. - С. 59-66.
41. Stratfull R.F., Joukovich W.J., Spellman D.L. Corrosion Testing of Bridge Decks // Transportation Research Record № 539. Transportation Research Board. 1975. - Pp. 50-59.
42. Takegami H., Ishida K., Maekawa K. Generalized model for chloride ion transport and equilibrium in blast furnace slag concrete // Proceedings of JCI, 2002. - №24(1). - Pp. 633-638.
43. Овчинников И.Г., Дядькин Н.С. Расчет элементов конструкций с наведенной неоднородностью при различных схемах воздействия хлоридсодержащих сред. Изд-во СГТУ. Саратов, 2003. 220 с.
44. Овчинников И.И., Дядькин Н.С. Методы решения уравнений, описывающих проникание хлоридсодержащих сред в конструктивные элементы мостовых сооружений // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Межвуз. науч. сб. 2005. Саратов. СГТУ, С. 54 – 61.

45. Овчинников И.И., Наумова Г.А. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами. Волгогр. гос. архит. – строит. ун-т. Волгоград. Изд – во ВолгГАСУ. 2007. 272 с.
46. Pommersheim Clifton I. Prediction of Service-Life // Mater. et Constr. 1985. - Vol. 18. - № 103. - P. 21-30.
47. Гарибов Р.Б. Сопротивление железобетонных элементов конструкций воздействию агрессивных сред. - Изд-во СГУ. Саратов, 2003. - 228 с.
48. Дядькин Н.С., Овчинников И.Г. Расчет концентрационных полей и напряженно-деформированного состояния в сжимаемом армированном конструктивном элементе с частично нарушенной антикоррозионной защитой // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: Межвуз. науч. сб. - Саратов: СГТУ, 2001. - С. 23-29.
49. Овчинников И. Г., Раткин В.В., Дядькин Н.С. Модель деформирования стойки из железобетона, работающей в хлоридсодержащей среде // Изв. вузов. Строительство, 2000. - № 6. - С. 4-10.
50. Овчинников И.Г., Дядькин Н.С. Неоднородность распределения хлорид-содержащей среды, проникающей в армированный конструктивный элемент через частично защищенную поверхность // Изв. вузов. Строительство, 2002. - № 9. - С. 24-31.
51. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) - М.: Издательство АСВ, 2004. - 424 с.
52. Maekawa K., Ishida K. Modeling of structural performances under coupled environmental and weather actions // Materials and Structures, 2002. - № 35. - Pp. 591-602.
53. Maekawa K., Ishida K. Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics // Journal of Advanced concrete Technology, 2003. - V.1. - №2. - Pp. 91-126.
54. Takegami H., Ishida K., Maekawa K. Generalized model for chloride ion transport and equilibrium in blast furnace slag concrete // Proceedings of JCI, 2002. - №24(1). - Pp. 633-638.
55. Маринин, А.Н., Наумова Г.А., Овчинников И.Г. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при воздействии хлоридной коррозии и карбонизации // Вестник ВолгГАСУ. – 2007. – Вып. 6 (23). – С. 85-93.
56. Маринин А.Н., Гарибов Р.Б., Овчинников И.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов конструкций в условиях хлоридной коррозии и карбонизации. Саратов. Научное издание. Издат. Центр «Рица». 2008. 296 с.
57. Овчинников И.И., Мигунов В.Н., Скачков Ю.П. Коррозионно-механическое разрушение железобетонных конструкций при одновременном действии хлоридной коррозии и карбонизации // Региональная архитектура и строительство. 2012. №2. С.72-78.
58. Калиновский М.И., Овчинников И.И. Напряженно деформированное состояние и долговечность прямоугольной железобетонной трубы при действии карбонизации и хлоридсодержащей среды // Строительные материалы. 2010. №10. С.15-17.
59. Ажогин Ф. Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. - М.: Металлургия, 1974. - 256 с.
60. Василенко И. И., Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание сталей - Киев: Наукова думка, 1987. - 264 с.
61. Карпенко Г. В. Прочность стали в коррозионной среде. - М.: Машгиз, 1963. - 187 с.
62. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов / Б.А. Колачев. М.: Металлургия, 1985. - 217 с.
63. Романив О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сталей / О.Н. Романив, Г.М. Никифорчин. - М.: Наука, 1986. - 293 с.
64. Стеклов О.И. Стойкость материалов конструкций к коррозии под напряжением. - М.: Машиностроение, 1990. - 383 с.
65. Герасимов В.В., Герасимова В. В. Коррозионное растрескивание аустенитных нержавеющей сталей. - М.: Металлургия, 1976. - 176 с. Коррозия. Справ. изд. / Под ред. Л.Л. Шрайера. - М.: Металлургия, 1981. - 632 с.
66. Эделяну С.В. Коррозионное растрескивание и хрупкость // Пер. с англ. - М.: Машгиз, 1961. - 119 с.
67. Романов В.В. Коррозионное растрескивание металлов. - М.: Машгиз, 1960. - 163 с.

68. Антонов В.Г., Кантор М.М. О механизме разрушений магистральных газопроводов вследствие коррозионного растрескивания под напряжением трубных // Сб. науч. тр. «Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей. Проблемы. Решения» - Ухта: СеверНИПИГаз, 1996. - С. 33-37.
69. Мазель А.Г. О стресс-коррозии газопроводов // Газовая промышленность, 1993. - № 7. - С. 36-39.
70. Коррозионное растрескивание газопроводных труб в слабокислом грунте / Т.К. Сергеева, Н.И. Волгина, М.В. Илюхина и др. // Газовая промышленность. 1995. № 4. - С. 34-38.
71. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1990. - 448 с.
72. Рекомендации по расчету магистральных трубопроводов на прочность по теории предельных процессов нагружения. - М.: Изд. ВНИИСТ, 1982. - 40 с.
73. Овчинников И.Г., Рассада А.Б. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородсодержащей средой и ее приложения // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. – Саратов: Сарат. Политех. Ин-т., 1989. - С. 12-16.
74. Овчинников И.Г., Рассада А.Б. Применение теории накопления повреждений к описанию замедленного разрушения элементов конструкций при наводороживании // Тез. докл. 8 обл. науч.-техн. конф. "Научно-технический прогресс в строительстве и подготовке специалистов". - Иваново, 1990. - 70 с.
75. Астафьев В.И., Ширяева Л.К. Накопление поврежденности в металлах в условиях коррозионного растрескивания под напряжением. - Изв. АН РАН. МТТ, 1997. - С. 60-68.
76. Астафьев В.И., Ширяева Л.К. Накопление поврежденности и коррозионное растрескивание металлов под напряжением. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 1998. - 124 с.
77. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести. -Изв. АН СССР, 1958. - № 8. - С. 26-31.
78. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. -М.: Изд-во АН СССР, 1959. - С. 5-7.
79. Овчинников И.Г., Мавзовин В.С. Моделирование кинетики коррозионного растрескивания конструкций, подвергающихся наводороживанию // Сб. тр. «Водородная обработка материалов» 2 Междунар. конф. «ВОМ - 98». - Донецк, 1998. - 185 с.
80. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций / Кабанин В.В., Мавзовин В.С., Овчинников И.И., Мавзовина С.Н. - Саратов. Изд-во СГУ. 2006. 124 с.
81. Ржаницын А.Р. Теория длительной прочности при произвольном одноосном и двухосном нагружении // Строительная механика и расчёт сооружений, 1975.- № 4. - С. 25-29.
82. Извольский В.В. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высокой прочности / В.В. Извольский, Н.Н. Сергеев. Тула. Изд-во ТГУ, 2001. - 164 с.
83. Lee Y.-H., Seong K. W., Frangopol D. M. Probabilistic assessment of time dependent behavior of prestressed concrete // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS 2002, - Barcelona, 2002. - Pp. 1211-1223.
84. Marc A. Maes., Dilger H. Walter, Wei Xing. Fatigue Reliability Of Corroding Prestressed Concrete Bridges // Safety, Risk, Reliability - Trends In Engineering. - Malta, 2001. - Pp. 245-252.
85. Овчинников И.И. Моделирование проникания хлоридсодержащей среды в предварительно напряженные армированные конструктивные элементы // Актуальные вопросы строительства. Материалы международной научно-технической конференции. 2004. Саранск. Изд-во МГУ. С. 384 – 388.
86. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания арматуры при оценке долговечности предварительно напряженных армированных конструкций // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Межвуз. науч. сб. 2004. Саратов. СГТУ, С. 50-56.
87. Овчинников, И. И. Идентификация модели коррозионного растрескивания арматурных сталей / И. И. Овчинников // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: материалы Всерос. конф. – Камышин, 2004. - С. 87-90.
88. Овчинников И. И. Применение теории длительной прочности А.Р. Ржаницына к описанию коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры // Вестник ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». 2005, вып. 5(17). С. 42 – 47.

89. Овчинников И.И. Деформирование и разрушение арматуры в условиях коррозионного растрескивания// Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Материалы 4 Международной науч.- техн. конф. Пенза.2005. С. 80 – 87.
90. Овчинников И.И., Дядькин Н.С. Методы решения уравнений, описывающих проникание хлоридсодержащих сред в конструктивные элементы транспортных сооружений // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Материалы 4 Международной науч.- техн. конф. Пенза.2005. С. 87 -96.
91. Овчинников И.И. Коррозионное растрескивание арматуры в преднапряженных конструкциях транспортных сооружений и его особенности // Проблемы транспорта и транспортного строительства. Сб. науч. Трудов. Часть 1. Саратов. СГТУ. 2005. С. 146 -152.
92. Овчинников И.И. Моделирование коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры с использованием теории длительной прочности А.Р. Ржаницына // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. №2. С.19-24.
93. Предварительно напряженный железобетон / К.В. Михайлов, Г.И. Бердичевский, Ю.С. Волков и др. - М.: Стройиздат, 1983. - 208 с.
94. Леонгардт Ф. Предварительно напряженный железобетон // Пер. с нем. В.Н. Гаранина. - М.: Стройиздат, 1983. - 246 с.
95. Захаров Л.В., Колоколов Н.М., Цейтлин А.Л. Сборные неразрезные железобетонные пролетные строения мостов. - М.: Транспорт, 1983. - 232 с.
96. Иосилевский Л.И. Долговечность предварительно напряженных железобетонных балочных пролетных строений мостов. - М.: Транспорт, 1967. - 288 с.
97. Лившиц Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести // Киев: Вища школа, 1975. - 280 с.
98. Голышев А.Б., Полищук В.П., Руденко И.В. Расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом фактора времени - Киев: Будивельник, 1975. - 112 с.
99. Horrignoe G. Nonlinear finite element analysis of deteriorated and repaired concrete structures // Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. - Barcelona, 2002. - Pp. 6-9.
100. Овчинников И.И. Моделирование процесса появления коррозионных трещин в железобетонных элементах конструкций в условиях хлоридной агрессии// Региональная архитектура и строительство. Пенза.2011. №1. С.72-80.
101. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Строительство уникальных зданий и сооружений.2012. №2. С.46-60.

**Данная работа выполнена в рамках работы над грантом  
РФФИ № 12-01-31130**

**"Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов  
конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями"**