

осаждаемые в условиях горения разряда в ПЭЛД, на РТИ характеризуются высокими защитными и триботехническими свойствами. При истирании резин, модифицированными данными покрытиями, при нагрузке 0,4 Н на поверхности трения с помощью растровой электронной микроскопии следы износа обнаружить не удалось. Однако данные покрытия характеризуются высокими значениями коэффициента трения при истирании ($f > 1$). Необходимо отметить, что при истирании немодифицированной резины при данной нагрузке с первых минут истирания наблюдается интенсивное разрушение эластомера в зоне трения.

Значительно расширить нагрузочно-скоростной диапазон применения модифицированных эластомеров позволяет нанесение на предварительно сформированные полимерные покрытия углеродных слоев. Нанесение двухслойных покрытий ПУ – УС позволяет решить сложную задачу: реализацию высоких защитных и триботехнических свойств модифицированных РТИ при высоких контактных нагрузках (при данной схеме испытания до 2 Н, при этом $f < 0,5$). Углеродное покрытие, значительно снижая величину коэффициента трения более чем в 5 раз, при истирании интенсивно растрескивается. Полимерный слой, защищая эластомер от контакта со смазкой, за счет высокой поверхностной энергии препятствует выносу углеродного покрытия из зоны трения. В процессе истирания в зоне трения формируется комбинированное полимер-углеродное покрытие, характеризующееся высокой износостойкостью.

Показано, что наиболее низкие значения коэффициента трения достигаются при нанесении двухслойного покрытия, состоящего из последовательно нанесенных слоев полимерного композита на основе ПУ и УС, нанесенного в среде азота. Такие покрытия защищают РТИ от набухания, имеют малый коэффициент трения и меньший износ. По результатам исследований разработан технологический процесс модифицирования рабочих поверхностей резинотехнических изделий триботехнического назначения двухслойными вакуумными покрытиями на основе углерода и полимерных материалов. Покрытия такого типа рекомендуется применять для РТИ, работающих в узлах трения при недостаточной смазке.

УДК 624.12.45/46

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. В. ПРАСОЛ

Белорусский государственный университет транспорта

До сих пор расчет долговечности железобетонных конструкций базировался на принципах допустимого предела, например минимального защитного слоя, максимального отношения воды/вяжущего, минимального содержания цемента и ограничения раскрытия трещин. Для бетонных конструкций этот принцип включает приемлемо длинный, но не указанный срок службы.

Новый подход предлагает две различные стратегии:

- А. Избежать разрушения конструкции согласно типу и агрессивности окружающей среды.
- В. Выбрать оптимальный состав материалов и детализацию конструкции для сопротивления угрозе разрушения конструкции в течение указанного периода эксплуатации.

Стратегия А не может рассмотреть механизм деградации, но базируется на общих принципах защиты. Стратегию А можно разделить на три варианта:

- А1. Изменение микросреды (например: мембраны, покрытия арматуры);
- А2. Выбор инертных материалов (высокопрочная сталь, покрытия арматуры);
- А3. Предотвращение реакций (например: катодная защита, предотвращение воздействия отрицательных температур).

Стратегия В минимизирует деградацию в соответствии с оптимальным проектированием и выбором материалов и базируется на реалистическом и достаточно точном определении внешних воздействий в зависимости от рассматриваемого типа деградации, параметров материалов для бетона и арматуры, моделях вычислений для механизма деградации.

Такой подход позволяет уточнить срок службы, полученный фактическими результатами испытаний и измерениями в течение срока службы конструкции. В этом случае осмотры и испытания бетонных конструкций мостов будут играть важную роль в расчете срока службы.

Методология базируется на достаточно реалистичных материальных моделях, которые позволяют предсказать будущее поведение железобетонной конструкции. Расчеты предпочтительно делать

вероятностным методом. Вероятностные методы требуют, чтобы работа конструкций была определена как предельное состояние. Предельные состояния могут быть связаны с работой конструкции или долговечностью, но могут также учитывать, например, и эстетические требования. На работу железобетонной конструкции влияют множество факторов, например материал (т. е. бетон непосредственно), изготовление (т. е. функция бетонирования и условий уплотнения и твердения бетона) и окружающая среда. Материал и изготовление, главным образом, влияют на работу бетонной конструкции, в то время как окружающая среда также влияет на долговечность конструкции.

Срок службы железобетонной конструкции может моделироваться как ряд предельных состояний. Четыре главных предельных состояний могут определять срок службы железобетонной конструкции:

- **Инициирование коррозии.** Инициирование происходит из-за насыщения бетона углекислотой или хлоридами. Это предельное состояние определяет момент, когда фронт насыщения углекислотой достигает арматуры или превышает критическое значение концентрации хлоридов возле арматуры.

- **Трещины.** Трещины появляются, когда процесс коррозии продолжается некоторое время, продукты коррозии увеличиваются в объеме. Это предельное состояние определяет момент, когда из-за коррозии появляется первая трещина.

- **Раскалывание.** Раскалывание происходит, когда размер трещин достигает некоторого уровня и бетон начинает откалываться. Это предельное состояние определяет момент, когда из-за коррозии впервые происходит раскалывание.

- **Разрушение.** Разрушение происходит, когда арматурные стержни начинают терять прочность, из-за уменьшения диаметра, вызванного коррозией, и снижается их несущая способность. Это предельное состояние определяет момент, когда арматурные стержни начинают терять прочность.

В общем случае процесс расчета основывается на сравнении прочности конструкции (переменная R) с воздействием или нагрузкой (часто называемой переменной S). Отказ (разрушение) происходит, когда сопротивление конструкции ниже, чем величина нагрузки. Так как и нагрузка на конструкцию, и сопротивление – величины переменные, S и R невозможно сравнить детерминированным способом. Решение должно базироваться на максимально приемлемой вероятности отказа. Вероятность отказа, обозначенная p_f , описывает случай, когда переменное сопротивление R ниже, чем переменная нагрузка S . Эта вероятность должна быть ниже, чем целевая вероятность отказа p_{target} :

$$p\{\text{отказ}\} = p_f = p\{R - S < 0\} < p_{target}.$$

Функция предельного состояния $Z = R - S$ вводит переменные R и S в уравнения, включая их среднее и стандартное отклонения. Z – надежность конструкции. Принимая, что переменные S и R нормально распределенные, надежность Z , разность между переменными R и S также является нормально распределенной переменной. Введен так называемый индекс надежности β , который рассчитан с использованием среднего и стандартного отклонения Z : μ_z и σ_z соответственно. Индекс надежности – разность между средними значениями R и S с учетом стандартного отклонения переменной Z или средняя величина Z с учетом стандартного отклонения Z . Уравнение проектирования может быть выражено следующим образом: $\beta > \beta_0$, где β_0 – требуемый уровень безопасности (индекс надежности).

Срок службы конструкции можно разделить на три жизненных цикла. Жизненный цикл определяется как период времени в течение полного срока службы, по окончании которого требуются мероприятия по содержанию или ремонту железобетонных конструкций, подверженных коррозии арматуры под воздействием агрессивных веществ. Жизненные циклы характеризуются критериями прочности и долговечности.

Первый жизненный цикл – период времени от завершения возведения конструкции до инициирования коррозии в конструкции ($0, T_i$], второй – период времени от инициирования коррозии до непригодности к эксплуатации конструкции (T_i, T_s], третий – период времени от потери пригодности к эксплуатации до окончательного разрушения конструкции (T_s, T_f].

Для оценки каждого жизненного цикла устанавливается обоснованный критерий качества: $P[R(t) \geq R_a] \geq P_a$, где P – вероятность события; $R(t)$ – сопротивление конструкции, изменяемое со временем t ; R_a – принятое минимальное сопротивление; P_a – принятая минимальная вероятность конструкционной надежности.