

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНОСТИ СРЕДЫ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ВОДОПЕННЫХ КОММУНИКАЦИЙ ПОЖАРНОГО НАСОСА

В.Ф. Гольчевский,

начальник кафедры автотехнической экспертизы и автоподготовки ФГОУ ВПО ВСИ МВД РФ, кандидат технических наук, доцент, член-корреспондент Национальной академии наук пожарной безопасности

Н. Ю. Гольчевская,

профессор кафедры автотехнической экспертизы и автоподготовки ФГОУ ВПО ВСИ МВД РФ, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Международной академии наук педагогического образования

В статье рассмотрены современные методологические подходы к анализу влияния агрессивности среды на надежность водопенных коммуникаций пожарного насоса. В результате теоретических исследований показано, что экономические потери, связанные с коррозией металлов, определяются не столько стоимостью прокорродировавшего металла, сколько стоимостью ремонтных работ, убытками за счет временного прекращения функционирования водопенных коммуникаций пожарных насосов, затратами на предотвращение аварий, абсолютно недопустимых с точки зрения человеческой и экологической безопасности.

The modern methodological approaches of the analysis of the impact of aggressiveness of environment on the reliability of aqua-foam supply lines of fire pumps are touched upon in the article. The theoretical investigations demonstrated that the economical losses connected with metal corrosion depend more on the cost of repair, damages caused by temporary termination of the operation, of the aqua-foam supply lines of fire pumps, expenditures on failure prevention, absolutely unacceptable in terms of human and ecological safety than on the cost of corroded metal¹.

Для конструкции пожарных насосов с консольным креплением вала рабочего колеса, характерных для традиционных отечественных насосных установок, износ щелевых уплотнений оказывает значительное влияние на их технические характеристики.

При износе щелевых уплотнителей перетекание жидкости из напорного коллектора во всасывающую полость пожарного насоса происходит как через передние, так и через задние щелевые уплотнения. Всасываемая жидкость поступает во всасывающую полость и подается насосом в коллектор. При наличии щелевых уплотнений между корпусом, крышкой и рабочим колесом создаются циркулирующие потоки. Жидкость, перетекающая через передние уплотнения на входе, поступает во всасывающую полость перпендикулярно потоку всасываемой жидкости. Таким образом, происходит своеобразное сужение “живого” сечения потока всасываемой воды. Жидкость, перетекающая через задние щелевые

¹ Golchevsky V.F., Golchevskaya N.Ju. The Impact of Aggressiveness of Environment on the Reliability of Aqua-Foam Supply Lines of Fire Pumps.

уплотнения из разгрузочной полости, встречается с всасываемой насосом водой практически в противотоке.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что утечки через щелевые уплотнения оказывают влияние на всасывающую способность. При этом в значительной степени снижается развиваемый напор и подача насоса.

Утечки через передние щелевые уплотнения, сужая «живое» сечение потока на входе в рабочее колесо, вызывают возрастание в этом месте дополнительного гидравлического сопротивления. Линейная скорость потока, имеющего меньшее полезное сечение, при одинаковом расходе воды возрастает на входе в насос.

Износ щелевых уплотнений в процессе эксплуатации происходит по следующим причинам: износ колец щелевого уплотнения за счет сил трения при неравномерной затяжке гаек крепления крышки насоса; попадание с перекачиваемой водой механических примесей в зазор между щелевыми уплотнениями; эрозия и коррозия металла при подаче воды с повышенным содержанием соли (морская вода). Поток, циркулирующий из напорного коллектора через щелевые уплотнения в зону всасывания насосной установки, оказывает отрицательное действие не только на ее производительность, напор, но и очень влияет на всасывающую способность. Так в процессе эксплуатации с увеличением зазора в передних щелевых уплотнениях от 0,3 мм, предусмотренного для новых насосов ПН-40У до 1,0 мм при номинальной частоте вращения рабочего колеса напор уменьшается на 14 – 15 % от номинального значения, а подача снижается на 13 л/с.

Поскольку износ щелевого уплотнения за счет сил трения и попадания механических примесей вызван чисто техническими причинами, а коррозия рабочих элементов пожарного насоса от воздействия морской воды является эксплуатационной причиной, следовательно, на данную причину необходимо обратить особое внимание. Актуальность проблемы обусловлена и тем, что порядка 20 % пожаров в Приморском и Магаданском краях, Сахалинской и Камчатской областях тушится с использованием морской воды.

Подробный анализ особенностей влияния агрессивной среды на характеристики металлов приведен во многих монографиях и обзорных статьях¹.

В ряде работ изложены основные направления развития различных подходов для описания процесса разрушения металлов в условиях действия агрессивной среды. В монографии О.Н. Романова и Г.Н. Никифорчина рассмотрены методы исследования коррозионного разрушения металлов при различных видах нагрузок². И.Г. Овчинников и Ю.М. Почтман составили аналитический обзор основных методов учета воздействия коррозионных сред, методов расчета элементов конструкций, находящихся в коррозионной среде, и особенностей оптимального проектирования таких конструкций³.

Анализ механического поведения металлов в рассматриваемых условиях показывает, что влияние окружающей среды на механические свойства металлов характеризуется в основном диффузионным и

коррозионным процессами. При этом особый интерес представляет анализ возможных подходов, характеризующих зависимость диффузионных и коррозионных параметров от напряженно-деформированного состояния и времени. В данной работе рассмотрены различные модели, в которых для определения этой зависимости используют введение поверхностного разрушенного слоя, учет концентрации элементов агрессивной среды в металле, введение вероятностных характеристик и т.д.

Среди отечественных ученых, занимавшихся исследованием коррозионных процессов, одним из первых следует считать Г.В. Акимова. В своей работе он на основе решения уравнения для химической коррозии получил зависимость толщины поверхностного слоя δ , разрушенного вследствие коррозии, от времени t ⁴. Эта зависимость $\delta(t)$ при малых t имеет линейный характер, а при больших t – параболический характер с убывающей производной. Г.В. Акимов рассматривал зависимость скорости коррозии⁵. Им описаны опыты по измерению коррозии алюминиевых образцов в различных средах и при различных значениях σ . Эти опыты показали, что потеря веса образцов (при одной и той же площади корродируемой поверхности) за один и тот же промежуток времени линейно возрастает с увеличением σ вплоть до предела пропорциональности:

$$\dot{\delta}(\sigma) = v_0 + k\sigma, \quad (1)$$

где v_0 – скорость коррозии ненагруженного материала. Ниже под δ понимается либо толщина полностью разрушенного поверхностного слоя, либо толщина поверхностного слоя, свойства которого вследствие коррозии отличаются от свойств основного металла. Линейный вид зависимости скорости утолщения пленки $\delta(\sigma)$ от напряжения (1) впоследствии использовался во многих работах⁶.

При решении ряда задач с учетом коррозионного износа (изгиб пластин, устойчивость оболочек и т.д.) учитывается скорость неоднородной коррозии δ , принимаемая в виде произведения линейной функции от интенсивности напряжений σ_u и нелинейной функции от времени t ⁷.

В монографии Э.М. Гутмана принята не линейная, а экспоненциальная зависимость скорости коррозионного процесса от напряжения:

$$\dot{\delta}(\sigma) v_0 \exp \frac{V\sigma}{RT}, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура, R – газовая постоянная, V – мольный объем материала⁸. Зависимость (2) имеет место при напряжении σ , меньшем предела текучести σ_u , в случае сложного напряженного состояния вместо σ вводится в рассмотрение среднее напряжение.

И.Г. Овчинников и ХА. Сабитов использовали экспоненциальную зависимость $\delta(\sigma)$ в другой форме⁹:

$$\dot{\delta} = \alpha - \beta \exp(-\gamma\sigma). \quad (3)$$

В монографии Л.Я. Цикермана различаются атмосферная и электрохимическая причины коррозии¹⁰. Атмосферная коррозия характеризуется монотонно убывающей зависимостью $\delta(t)$, электрохимическая коррозия – двумя стадиями: на первой стадии $\delta(t)$ возрастает, на второй – убывает. Для описания электрохимической коррозии в ряде случаев используется дифференциальное уравнение второго порядка:

$$A\ddot{\delta} + B\dot{\delta} + \delta = kc, \quad (4)$$

где c – характеристика агрессивности среды. При определенных условиях решение уравнения (4) изображается кривой $\delta(t)$ с точкой перегиба и горизонтальной асимптотой¹¹.

Систематические исследования влияния агрессивной среды на механические характеристики металлов и на прочность элементов конструкций проводятся в Саратовском университете и Саратовском политехническом институте (СГТУ), результаты этих исследований представлены в монографии¹², тематических сборниках статей и отдельных журнальных и депонированных статьях¹³. Для описания электрохимического коррозионного процесса с двумя стадиями предлагается кинетическое уравнение:

$$\dot{\delta} = k\delta(\delta_{\infty} - \delta) \quad (5)$$

с ненулевым начальным условием. Решение уравнения (5) характеризуется точкой перегиба и горизонтальной асимптотой. И.Г. Овчинниковым подробно описана модель коррозионного разрушения, которое определяется не только напряженным, но и деформированным состоянием материала¹⁴.

В этой модели предполагается, что скорость коррозионного процесса связана с удельной энергией деформирования разрушаемого слоя.

На основе анализа взаимодействия стали с водородосодержащими средами развивается подход введения фронта обезуглероживания, на котором происходит резкое изменение всех механических характеристик. С помощью уравнения (5), в котором под δ понимается толщина обезуглероженного слоя, обработаны результаты испытаний стали 30ХМА при различных значениях парциального давления водорода и температуры.

А.Р. Ржаницын вместо параметра поврежденности W ввел в рассмотрение параметр так называемой объективной прочности $\tilde{\sigma}(t)$, определяемой как напряжение, необходимое для разрушения материала в данный момент времени¹⁵.

В этой же работе он рассмотрел длительную прочность оболочки под внутренним давлением в присутствии коррозионно-активной среды. Получено выражение, характеризующее уменьшение предела прочности σ_b

(t) материала трубы во времени. Время разрушения t^* определяется из условия равенства $\sigma_b(t^*) = \sigma_u$.

В одной из последних работ И.Г. Овчинников рассматривает сложное напряженное состояние цилиндрической оболочки (одновременное действие растяжения, кручения и внутреннего давления), внутри которой находится жидкометаллическая среда¹⁶. Исследуется длительная прочность такой оболочки с использованием подхода А.Р. Ржаницына. Вводятся понятия движущихся диффузионного и коррозионного фронтов с координатами $\delta_d(t)$ и $\delta_k(t)$; для $\delta_d(t)$ принимается совершенно не связанное с уравнением диффузии кинетическое уравнение

$$\dot{\delta}_d = A\delta_d^m(B - \delta_d)^n, \delta_d(t=0) = 0. \quad (6)$$

Отмечается, что если скорость коррозионного износа $\dot{\delta}_k$ больше скорости диффузии жидкого металла в металл трубы $\dot{\delta}_d$, то механические свойства оболочки не меняются, а происходит естественное уменьшение ее толщины.

В противоположном случае ($\dot{\delta}_k < \dot{\delta}_d$) оболочку можно рассматривать как трехслойную: один слой обладает свойствами исходного материала, второй – измененными механическими свойствами, а третий слой имеет нулевую несущую способность. Для первых двух слоев предложены уравнения установившейся ползучести, различающиеся материальными константами.

При описании коррозионно-механического разрушения И.Г. Овчинников вводит поврежденность материала, зависящую от различных параметров. При оценке равномерного коррозионного износа в качестве параметра w рассматривается отношение $\delta(t)/\delta^*$, δ^* – критическое значение толщины окисной пленки. Если предположить, что скорость формирования пленки и ее защитные свойства линейно зависят от количества растворенного металла (фактически от $\delta(t)$), то функция $\delta(t)$ при постоянных внешних условиях примет вид экспоненциальной функции от времени:

$$\delta(t) = a[1 - \exp(-bt)]. \quad (7)$$

При моделировании разрушения окисляющихся металлов он учитывает объемную деформацию окисной пленки и различие механических характеристик окисной пленки и основного металла.

Выше в качестве основного параметра, характеризующего влияние окружающей среды на свойства металлов, принималась зависящая от напряжения и времени толщина поверхностного коррозионного слоя $\delta(\sigma, t)$. В качестве такого параметра вместо δ можно ввести концентрацию c в материале химических элементов агрессивной среды, ослабляющих сопротивление материала действию внешних нагрузок. Кроме концентрации

c , в рассмотрение также вводится второй параметр – рассеянная поврежденность материала w . В задачах об учете влияния агрессивной среды оба параметра (c и w) зависят не только от характеристик напряженного состояния и времени, но и от пространственных координат. В качестве кинетических уравнений для определения w и c обычно принимаются, соответственно, степенное уравнение с переменными коэффициентами и уравнение диффузии. В ряде исследований авторы применяют феноменологические параметры, которым не придается какой-либо конкретный физический смысл. Модели, использующие кинетическую концепцию, широко используются учеными Саратова (СГУ и СПИ-СГТУ), Львова (Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко) и другими отечественными и зарубежными учеными. К сожалению, в ряде работ моделирование диффузионных процессов ограничивается составлением зависимостей в общей форме, без конкретизации вида используемых функций, указания методов их определения и сравнения с известными экспериментальными данными.

В рассмотренной работе В.В. Петрова, И.Г. Овчинникова предложены два способа описания процесса разрушения с учетом влияния агрессивной среды. При этом вводятся параметр $W(t)$, характеризующий свойства агрессивной среды по отношению к рассматриваемому материалу, и кинетическое уравнение для описания его изменения во времени:

$$\dot{W} = f(\sigma, w, t, w). \quad (8)$$

Физический смысл параметра W не обсуждается. Кинетическое уравнение, характеризующее изменение во времени параметра поврежденности $w(t)$, формулируется одним из следующих двух способов:

$$\dot{w} = \Phi_1(\sigma, w, t, T, S) \quad (9)$$

или

$$\dot{w} = \Phi_2(\sigma, w, t, T) + \int_0^t F(t-\tau)W(\tau)d\tau. \quad (10)$$

Уравнение (9) учитывает только характер агрессивной среды, а уравнение (10), кроме того, – время пребывания материала в этой среде. В случае сложного напряженного состояния авторы обобщают уравнения (8–10), вводя тензорный параметр поврежденности. При этом в уравнение состояния вводится параметр c , характеризующий уровень концентрации агрессивной среды. Уравнение нелинейно-упругого тела с учетом влияния агрессивной среды имеет вид:

$$\sigma(\varepsilon, c) = \Phi(\varepsilon)\varphi(c), \quad \varphi(c) = 1. \quad (11)$$

В качестве $\varphi(c)$ предлагается использовать различные соотношения:
 $\varphi(c) = 1 - (1 - \alpha)c^\beta$, $\varphi(c) = \exp(-\alpha c)$, $\varphi(c) = 1/(1 + \alpha c)$. (12)

В статьях А.М. Локощенко и Д.М. Кулагина исследование влияния агрессивной среды на длительную прочность проводится с использованием обобщения данного подхода¹⁷. При этом получено решение задачи при взаимодействии диффузионного и коррозионного фронтов (т.е. при заранее неизвестных переменных внешних границах), показана зависимость координаты диффузионного фронта не только от расстояния до внешней границы, но и от кривизны границы, проведена оценка погрешностей полученных решений.

На основании рассмотренных аналитических методологий можно сделать вывод о том, что в водопенных коммуникациях пожарного насоса наблюдаются следующие разновидности коррозионно-механического изнашивания:

- при воздействии жидкой агрессивной среды (питтинг-коррозия); изнашивание, усиленное окислением атмосферы;
- электрохимическая коррозия;
- изнашивание при наличии вибрации – фреттинг-коррозия.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ См.: Никитин В.И. Физико-хими-ческие явления при воздействии жидких металлов на твердые. М.: Атомиздат, 1987, 432 с.

² Романов О.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных материалов / О.Н. Романов, Г.Н. Никифорчин. М.: Металлургия, 1986. 294 с.

³ Овчинников И.Г. Расчет и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу / И.Г. Овчинников, Ю.М. Почтман // Физ.-хим. мех. материалов. 1991. № 2. С. 7-19.

⁴ Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.-Л.: АН СССР, 1975. 415 с.

⁵ Акимов Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов. М., 1986. 464 с.

⁶ См.: Долинский В.М. Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии // Хим. и нефт. машиностроение. 2000. № 2. С. 9-10; Он же. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу // Динамика и прочность машин. Харьков, Харьков. ун-т, Вища школа, 2005. Вып. 21. С. 16-19; Он же. Напряженное состояние цилиндрических сосудов с плоскими днищами, подверженных коррозионному износу // Там же. 2003. Вып. 22. С. 82-84.

⁷ См.: Долинский В.М. Расчет теплообменных аппаратов жесткой конструкции, подверженных действию агрессивной среды / В.М. Долинский, В.А. Сиротенко // Химическое машиностроение. Киев: Техника, 2004. Вып. 11. С. 21-25.

⁸ Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металлургия, 2001. 271 с.

⁹ Овчинников И.Г. К определению напряженно-деформированного состояния и долговечности цилиндрических оболочек с учетом коррозионного износа / И.Г. Овчинников, Х.А. Сабитов // Строит. мех. и расчет сооруж. 1996. № 1. С. 13-17.

¹⁰ Цикерман Л.Я. Диагностика коррозии трубопроводов с применением ЭВМ. М.: Недра, 1997.

¹¹ См.: Петров В.В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1997. 285 с.

¹² Там же.

¹³ См.: Петров В.В. и др. Деформирование элементов конструкций из нелинейного разномодульного неоднородного материала / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, В.К. Иноземцев. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 159 с.; Механика деформируемых сред. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. Вып. 6. 200 с.; Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах. Саратов: Изд-во Саратов. политех. ин-та, 1983. 100 с.

¹⁴ См.: Овчинников И.Г. Применение логистического уравнения для описания процесса коррозионного разрушения / И.Г. Овчинников, Л.Л. Елисеев // Физ.-хим. мех. материалов. 2001. № 6. С. 30-35.

¹⁵ См.: Ржаницын А.Р. Теория длительной прочности при произвольном одноосном и двухосном нагружении // Строит. мех. и расчет сооруж. 1995. № 4. С. 25-29.

¹⁶ См.: Овчинников И.Г. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами / И.Г. Овчинников, В.В. Петров // Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах. Саратов: Изд-во Саратов. политех. ин-та, 2005. С. 3-11.

¹⁷ Lokochtchenko A. M., Kulagin D. A. Mutual influence of diffusion and Coupled Processes, Bialowieza, 23-25.09.1998. Bialystok, Publ. Bialyastok Techn. Univ., 2002. P. 323-332; Kulagin D. A., Lokoshchenko A. M. Probabilistic approach for modeling of aggressive environment influence on creep rupture. In. Proc. 14th Europ. Conf. Fracture, Cracow, 9-13.09.2005. Cracow, 2005. УП/Ш. P. 269-276; Локощенко А.М., Кулагин Д.А. Применение теории размерностей при анализе масштабного эффекта длительной прочности // Прикладные задачи математики и механики: труды XI междунар. науч.-практ. конф. Севастополь, 16-21.09.2002. Севастополь, 2002. С. 273-278.