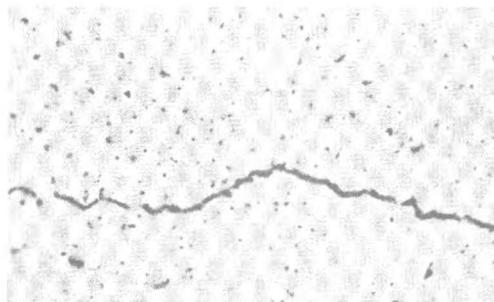


Завистовский В.Э., канд. техн. наук, доцент
(ПГУ, г. Новополоцк)

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Надежность определяется методами расчета, оценкой или прогнозированием. Учитывая большое разнообразие видов и модификаций элементов конструкций и существенное различие режимов их работы в разных системах, результаты расчета надежности механических систем носят лишь ориентировочный характер, и ими, как правило, пользуются на стадии проектирования. Уточнение значений показателей надежности системы проводится на этапах освоения конструкции и технологии изготовления, а также на этапах производства и эксплуатации. Анализ видов повреждений металлических конструкций показывает, что одной из основных причин выхода их из строя является наличие дефектов металла, сварки, усталостных трещин и т.п. (рисунок).



Межкристаллитная трещина в металле сварного шва (увеличение $\times 200$)

Пусть a_t – размер дефекта в момент времени t ; a_c – критический размер дефекта. Полагая, что a_t и a_c – фиксированные случайные величины, вероятность безотказной работы элемента с повреждениями можно представить в виде вероятности [1]:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{a_t \leq a_c\} = \\ = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_t(a_t, \theta_t) da_t f_c(a_c, \theta_c) da_c = \int_0^{\infty} [1 - F_t(a_c, \theta_t)] f_c(a_c, \theta_c) da_c, \quad (1)$$

где $f_c(a, \theta_c)$, $f_t(a, \theta_t)$ – плотности распределений критических и текущих размеров дефектов; θ_c, θ_t – векторы параметров распределений, зависящие от времени t . При известных значениях $F(t)$ и ее производной по t функцию риска можно вычислить из выражения

$$h(t) = F'(t)/(1 - F(t)). \quad (2)$$

Одной из причин отказа несущих металлоконструкций является эффект усталости. Скорость распространения макроскопической усталостной трещины определяется различными микроскопическими механизмами, структурами материала в вершине трещины и имеет вероятностную природу. Уровень нагружения в вершине трещины длиной a при напряжениях σ связывают с величиной коэффициента интенсивности напряжений (КИН):

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} f_{1k} \left(\frac{a}{W} \right), \quad (3)$$

где $f_{1k} \left(\frac{a}{W} \right)$ – поправочная функция на геометрию образца [2].

Наличие дефектов обусловлено как технологией изготовления изделия, так и его эксплуатацией. Непровары, поры, несплавления и другие дефекты рассматривают как трещины, их делят на одиночные и групповые дефекты.

Статистический анализ показал, что в качестве аппроксимирующей функции плотности распределения размера начального дефекта можно использовать двухпараметрический закон Вейбулла. Наряду с этим привлекают и ряд других зависимостей [3].

Размер критических дефектов находят через характеристики статической трещиностойкости. Распространение усталостной трещины происходит до тех пор, пока величина КИН не превысит своего предельного значения, которое часто заменяют на предельное значение КИН при статическом нагружении K_{1c} , определяемое по ГОСТ 25.506-85, т.е. используют условие статической трещиностойкости.

Для одиночной трещины в момент времени t [1] вероятность того, что длина трещины будет меньше заданного значения, имеет вид

$$P\{x_t \leq b\} = \int_0^b f_0(x, \theta_0) P\{x_t \leq b | x = x_0\} dx, \quad (4)$$

где $P\{x_t \leq b | x = x_0\}$ – вероятность того, что трещина с начальной длиной $x = x_0$ за время t увеличит свою длину до значения x_t , не превышающего b .

Известно, что повреждаемость материалов на инкубационной стадии макроскопического разрушения характеризуется развитием системы мик-

родефектов, проявляющихся в непрерывном их зарождении и увеличении размеров [4]. При этом предельное состояние – образование макротрешины – может быть достигнуто либо за счет объединения части дефектов, когда размеры наибольших трещин станут соизмеримы со средним расстоянием между трещинами в системе, либо путем развития доминирующей микротрешины до уровня макротрешины. В качестве критерия предельного состояния можно использовать максимальный размер дефекта в системе микрометровых трещин.

Если образование макроскопической трещины обусловлено слиянием микрометровых трещин, то наиболее вероятно объединение малых по раз- меру дефектов с трещиной максимальной длины.

Элементы конструкций обычно содержат как врожденные дефекты и трещины, так и возникшие при обработке, изготовлении и транспортировке. Наиболее распространены при сварке трещины. Физическая неоднородность присадочного металла связана с несовершенством его кристаллической решетки. Особенно много дефектов возникает при дендритной кристаллизации. Ветви дендритов имеют различную пространственную ориентацию, а кристаллиты – блочную структуру, усиливаемую из-за скопления между ветвями дендритов примесей и дислокаций. При сварке кристаллизующийся металл находится под воздействием растягивающих напряжений, возникающих вследствие несвободной усадки присадочного металла, который в процессе охлаждения подвержен пластической деформации. При кристаллизации некоторое время металл находится в твердо-жидком состоянии. Если нарастание напряжений опережает повышение пластичности металла, возникают межкристаллические разрушения. Если же процесс нарастания напряжения происходит, когда металл уже прошел твердо-жидкое состояние и приобрел достаточную прочность и пластичность, то возникшие напряжения лишь вызовут пластическую деформацию, и образование кристаллизационных трещин не произойдет.

Холодные трещины в присадочном металле образуются при сравнительно невысокой температуре (≈ 200 °C). Они возникают тогда, когда металл, казалось бы, уже приобрел высокие прочностные свойства. Характерная черта появления холодных трещин – замедленное их развитие в течение нескольких часов и даже суток. Затем при достижении определенной величины трещины развиваются мгновенно, взрывоподобно, с характерным звуковым эффектом. Холодные трещины возникают как по границам, так и по телу зерна.

Размеры шлаковых включений могут быть от микроскопических до частиц диаметром несколько миллиметров [1; 5]. Форма их бывает округлой и вытянутой.

Все они подчиняются некоторой закономерности распределения по количеству и размерам. Это распределение в совокупности с локальным напряженным состоянием и средой определяют потенциальные центры возникновения трещины. Чаще всего трещина берет начало от какого-нибудь небольшого поверхностного дефекта детали по истечении инкубационного периода конечной продолжительности. Затем трещина растет под совместным влиянием приложенной нагрузки и окружающей среды. После того как трещина достигла критической глубины, происходит быстрое разрушение.

Отказ материала конструкции с повреждениями в значительной степени определяется наличием дефектов в металле и материале покрытия, а также их взаимодействие с частицами присадочного материала. Механическая обработка таких деталей приводит к изменениям структуры поверхностного слоя; ранее скрытые дефекты и поры выходят на поверхность, являясь очагами разрушения [6; 7]. Наличие дефектов обусловлено как технологией изготовления изделия, так и его эксплуатацией. Н.А. Махутов и другие предложили [4; 8] непровары, поры, несплавления и другие дефекты при расчетах показателей надежности рассматривать как трещины. Если обозначить критический размер дефекта a_c , размер дефекта в момент времени $t - a$, и считать их фиксированными случайными величинами, то вероятность безотказной работы $R(t)$ материала с покрытием можно представить в виде вероятности:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{a_t \leq a_c\} = \int_0^{\infty} [1 - F_t(a_t, Q_t)] f_c(a_c, Q_c) d a_c, \quad (5)$$

где $F(t)$ – функция распределения ресурса; $f_c(a_c, Q_c)$ – плотность распределения критического размера дефекта; Q_c, Q_t – векторы параметров распределения, зависящие от времени t [9]. В качестве аппроксимирующей функции плотности распределения размера дефекта можно использовать: двухпараметрический закон Вейбулла – Гнеденко, распределение Эрланга, законы нормального и равномерного распределения. Размер критического дефекта можно найти через характеристики статической трещиностойкости. Функция риска $h(t)$ определяется из выражения

$$h(t) = F'(t) / (1 - F(t)), \quad (6)$$

где $F'(t)$ – производная функции распределения ресурса по времени t .

Заключение. Эксплуатация целого ряда металлических конструкций недопустима при наличии в ответственных элементах макроскопических

трещин. Ресурс таких деталей будет лимитироваться временем развития малых трещин до образования одной или нескольких макротрещин длиной, достаточной для их надежной идентификации методами неразрушающего контроля. Разработка мероприятий по управлению надежностью на основе прогнозной информации является типичной задачей принятия решений в условиях неопределенности, зависящей от так называемых «природных факторов», не известных или известных с недостаточной точностью в момент принятия решения и обусловленная их недостаточной изученностью.

Литература

1. Шокин, Ю.И. Вероятностные модели технологической дефектности сварных соединений / Ю.И. Шокин, В.В. Москвичев, А.М. Лепихин. – Препринт / ВЦ СО АН СССР. – Красноярск, 1988. – 20 с.
2. О природе разброса вязкости разрушения при статическом нагружении / В.Т.Троценко и [др.] // Проблемы прочности. – 1990. – № 2. – С. 10 – 18.
3. Завистовский, В.Э. Обзор законов распределения случайных величин при расчетах надежности технических систем / В.Э. Завистовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – № 4. – 2004. – С. 108 – 122.
4. Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
5. Анализ закономерностей распределения усталостных трещин / П. Ромвари и [др.] // Проблемы прочности. – 1980. – № 12. – С. 18 – 28.
6. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
7. Автомодельность накопления повреждений / Л.Р. Ботвина и [др.] // Проблемы прочности. – 1985. – № 12. – С. 17 – 24.
8. Прогнозирование ресурса с учетом особенностей развития системы поверхностных микрометровых трещин / С.Р. Игнатович и [др.] // Проблемы прочности. – 1990. – № 3. – С. 17 – 22.
9. Завистовский, В.Э. Надежность элементов конструкций с повреждениями / В.Э. Завистовский, О.В. Коробов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – № 8. – 2011. – С. 42 – 47.