

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗДЕФЕКТНОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

А.К. Тиньгаев, Р.Г. Губайдулин, П.А. Норин

PROBABILISTIC-STATISTICAL MODEL OF DEFECT-FREE WELDED JOINT

A.K. Tingaev, R.G. Gubaidulin, P.A. Norin

Предложена вероятностно-статистическая модель бездефектности сварного соединения, учитывающая особенности технологического процесса изготовления сварных изделий, находящегося в стабильном и статистически управляемом состоянии.

Ключевые слова: сварное соединение, технологический дефект, вероятность события, распределение Пуассона.

A probabilistic-statistical model of defect-free welded joint is proposed, taking into account the peculiarities of the stable and statistically controlled technological process of weld product manufacture.

Keywords: welded joint, technological defect, probability of events, Poisson distribution.

Благодаря своим уникальным возможностям соединять различные конструкционные материалы, сварочные технологии широко применяются в различных сферах человеческой деятельности, формирующих большую часть (более 50 %) валового национального продукта промышленно развитых стран. Вместе с тем недостаточное качество сварных соединений относят к числу наиболее значимых причин разрушения опасных технических устройств, конструкций и сооружений.

В общем случае нормирование показателей качества сварных соединений по показателям сплошности и механическим свойствам может быть осуществлено по двум принципиально отличающимся схемам. В рамках первой схемы изначально заданными считают размеры и количество дефектов, а расчету подлежат механические свойства металла сварного соединения, предполагая, что в них могут иметь место допустимые дефекты. В рамках второй – заданными считают механические свойства металла сварного соединения, а расчету подлежат размеры и количество дефектов.

Следует отметить, что обе схемы имеют право на существование, но на разных этапах жизненного цикла изделия. В частности, первую схему следует применять на этапах проектирования, изготовления и монтажа конструкции, а вторую – на стадии эксплуатации изделия при оценке ее технического состояния и остаточного ресурса.

До недавнего времени этому вопросу не уделялось должного внимания, и большая часть норм допустимой дефектности сварных соединений основывалась на методологии второго направления с введением дополнительных ограниче-

ний на размеры и количество дефектов сверху, основываясь на субъективном представлении разработчиков норм об уровне качества сварочного производства. В результате сформировался компиляционный подход, который не имеет должного научного обоснования и способствует появлению многочисленных нормативных документов, регламентирующих качество сварных соединений одного и того же изделия, параметры которого могут отличаться в разы.

Очевидно, что при таком количестве документации и столь отличающихся требованиях, в ней приведенных, трудно говорить о сколько-нибудь систематизированной оценке качества сварных швов.

В настоящей работе предлагается вероятностно-статистическая модель бездефектности сварного соединения, которую следует использовать при разработке методов нормирования показателей качества в рамках первого направления.

Согласно [1] сварную конструкцию следует рассматривать как целостную совокупность упорядоченно взаимодействующих элементов, в которой прочность на уровне сварного соединения достигается при соблюдении условия

$$\begin{cases} a_{ij} \leq a_{cj}(R_n); \\ F_{ik} \geq F_{ck}(a_{cj}), \end{cases} \quad (1)$$

где a_{ij} , a_{cj} – соответственно текущее и критическое значения технологических несовершенств j -го типа; F_{ik} , F_{ck} – соответственно текущее и нормативное значения j -й характеристики механического свойства металла сварного соединения.

Для решения (1) в первую очередь необходимо определиться с математической моделью бездефектности сварного соединения, используя которую можно рассчитать $a_{cj}(R_n)$ и $F_{ck}(a_{cj})$. Для определения вида функции бездефектности сварного соединения введем по аналогии с [2] вероятностную модель появления k дефектов одного типа в эталонной области сварного соединения M_0 , предполагая, что в каждый фиксированный момент времени t они образуют пуассоновские ансамбли (многомерные пуассоновские потоки, размерность которых равна размерности области M_0):

$$Q_k(t) = \frac{\lambda^k(t)}{k!} \exp[-\lambda(t)]. \quad (2)$$

Здесь $\lambda(t)$ – математическое ожидание числа дефектов одного типа в области M_0 в момент времени t .

Согласно (1) за предельное состояние сварного соединения с k дефектами j -го типа примем событие, для которого выполняется условие $a_i \geq a_c$ хотя бы для одного дефекта в пределах области M_0 . Тогда надежность есть вероятность отсутствия в области M_0 дефектов больше критической величины.

Использование вероятностных моделей типа (2) для решения задачи о бездефектности сварного соединения предполагает независимость a_c от величины нагрузки. Применительно к (1) это требование не актуально, так как условия нагружения учитываются здесь при определении нормативных требований к показателям механических свойств F_{ck} .

Далее в (2) следует ввести ограничение по размеру дефекта, а именно: из всего множества дефектов, размещенных в области M_0 , необходимо оставить только те, размеры которых превышают a_c . Для преобразования вида $Q(t) \rightarrow Q(a_c, t)$ воспользуемся процедурой разреживания, заключающейся в удалении из ансамбля части элементов. Возможность применения этой процедуры следует из предельной теоремы теории вероятностей для редующих потоков [3], которая гласит, что если стационарный пуассоновский поток с интенсивностью λ последовательно подвергать независимым преобразованиям (случайному преобразованию, при котором каждое событие исходного потока независимо от других событий остается с вероятностью q и исключается с вероятностью p), то результирующий поток будет сходиться по вероятности к простейшему пуассоновскому потоку с интенсивностью λ . Опуская промежуточные математические преобразования, они приведены в [2], запишем окончательное выражение вероятностной модели размещения в области M_0 k дефектов размером больше a_c :

$$Q_k(a_c, t) = \frac{\lambda^k(a_c, t)}{k!} \exp[-\lambda(a_c, t)]. \quad (3)$$

Расчет по (3) при $k=0$ представляет собой определение вероятности отсутствия в области M_0

дефектов больше критической величины, т. е. $Q(a_c, t) = P(a_c, t)$. В общем случае, когда в области M могут иметь место несколько типов дефектов, выражение для $P(a_c, t)$ имеет вид:

$$P(a_c, t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \int_M \lambda(a_{cj}, t) \frac{dM}{M_0} \right], \quad (4)$$

где $\lambda(a_{cj}, t)$ – математическое ожидание числа дефектов, размер которых больше a_{cj} ; a_{cj} – критическая величина дефекта j -го типа; M – общая протяженность сварного шва, представленная в виде суммы эталонных областей.

Выражения типа (4) достаточно широко используются в качестве математической модели надежности сварного соединения [2, 4, 5], в которой не достаточно полно учитываются технологические особенности изготовления сварных металлоконструкций. Исследователи, как правило, предполагают, что математическое ожидание количества дефектов есть величина постоянная. В действительности выборочный неразрушающий контроль и ремонт дефектных участков сварного соединения, приводят к изменению $\lambda(a_{cj}, t)$ на соответствующих участках, а следовательно, и во всей области M .

Для учета этих особенностей выделим из области M контролируемые участки сварного шва и разделим их на две группы. К первой группе отнесем участки сварного соединения, на которых отсутствуют недопустимые дефекты – $P(a_c)$ для них считается равной единице. Ко второй группе отнесем участки с недопустимыми дефектами, для которых $P(a_c)$ меньше единицы.

Согласно общепринятой практике, все отремонтированные (исправленные) участки сварного соединения подлежат повторному контролю в объеме 100%. Из этого следует, что вероятность обнаружения недопустимых дефектов при условии их наличия должна быть равна единице. Однако это предположение не всегда верно, так как методы неразрушающего контроля характеризуются определенной достоверностью и реально можно говорить об отсутствии недопустимых дефектов с какой-то долей вероятности. К тому же ремонт дефектных участков не всегда обеспечивает выполнение условия $P(a_c)=1$, так как ремонтные работы оказывают влияние на механические свойства металла сварного соединения, а следовательно, и на величину a_c , которая является нижним пределом интегрирования при определении $P(a_c)$. Учитывая эти обстоятельства, модифицируем (4), для чего разобьем область M на участки с постоянными значениями $\lambda(a_{cj})$ и a_c и примем, что на момент ввода конструкции в эксплуатацию $P(a_c, t) = P(a_c)$. Далее предположим, что в пределах

области M взаимодействие участков сварного шва соответствует схеме с последовательным соединением элементов, которая с точки зрения надежности сварного соединения является наиболее консервативной и поэтому вполне оправданной в условиях неопределенности. Для принятой схемы взаимодействия участков сварного шва его надежность можно рассчитать как:

$$P(a_c) = P_{nc} P_c P_{cr}, \quad (5)$$

где P_{nc} , P_c , P_{cr} – вероятности отсутствия дефектов размером больше критической величины на неконтролируемом, контролируемом и отремонтированном участках сварного шва соответственно, рассчитываемые по формулам:

$$P_{nc} = \exp \left[- \sum_{j=1}^n \int_{M_{nc}} \lambda_{nc}(a_{cj}) \frac{dM}{M_0} \right]; \quad (6)$$

$$P_c = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \left[\int_{M_c} \lambda_c(a_{cj}) \frac{dM}{M_0} - \int_{M_{cr}} \lambda_{cr}(a_{cj}^*) \frac{dM}{M_0} \right] \right\}; \quad (7)$$

$$P_{cr} = \exp \left[- \sum_{j=1}^n \int_{M_{cr}} \lambda_{cr}(a_{cj}^*) \frac{dM}{M_0} \right]. \quad (8)$$

Здесь λ_{nc} , λ_c , λ_{cr} – математические ожидания числа дефектов размером больше критической величины на неконтролируемом, контролируемом и отремонтированном участках сварного шва соответственно.

На стадии проектирования изделия конструктор не обладает информацией о количестве и длине отремонтированных участков, а также о влиянии ремонтно-восстановительных работ на a_{cj}^* , что создает неопределенность в отношении P_{cr} . Для ее раскрытия примем, что при разработке технологии ремонтно-восстановительных работ будет соблюдено условие «равнопрочности» исходного и отремонтированного участков шва по всей номенклатуре механических свойств. В таком случае можно допустить, что $a_{cj} = a_{cj}^*$, а $P_{cr} = P_c$ и включить исправленные участки сварного шва в состав проконтролированных бездефектных.

Вероятность отсутствия на проконтролированных участках шва недопустимых дефектов связана в основном с достоверностью используемого метода контроля, которую можно выразить через условную вероятность обнаружения дефектов размером больше a_{cj} .

Учитывая это обстоятельство, выражение для P_c примет вид

$$P_c = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \int_{M_c} [1 - P(D/a_{cj})] \lambda_c(a_{cj}) \frac{dM}{M_0} \right\}, \quad (9)$$

где $P(D/a_{cj})$ – условная вероятность обнаружения дефектов j -го типа размером больше a_{cj} .

Для упрощения выражения (5) выразим M_{nc} и M_c через общую длину сварного шва и объем неразрушающего контроля. Эта процедура не представляет сложности, так как интегрирование по длине шва есть суммирование эталонных областей. Тогда, с учетом принятых допущений, а также формул (5)–(9) выражение для $P(a_c)$ можно представить как

$$P(a_c) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n (1 - V \cdot P(D/a_{cj})) \times \int_M \lambda_c(a_{cj}) \frac{dM}{M_0} \right\}, \quad (10)$$

где V – величина объема неразрушающего контроля, равная отношению длины проконтролированных участков к общей длине шва.

В связи с тем, что значения a_{cj} для разных категорий сварных швов могут быть разными, для определения $P(a_c)$ лучше всего использовать не математическое ожидание числа дефектов больше a_{cj} , а математическое ожидание количества дефектов всех размеров λ_0 , которое не зависит от a_{cj} . Для этого воспользуемся известным соотношением между $\lambda(a_{cj})$, плотностью функции распределения размеров дефектов $f(a_j)$ и λ_{0j} [1]:

$$\lambda(a_{cj}) = \lambda_{0j} \int_{a_{cj}}^{\infty} f(a_j) da_j. \quad (11)$$

Подставив (11) в (10) и выполнив необходимые математические преобразования, получим выражение для вероятности бездефектности сварного соединения

$$P(a_c) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{0j} (1 - V \cdot P(D/a_{cj}))}{M_0} \times \int_M \int_{a_{cj}}^{\infty} f(a_j) da_j dM \right\}. \quad (12)$$

Стохастическая природа технологической дефектности представлена в (12) через функции распределения размеров дефектов и математического ожидания их количества, а эффективность неразрушающих методов контроля через произведение $V \cdot P(D/a_{cj})$. Так, например, при $a_{cj} < a_{0j}$, где a_{0j} – минимальный размер выявляемого дефекта j -го типа, $P(D/a_{cj}) = 0$ и вероятность отсутствия в сварном соединении дефектов определяется состоянием технологического процесса сварки и не зависит от объема неразрушающего контроля. При $P(D/a_{cj})$ и V , отличных от нуля, надежность сварного соединения возрастает в зависимости от

их значений. В предельном случае, когда $P(D/a_c) = 1,0$ и $V = 1,0$ величина $P(a_c)$ не зависит от M , $f(a_j)$ и λ_{0j} , т. е. при любом a_{cj} величина $P(a_c) = 1,0$.

В рамках сложившейся системы проектирования металлоконструкций обеспечение прочности сварного соединения в составе конструкции только за счет (1) наталкивается на значительные вычислительные трудности. Поэтому для снижения размерности таких задач часто используют метод декомпозиции, предполагающий разукрупнение исследуемого объекта (C_w), в данном случае на сварные соединения (e_{ij}^w) и узлы (p_i):

$$C_w = \bigcup_{i=1}^n p_i \left(\bigcup_{j=1}^m e_{ij}^w \right). \quad (13)$$

Исходя из двухуровневой декомпозиции обеспечение работоспособности конструкции на стадии проектирования следует осуществлять в два этапа. На первом этапе решается вопрос о прочности сварного соединения посредством выбора основного и сварочного материалов, а также назначения категорий ответственности сварных соединений, для которых предварительно рассчитываются показатели их качества по допустимой дефектности и механическим свойствам.

На втором этапе выполняется расчет на прочность и долговечность элементов сварных конструкций, для которых считаются заданными механические свойства, геометрические характеристики и количество допустимых дефектов в сварном соединении.

Нормирование характерных размеров дефектов осуществляется посредством решения (12) относительно a_{cj} для случая, когда $V = 0$, а $M = M_0$, т. е. без учета фактической длины сварного соединения и объема его контроля. Это связано с тем, что определение длины сварного шва, характера его нагруженности, объема и методов контроля осуществляется на втором этапе проектирования конструкции и учесть их изначально не представ-

ляется возможным. В то же время известно, что влияние параметров V и M на вероятность бездефектности сварного соединения (12) существенно и пренебрегать им нельзя. Не нарушая логики (13), это можно сделать за счет соответствующего коэффициента надежности, введя его в уравнение предельного состояния сварного соединения.

В заключение отметим, что выражение (12) позволяет с единых теоретических позиций решить задачу нормирования технологических несовершенств сварных соединений (определить a_{cj}), учитывая, с одной стороны, нормативные требования по бездефектности, а с другой – возможности технологического процесса сварки, находящегося в стабильном и статистически управляемом состоянии.

Литература

1. Тиньгаев, А.К. Развитие нормативных методов обеспечения сопротивления хрупкому разрушению сварных металлоконструкций с позиции системного подхода / А.К. Тиньгаев, Р.Г. Губайдулин // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. тр. Междунар. науч. конф. – М.: МГСУ, 2011. – Т. 2. – С. 762–766.
2. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
3. Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
4. Москвичев, В.В. Методы и критерии механики разрушения при определении живучести и надежности металлоконструкций карьерных экскаваторов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Москвичев. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – 40 с.
5. Лепихин, А.М. Риск-анализ конструкций потенциально опасных объектов на основе вероятностных моделей механики разрушения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Лепихин. – Новосибирск: Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 2000. – 36 с.

Поступила в редакцию 16 января 2012 г.