



ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ОБЗОР)

Ю. К. БОНДАРЕНКО, Я. М. ФУРМАН, А. Ю. БОНДАРЕНКО, О. В. КОВАЛЬЧУК

Приведен обзор основных факторов, влияющих на ресурс металлоконструкций. Описываются основные положения долговечности сварных соединений при переменных нагрузках. Дана обзорная структурная схема, которая может быть положена в основу решения проблем определения остаточного ресурса стальных конструкций. Указано, что техническим диагностированием металлоконструкций рекомендовано заниматься только аккредитованным испытательным лабораториям (центрам), подтвердившим свою компетентность в соответствии с требованиями международного и национального стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025–2001 в Национальном агентстве аккредитации в Украине в соответствии с требованием Закона Украины «Об аккредитации органов подтверждения соответствия» (№ 2407-111 от 17.05.2001 г.).

The paper gives a review of the main factors influencing metal structure life. The main aspects of welded joint fatigue life at alternating loads are described. A general block diagram is provided, which shows the questions to solve the problems of determination of residual life of steel structures. It is stated that technical diagnostics of metal structures can be performed only by certified testing laboratories (centers), which have proved their competitiveness in compliance with the requirements of the international and national standard SSTU ISO/IEC 17025-2001 at the National Certification Agency of Ukraine, in keeping with the Law of Ukraine «on certification of regulatory bodies».

Создание и эксплуатация конструкций, наиболее полно отвечающих своему назначению, экономичных и надежных в эксплуатации является комплексной задачей, включающей этапы проектирования, исследования прочности, оптимальной организации технологического процесса изготовления, контроля качества сварных соединений и диагностики состояния конструкции в процессе ее эксплуатации [3].

В Украине, как и в ряде других стран СНГ, за последние годы стал актуальным вопрос по эксплуатационной надежности металлоконструкций в связи с сильной изношенностью (поскольку новые мощности в эксплуатацию с 1990-х годов практически не вводят) большого парка действующих металлоконструкций.

В настоящее время эксплуатируется значительное количество машин, сварных конструкций и трубопроводов, расчетные сроки эксплуатации которых исчерпываются [1]. Это связано с тем, что экономика Украины не в состоянии произвести полную замену парка металлоконструкций. Для обеспечения безопасного состояния конструкции необходимо также контролировать эксплуатационную надежность металла.

Работоспособность стальных конструкций ограничена по причине накопления в них при эксплуатации внутренних повреждений, обусловленных длительными воздействиями механических и термических нагрузок, а также агрессивных сред (рис. 1). Под действием этих факторов изменяется как внутренняя структура материала, так и его реальные механические свойства, что приводит к опасному состоянию кон-

Кроме перечисленных факторов на срок ресурса влияет и качество материалов, из которых изготавливается конструкция. Материалы можно поделить на две группы: основные и вспомогательные. Основные — это материалы, которые входят в общую массу конструкции (балки, уголки и др.), вспомогательные не входят в общую массу конструкции (сварочные аппараты, защитные маски и др.). Для повышения надежности на стадиях изготовления, монтажа и проведения ремонтных работ необходим тщательный входной контроль материалов и комплектующих изделий.

Значительная часть повреждений металлоконструкций вызывается усталостью сварных соединений, испытывающих воздействие нагрузок, переменных во времени [3]. Доля усталостных разрушений продолжает расти, составляя примерно 30 % общего числа преждевременных повреждений и отказов сварных металлоконструкций.

Основные положения прочности и долговечности металлов при переменных нагрузках остаются справедливыми и **в отношении сварных соединений**. Вместе с тем последним свойственны такие специфические особенности, как характерная форма соединений и швов, неоднородность механических свойств, возможность возникновения при

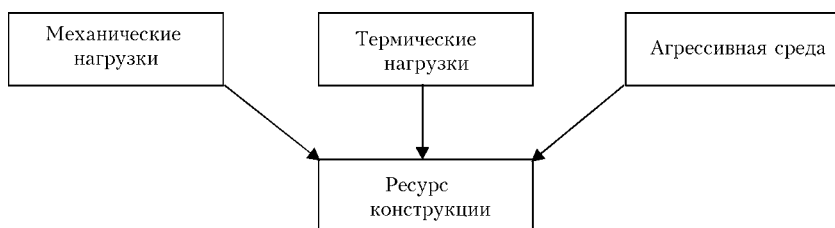


Рис. 1. Основные факторы, влияющие на металлоконструкцию [15]



сварке технологических дефектов, высокие остаточные деформации и напряжения.

Многие сварные конструкции испытывают воздействие большого числа перемен временных нагрузок: перемещающихся или перевозимых грузов, волн, ветра, грунта и т. д. Возникающая при этом переменность напряжений тех или иных элементов сварных конструкций может вызвать их разрушение от усталости. Наиболее часто усталостные трещины зарождаются **в сварных соединениях**.

Усталость материалов и сварных соединений — процесс многостадийный. Он начинается с постепенного накопления необратимых физико-механических изменений в материале, которые вызывают образование микротрещин. Затем некоторые из них при своем дальнейшем развитии образуют макротрещину. Макротрещина на определенной стадии своего распространения вызывает полное разрушение изделия, элемента конструкции.

Усталостное разрушение отличается от статического рядом характерных особенностей. Оно может вызываться невысокими напряжениями, составляющими примерно половину статической прочности. При знакопеременных напряжениях разрушающие напряжения уменьшаются еще больше. Внешний вид усталостного разрушения также существенно отличается от разрыва, вызванного статическим приложением нагрузки. Усталостное разрушение обычно начинается с поверхности металла и происходит без видимой предшествующей макропластической деформации; следы ее обнаруживаются лишь в отдельных зернах. По своей внезапности и опасности усталостное разрушение сопоставимо только с мгновенным хрупким. **В усталостном изломе выделяют три основные зоны:** чисто усталостную, характеризующуюся наличием усталостных макро- и микрополос, наблюдаемых в электронном микроскопе; зону смешанного разрушения (как результат локальных разрушений впереди трещины), имеющую хрупкие участки и усталостные полосы, и зону долома.

В отличие от статического разрушения изделия, усталостное весьма чувствительно к состоянию поверхности металла, концентрации напряжений, трещин, риски от резца, ожогов от сварочной дуги. Коррозионные повреждения существенно изменяют сопротивление усталости материала. Резкие изменения сечения элемента, различного рода выкружки, отверстия, переходы сварных швов на основной металл, дефекты металла швов — потенциальные места преждевременного зарождения усталостных трещин.

Неравномерность нагрева изделия при сварке, одновременность появления объемных эффектов структурных превращений, различие в физических свойствах материалов свариваемых изделий приводят к интенсивным деформационным процессам в околошовной зоне. Эти факторы существенно влияют на технологическую прочность, точность изготовления, несущую способность и эксплуатационную стойкость сварного соединения. Поэтому наличие информации об этих процессах в зависимости от условий и параметров режима сварки весьма важно; оно необходимо для раци-

онального проектирования сварных конструкций, а также при разработке технологии их изготовления и эксплуатации.

Для определения ресурса во время эксплуатации объекта используют **методы неразрушающего контроля**. Это очень эффективные способы, при помощи которых с высокой точностью определяется состояние материала при разных видах нагрузок, при разных климатических условиях. При помощи этих методов можно проверить качество сварных соединений, антикоррозионных покрытий и т. д. Эти методы основаны на изменении тех или иных физических свойств материала в зависимости от степени упругого деформирования.

Широкое применение для оценки **одноосных и двухосных напряженных состояний** конструктивных элементов получил ультразвуковой метод, основанный на использовании зависимости скорости распространения сдвиговых ультразвуковых волн в твердом теле с напряжениями от значения этих напряжений [3].

При известных физико-механических характеристиках материала определение напряжений сводится к измерению скорости распространения двух сдвиговых ультразвуковых волн, которые направлены перпендикулярно плоскости действия главных напряжений и поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, соответствующих направлениям главных напряжений, которые рассчитываются по формуле [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \left(\frac{c_{S1} - c_{S0}}{c_{S0}} - \frac{c_{S2} - c_{S0}}{c_{S0}} \right) A, \\ \sigma_1 + \sigma_2 &= \left(\frac{c_{S1} - c_{S0}}{c_{S0}} + \frac{c_{S2} - c_{S0}}{c_{S0}} \right) B, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_1 и σ_2 — определяемые главные напряжения; c_{S1} , c_{S2} — скорости распространения сдвиговых волн, поляризованных в соответствующих главных плоскостях, в нагруженном объекте; c_{S0} — скорость сдвиговой волны в ненагруженном объекте.

Коэффициенты пропорциональности A и B определяются экспериментально при тестовых испытаниях материала объекта.

При оценке двухосного напряженного состояния ультразвуковым методом необходимо знать направления главных напряжений, в плоскости которых осуществляется поляризация сдвиговых волн. Если главные направления в данном объекте заранее неизвестны, то их определяют по максимальной разности скоростей или по характеру нескольких последовательных отражений ультразвукового сигнала. При измерениях этим методом неоднородных полей напряжений получают усредненные напряжения на базе, которая определяется размерами измерительных датчиков. При измерениях по толщине изделия с помощью сдвиговых ультразвуковых волн также получают усредненные значения напряжений по толщине. В определенной степени усреднения напряжений по толщине изделия можно избежать, если использовать поверхностные волны Рэлея. Для этих волн уравнения (1) сохраняется, только вместо A и B сле-



дует подставить A^R и B^R , соответствующие распространению волн Рэлея в данном материале.

Измерение скоростей распространения ультразвуковых волн в исследуемом объекте проводится с помощью различных приборов. Главная трудность состоит в том, что изменения параметров упругой волны вследствие действия напряжений весьма малы, поэтому на выбор метода измерения скорости распространения упругой волны в этих приборах накладывается условие обеспечения точности измерения с погрешностью не более $(1...3) \cdot 10^{-5}$. Используются, в основном, импульсные методы. Указанной выше чувствительностью обладает метод автоциркуляции импульса. Двухканальный измеритель скорости ультразвуковых волн с чувствительностью не хуже 10^{-6} . Важную роль в измерении скорости упругих волн играет акустический контакт пьезоэлектрического преобразователя и исследуемого тела. Существенные погрешности могут вноситься в результаты измерений структурные и фазовые превращения в металле при сварке, поскольку при этом заметно меняются параметры упругой волны, что значительно маскирует эффект от остаточных напряжений.

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений базируется на измерении деформаций контролируемого объекта путем практического измерения величины межплоскостных расстояний кристаллической решетки металла изделия.

Различают два рентгеновских способа определения макронапряжений, основанных на дифракции рентгеновских лучей: рентгенографический метод с использованием рентгеновской пленки (фотометод) и дифрактометрический метод с использованием гониометра и рентгенографического датчика для точной регистрации углов дифракции. Второй метод находит ограниченное применение из-за больших габаритных размеров, значительной массы дифрактометра и необходимости в охлаждении рентгеновской трубки водой. Рентгеновский фотометод нашел более широкое применение в практике, вплоть до создания портативных установок определения величины и распределения остаточных напряжений в сварной конструкции [5].

Известные электромагнитные методы определения остаточных напряжений основаны на зависимости внешнего электромагнитного поля от механического исследуемого твердого тела [6].

В последнее время привлекает внимание магнитошумовой метод для оценки напряжений в ферромагнитных материалах, включая и аморфные [7]. Интерес к этому методу обусловлен высокой магнитоупругой чувствительностью параметров шума Брокгаузена, отсутствием магнитоупругого гистерезиса, возможности контроля изделий сложной формы. Разработаны различные типы приборов для реализации метода [4]. Тем не менее имеются факторы, ограничивающие точность измерения напряжений по этому методу. Это различие вклада поверхностных слоев различной глубины в сигнал преобразователя, зависимость параметра шума от угла разориентации между направлениями внешнего переменного магнитного поля и главных напряжений, различные во влиянии

на параметры шума нормальных и касательных напряжений.

Известны также и другие электромагнитные методы, например магнитный (коэрцитиметрический) метод [2, 14]. Преимущественная сфера действия данного метода — это зоны концентрации нагрузений, в которых эксплуатационная усталость развивается и накапливается опережающими темпами. При этом весьма существенно, что местонахождение этих зон на металлоконструкциях логически предопределено самой конструкцией контролируемого изделия. Все многообразие конструкций строится по одним и тем же законам и принципам теоретической механики и сопротивления материалов. Кроме того, размеры зон концентрации нагружения велики и существенно превышают размеры единичного дефекта. В результате выявляются эти зоны надежно, без каких-либо поисковых сложностей.

И, как показали стендовые разрушающие испытания образцов и подтвердила практика, если взять в качестве информационного параметра такую магнитную характеристику, как коэрцитивная сила металла, то ее приращение составит величину 200...300 % от начальной (для конструкционных сталей широкого применения), пока усталостные явления развиваются от состояния поставки (новый металл) до состояния предразрушения под действием приложенных к конструкции нагрузок (предельное состояние) [2, 14].

Данная оценка состояния металла является интегральной в толщине (глубине) слоя от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, в зависимости от типа используемого приставного датчика.

В последнее время использование магнитных методов неразрушающего контроля [8, 9, 15] в сочетании с другими методами неразрушающего и разрушающего контроля позволяет повысить достоверность определения остаточного ресурса металлоконструкции.

Основным направлением технического диагностирования стальных конструкций после длительной эксплуатации для прогнозирования остаточного ресурса и безопасной эксплуатации являются:

- нахождение внутренних и внешних дефектов с использованием методов неразрушающего контроля;
- определение уменьшения толщин конструкций;
- определение ухудшения свойств металла, т. е. снижение предела прочности, предела текучести, ударной вязкости и других механических характеристик металла;
- выявление напряженно-деформированных участков, на которых наиболее вероятно появление опасных дефектов и зон;
- оценка степени опасности выявленных дефектов путем расчета коэффициента интенсивности напряжений в стальной конструкции.

Решение проблем определения остаточного ресурса стальной конструкции является комплексной задачей, выраженной в виде структур-

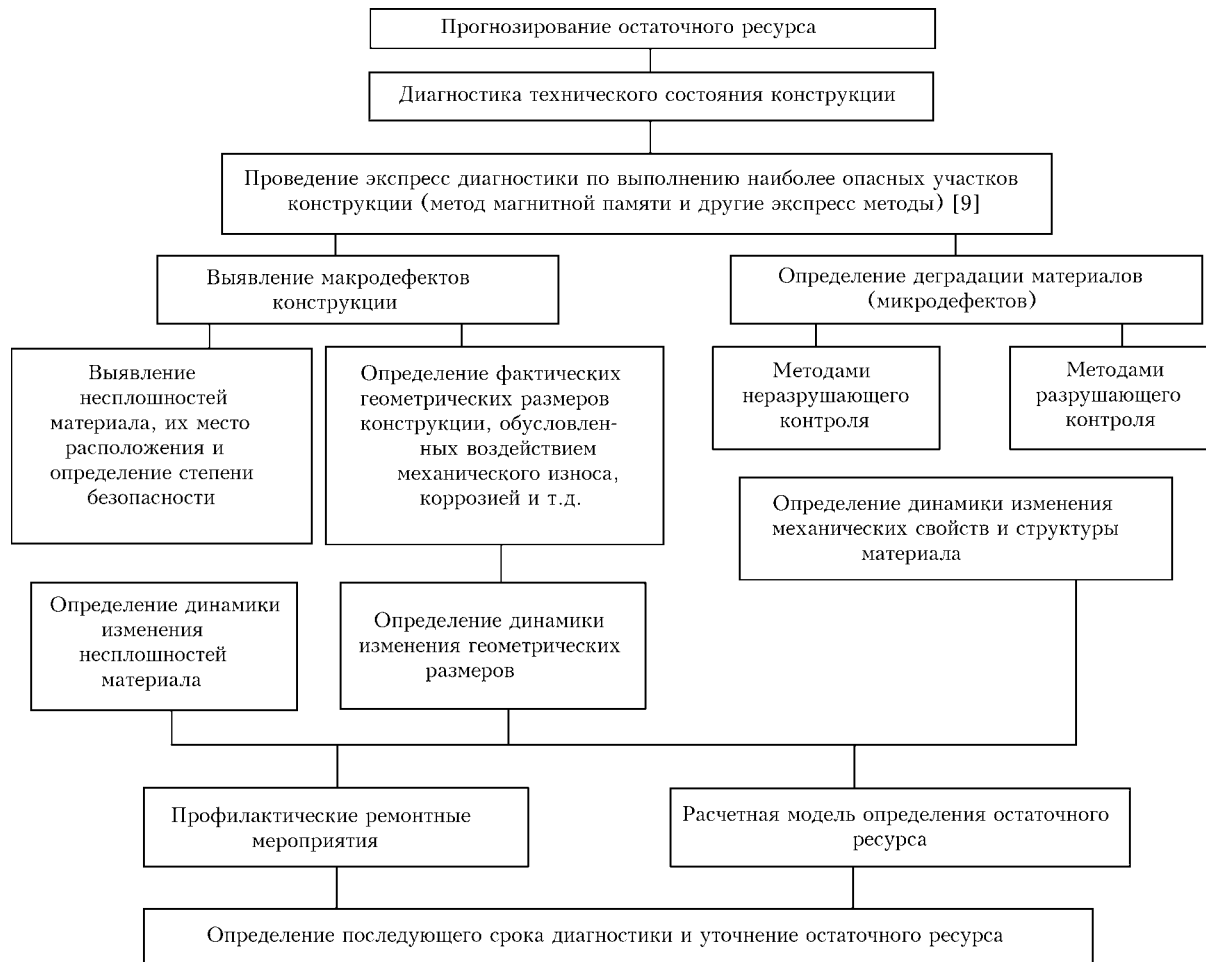


Рис. 2. Упрощенная структурная схема прогнозирования остаточного ресурса конструкции [9, 15]

ной схемы [9], на которой изображены отдельные задачи для ее решения (рис. 2) с помощью только испытательных лабораторий, аккредитованных на техническую компетентность [10, 13].

Выполнение перечисленных процедур возможно только специализированным лабораториям, имеющим соответствующий уровень компетенции, т. е. прошедшим аккредитацию в НААУ (Национальное агентство аккредитации в Украине), которая изложена в процедурном документе «Порядок проведения аккредитации органов по оценке соответствия» (утвержден Приказом Госстандарта Украины от 02.10.01 N952/6143). С марта 2002 года в Украине действует стандарт ДСТУ ISO/IEC 17025-2001, который идентичен Международному стандарту ISO/IEC 17025:1999. «Общие требования к компетенции испытательных лабораторий» (рис. 3) [10].

Анализируя требования стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025-2001 к работе испытательных лабораторий и процедурную документацию, нужно выделить необходимость предварительной разработки ряда процедур. Например, разработка процедуры оценки неопределенности измерений (рис. 4), а также процедур испытаний.

Неопределенность измерения — это параметр, связанный с результатами измерения и характеризующий рассеивание значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине для оценки пригодности метода [11, 16].

Неопределенность измерения выражает тот факт, что для данной измеряемой величины и для данного результата ее измерения не существует единого значения, а есть нескончаемое число значений, рассеянных вокруг результата, которые согласовываются со всеми полученными **наблюдениями и данными**, а также со знаниями физического мира, и которые с разной степенью уверенности могут быть приписаны измеренной величине.

Существует много возможных источников неопределенности при измерении, среди которых [11]:

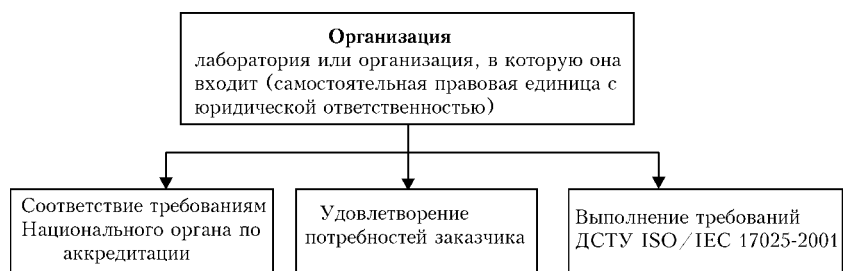


Рис. 3. Требования к испытательным лабораториям



Рис. 4. Схема процедуры оценивания неопределенности измерения

- неполное определение (спецификация) измеряемой величины;
- несовершенная реализация определения измеряемой величины;
- неадекватные знания эффектов от влияющих величин или несовершенное их измерение;
- субъективная погрешность, выполняемая оператором при считывании показаний аналоговых приборов;
- неточное значение, приписанное эталонам или мерам физических величин;
- неточное значение констант и других параметров, полученных от внешних источников, которые используются в алгоритме обработки данных;
- аппроксимации и допущения, которые используются в методе измерения и в измерительной процедуре;
- случайные изменения внешних действующих величин при повторных наблюдениях и измерениях.

Различают два типа расчета неопределенности:

- расчет по типу *A* – метод оценивания неопределенности путем статистического анализа ряда повторных наблюдений и измерений;
- расчет по типу *B* – метод оценивания неопределенности другим способом, не статистическим анализом ряда наблюдений и измерений.

Расчет неопределенности по типу *A*. В большинстве случаев лучшей оценкой математического ожидания или ожидаемого значения m_q величины q , для которой при наблюдениях и измерениях при одинаковых условиях измерения получены n надлежащих знаний q_i , есть среднее значение

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i. \quad (2)$$

Экспериментальную дисперсию наблюдений, которая есть статистической оценкой дисперсии $\sigma^2(q)$ распределения вероятности величины q , получают как

$$S^2(q_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2. \quad (3)$$

Добавленный квадратный корень $S(q_i)$ из дисперсии называют **экспериментальным стандартным отклонением**.

Лучшей оценкой дисперсии среднего значения есть выражение

$$S^2(\bar{q}) = \frac{S^2(q_i)}{n}. \quad (4)$$

Соответствующее **стандартное отклонение среднего значения**:

$$S(\bar{q}) = \frac{S(q_i)}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

Таким образом, стандартной неопределенностью, оцененной по типу *A*, для результата измерения, по которому принимается среднее значение, будет:

$$U_A(\bar{q}) = S(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}}. \quad (6)$$

Расчет неопределенности по типу *B* основывается на научном суждении о возможной изменчивости величины q с использованием всей доступной информацией и заключается, как правило, в использовании знаний распределения вероятности.

Источником информации могут быть:

- данные предыдущих измерений;
- данные, полученные в результате исследований или общие знания о поведении и особенностях соответствующих изделий и приборов;
- спецификация изготовителя;
- данные, которые приводятся в свидетельствах о калибровании, поверки и других сертификатах;
- неопределенности, приписываемые данным, которые взяты из справочников.

Встречаются ситуации, когда для величины q существует оценка границ a^+ и a^- интервала, в

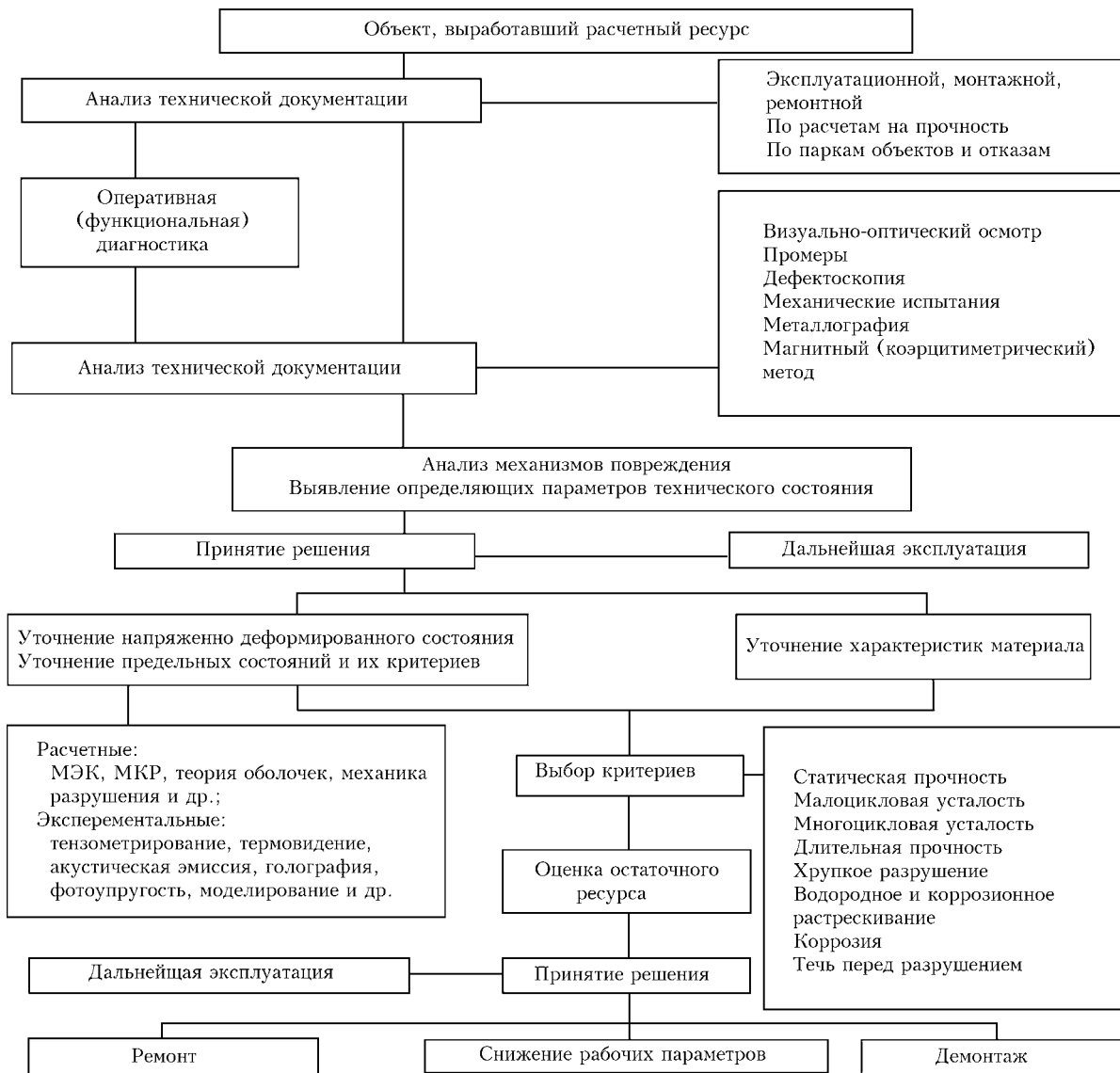


Рис. 5. Алгоритм принятия решения при оценке остаточного ресурса сварной конструкции [15]

приделах которого находятся возможные ее значения. Если конкретных данных о возможных значениях величины q в середине интервала нет, то можно лишь допускать, что с одинаковой вероятностью величина q может принять какое-то значение в его границах (равномерное распределение). В этом случае ожидаемое значение будет **средней точкой интервала с соответствующей дисперсией**

$$U^2(q) = \frac{(a^+ - a^-)}{12}. \quad (7)$$

Если составляющая неопределенности, полученная таким образом, дает значительный взнос в **неопределенность результата измерения**, то желательно **получить дополнительные данные** для ее более **полного оценивания**.

Исходя из центральной граничной теоремы теории вероятности, можно сделать допущение о том, что распределение приблизительно **нормальное**. В случае **нормального распределения** интервал $m_q \pm 3\sigma(q)$ покрывает приблизительно

99,73 % распределения. В этом случае можно считать

$$U^2(q) = \frac{(a^+ - a^-)}{36}. \quad (8)$$

Однако, если уверенности в нормальности распределения нет, то уместно принять компромисс между равномерным и нормальным распределением, допускающие, например, распределение Симпсона (треугольное). Тогда

$$U^2(q) = \frac{(a^+ - a^-)}{24}. \quad (9)$$

Если метод измерения достаточно изучен, то для него может быть известна **комбинированная оценка дисперсии** S_p^2 . В случае, когда в результате измерений принимают среднее из результатов наблюдений, стандартная неопределенность будет:

$$U = S_p / \sqrt{n}. \quad (10)$$



Выводы

Важно найти подход к решению сложившейся проблемы, благодаря которому можно провести обновление старого парка металлоконструкции. Так как наше государство не в состоянии полностью заменить старый парк металлоконструкции на новый, то рекомендуется, в соответствии с указанной структурной схемой прогнозирования остаточного ресурса конструкции (рис. 2, 5), определить, какие конструкции в аварийном (предельном) состоянии, а какие в рабочем [14].

Аварийные металлоконструкции необходимо либо отремонтировать либо заменить. Исчерпавшие свой ресурс конструкции, но в рабочем состоянии, можно эксплуатировать при соответствии их требованиям НД с периодическими проверками (мониторингом) и продлением ресурса, например с применением для повышения качества, надежности и долговечности металлоконструкций воздействия метода ультразвуковой ударной обработки [12].

Достоверную оценку остаточного ресурса могут обеспечить только испытательные лаборатории, аккредитованные на техническую компетентность в соответствии с требованиями ДСТУ ISO/IEC 17025-2002.

1. Лобанов Л. М., Махненко В. И., Труфяков В. И. Развитие расчетных и технологических методов повышения прочности, долговечности и точности изготовления сварных конструкций // Сб. тр. межд. конф. «Сварка и родственные технологии — в XXI век» (ноябрь 1998 г., Киев). — С. 137–151.
2. Безлюдько Г. Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 38–49.
3. Сварные строительные конструкции. Т. 1. Основы проектирования конструкций / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, В. И. Труфяков и др. — Киев, 1993. — 416 с.
4. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Справ. пособие. — Киев: Наук. думка, 1981. — 583 с.
5. Портативный рентгеновский определитель напряжений ПРОН и методики для изменения макронапряжений в металле энергооборудования / П. П. Большаков и др. //

Мат. III Всесоюз. симпозиум. «Технологические остаточные напряжения». — М.: 1988. — С. 79–83.

6. Биргер И. А., Козлов М. Л. Остаточные напряжения: проблемы и перспективы // То же. — М.: 1988. — С. 60–73.
7. Венгринович В. Л., Цукерман В. Л., Бусько В. Н. Магнитометрический метод и аппаратура изменения напряжений в ферромагнитных материалах // То же. — М.: 1988. — С. 101–105.
8. Дубов А. А., Хромченко Ф. А. Руководящий документ / Неразрушающий магнитный метод диагностирования сварных соединений трубных систем, котлов и трубопроводов энергетических установок. РД. 34.17.437–95. — М.: СПО «ОРГРЭС», 1995.
9. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса стальных конструкций после длительной эксплуатации / В. И. Загребельный, А. А. Дубов, А. В. Мозговой, А. Н. Рудаков // Матер. IV Нац. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 19–23 мая 2003. — С. 195–202.
10. Бондаренко Ю. К., Ковальчук О. В. Забезпечення якості продукції, процесів, послуг зварювального та споріднених виробництв. — Вип. 1. — Підтвердження компетентності випробувальної лабораторії шляхом її акредитації на відповідність вимогам стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025-2001. — Київ: 2003. — 26 с.
11. Новиков В. М., Коцюба А. М. Основи розробки системи якості та вимоги до компетентності лабораторій у відповідності до ISO/IEC 17025. Обробка результатів вимірювання та невизначенності вимірювань // Основи метрології та метрологічна діяльність. Ч. 2. — Київ: 2001. — С. 210.
12. Волченко Д. И. Повышение качества, надежности и долговечности металлоконструкций методом ультразвуковой ударной обработки // Сварщик. — 2003. — Май-июнь. — С. 12–13.
13. Бондаренко Ю. К., Ковальчук О. В., Бондаренко А. Ю. Забезпечення якості та виконання технічних послуг з неруйнівного контролю та технічної діагностики — головна проблема управління якістю при виготовленні, експлуатації та ремонті зварних конструкцій // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2000. — № 2. — С. 60–66.
14. Лобанов Л. М., Бондаренко Ю. К., Бондаренко А. Ю. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Там же. — 2004. — № 1. — С. 3–6.
15. Проблемы определения ресурса сварных конструкций / Ю. К. Бондаренко, Я. М. Фурман, А. Ю. Бондаренко, О. В. Ковальчук // Мат. Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — 2004. — г. Ялта. — С. 240.
16. Бондаренко Ю. К., Фурман Я. М. Проблеми визначення похибки вимірювання в випробувальній лабораторії // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2004. — № 4. — С. 45–51.

Ин-т электросварки им Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
28.12.2004