УДК 629.5.015:620.193
DOI: 10.37890/jwt.vi88.744

Анализ основных механизмов деградации корпуса судна: синергетика, моделирование и методы контроля

А.А. Трочук
ORCID 0009-0006-2039-1717
А.Р. Рубан
Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация. Постепенные отказы корпусов судов связаны с развитием процессов коррозии, износа и усталости материала, вероятность возникновения которых возрастает по мере увеличения срока эксплуатации судна [15]. Это подтверждает необходимость комплексного рассмотрения указанных процессов при оценке технического состояния корпуса. Их совместное воздействие приводит к снижению несущей способности и затрудняет оценку остаточной долговечности конструкций. В работе выполнен анализ взаимного влияния этих факторов с использованием классических моделей прогнозирования долговечности — закона Пэриса, правила Майнера, вероятностного подхода на основе модели пропорциональных рисков Кокса — а также современных методов обработки данных на основе машинного обучения. По данным экспериментальных исследований совместное действие коррозии и циклических нагрузок приводит к существенному сокращению долговечности по сравнению с изолированным воздействием каждого фактора. Предложена концептуальная структура интегрированной системы мониторинга технического состояния корпуса, объединяющая различные типы датчиков (волоконно-оптические, электрохимические, акустической эмиссии) и методы интеллектуальной обработки сигналов (автоэнкодеры для очистки от шумов). Результаты могут быть использованы при разработке систем мониторинга технического состояния судов, совершенствовании подходов к техническому обслуживанию по фактическому состоянию, а также при подготовке нормативных документов классификационными обществами.

Ключевые слова: корпус судна, деградация, коррозия, усталость, трещины, совместное влияние процессов, остаточный ресурс, цифровой двойник, предиктивное обслуживание

Analysis of the main mechanisms of ship hull degradation: synergistics, modeling, and monitoring methods

Anton A. Trochuk
ORCID 0009-0006-2039-1717
Anatoly R. Ruban
Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract. Corrosion wastage, fatigue damage and crack formation are the main mechanisms of degradation of ship hull structures. Their combined action leads to an accelerated reduction in load-bearing capacity and complicates the prediction of residual life. Objective - to analyse the mutual influence of these factors and to assess the capabilities of modern methods for monitoring and predicting the technical condition of a ship's hull. To achieve this goal, classical durability assessment models are considered, including Paris law and Miner's rule, probabilistic approaches based on the Cox proportional hazards model, as well as modern data processing methods based on machine learning algorithms. Results. It is shown that the combined action of corrosion and cyclic loading leads to a significant reduction in durability compared to the isolated effect of each factor. It has been established

that local forms of corrosion act as stress concentrators and contribute to accelerated fatigue damage development. A conceptual structure of an integrated system for monitoring the technical condition of the hull is proposed, combining various types of sensors and intelligent data processing methods. Practical significance. The results can be used in the development of ship technical condition monitoring systems and in improving approaches to condition-based maintenance, as well as in the preparation of regulatory documents by classification societies.

Keywords: ship hull, degradation, corrosion, fatigue, cracks, synergistic effect, residual life, digital twin, Condition Based Maintenance.

Введение

Корпус судна является основным несущим элементом, определяющим безопасность эксплуатации, надежность и срок службы судна. В процессе эксплуатации корпусные конструкции подвергаются воздействию морской среды, переменных механических нагрузок и циклических напряжений, что приводит к развитию коррозионного износа, накоплению усталостных повреждений и образованию трещин. Указанные процессы постепенно изменяют техническое состояние корпуса, снижают его несущую способность и требуют своевременного выявления при проведении освидетельствований и ремонтов.

Согласно исследованиям отечественных авторов, постепенные отказы корпусных конструкций в значительной степени обусловлены развитием процессов коррозии, износа и усталости материала, вероятность возникновения которых возрастает по мере увеличения продолжительности эксплуатации судна [15]. Поэтому обеспечение надежности корпусных конструкций остается одной из важнейших задач судостроения и эксплуатации флота.

В отечественной практике оценка технического состояния корпусов судов выполняется в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) и основана на результатах периодических освидетельствований, измерений остаточных толщин, выявлении повреждений и анализе их развития. Существенный вклад в развитие методов оценки технического состояния корпусных конструкций, прогнозирования остаточного ресурса и совершенствования методов технической эксплуатации внесли отечественные исследователи [3, 5, 15].

В мировой практике накоплен значительный опыт математического моделирования отдельных процессов, влияющих на техническое состояние корпуса судна. Разработаны модели прогнозирования коррозионного износа, накопления усталостных повреждений и распространения трещин, основанные на работах Pike, Miner, Paris и других исследователей. Эти модели широко применяются при оценке остаточного ресурса судовых конструкций и разработке современных систем мониторинга технического состояния. Вместе с тем большинство зарубежных моделей разрабатывалось с учетом конструктивных особенностей судов, используемых материалов и условий эксплуатации, характерных для зарубежного флота. Эти условия во многих случаях отличаются от практики эксплуатации отечественных судов, значительная часть которых имеет продолжительный срок службы и эксплуатируется в иных климатических и технологических условиях. В связи с этим применение зарубежных моделей при оценке технического состояния судовых конструкций требует их адаптации с учетом требований отечественной нормативной базы и особенностей эксплуатации российского флота.

Несмотря на значительное число исследований, посвященных оценке технического состояния корпуса судна, коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин чаще всего рассматриваются как самостоятельные процессы. Однако в процессе эксплуатации они оказывают взаимное влияние друг на друга. Так, уменьшение толщины элементов вследствие коррозии приводит к перераспределению напряжений, что способствует более интенсивному накоплению

усталостных повреждений и повышает вероятность образования и дальнейшего развития трещин. Поэтому раздельное применение существующих методов не всегда позволяет получить объективную оценку технического состояния корпуса и достаточно надежно прогнозировать его остаточный ресурс.

В связи с этим актуальной является разработка комплексного подхода, объединяющего результаты оценки коррозионного износа, напряженно-деформированного состояния, усталостных повреждений и трещинообразования в единую последовательность анализа технического состояния корпуса судна.

Целью настоящей работы является анализ основных процессов износа и повреждений корпуса судна, исследование их взаимного влияния, обзор применяемых методов моделирования и контроля, а также разработка последовательности комплексной оценки технического состояния корпусных конструкций, объединяющей существующие инженерные методы в единую методику.

1. Коррозия как фундаментальный процесс деградации

Коррозия является наиболее распространённым и во многих случаях определяющим фактором старения корпусных конструкций [3]. Морская вода представляет собой сложный электролит с высокой ионной проводимостью, содержащий хлориды, сульфаты, карбонаты, растворённый кислород и биогенные компоненты, что создаёт идеальные условия для протекания электрохимических процессов [3].

В зависимости от условий эксплуатации, конструктивных особенностей и наличия защитных покрытий выделяют несколько основных видов коррозии. В процессе эксплуатации судов наиболее распространённым видом повреждений является равномерный коррозионный износ, при котором толщина металла постепенно уменьшается по всей поверхности элемента. Он развивается преимущественно на участках с нарушенным защитным покрытием, в балластных танках и на днищевой обшивке [3]. Не меньшую опасность представляет язвенная коррозия, при которой разрушение металла носит локальный характер. Образующиеся язвы становятся концентраторами напряжений и ускоряют развитие усталостных повреждений. Наиболее часто такие дефекты выявляются в районе ватерлинии, скуловых поясах и на отдельных участках днища [3].

Коррозионное растрескивание под напряжением возникает при одновременном воздействии агрессивной среды и растягивающих напряжений. Наиболее подвержены ему высокопрочные стали и сварные соединения, содержащие остаточные сварочные напряжения [3]. Гальваническая (контактная) коррозия обусловлена образованием гальванических пар между разнородными металлами (например, стальной корпус и бронзовый гребной винт, алюминиевые надстройки и стальной корпус) при наличии электролита. Щелевая коррозия развивается в зазорах, под накладками, в соединениях внахлест, где затруднён доступ кислорода и происходит локальное изменение химического состава раствора.

Электрохимическая коррозия стали в морской воде описывается анодной реакцией растворения железа ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$) и катодной реакцией восстановления кислорода ($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$).

Суммарный процесс приводит к образованию продуктов коррозии (ржавчины), которые в зависимости от условий могут быть рыхлыми или плотными и существенно влиять на дальнейшую скорость разрушения [3].

Для описания коррозионного износа судовых конструкций в зарубежной практике часто используют модель Пайка [2], которая в общем виде представляет собой степенную зависимость:

$$d(t) = c1 \cdot (t - Tcl)^{c2} \quad (1)$$

где d(t) – глубина коррозии (мм);
t – время эксплуатации (годы);
T_cl – срок службы защитного покрытия (годы), в течение которого коррозия практически отсутствует; c_1 и c_2 – эмпирические коэффициенты, определяемые по статистическим данным для конкретного типа конструкции и условий эксплуатации [2].

В частном случае, когда показатель степени $c_2 = 1$, модель Пайка сводится к линейной зависимости, широко используемой в инженерной практике [3]:

$$\delta(t) = \delta_0 - k_\{corr\} \cdot t \quad (2)$$

где δ_0 – начальная толщина (мм);
k_corr – средняя скорость коррозии (мм/год).

Следует отметить, что модель Пайка [2] разработана для металлоконструкций с защитными покрытиями, включая оцинкованные. Для судов отечественного флота, эксплуатирующихся в течение длительного времени при частичной или полной утрате защитных покрытий, применение данной модели без корректировки может приводить к существенным погрешностям оценки коррозионного износа. Поэтому при расчётах технического состояния судовых конструкций необходимо учитывать фактические условия эксплуатации, результаты измерения остаточных толщин и данные периодических освидетельствований в соответствии с требованиями действующих нормативных документов и рекомендациями отечественных исследований.

В работах последних лет всё большее распространение получают гибридные модели, в которых базовый физический тренд комбинируется с поправками, прогнозируемыми методами машинного обучения [9]. Входными параметрами здесь выступают температура забортной воды, солёность (проводимость), скорость судна (влияющая на турбулентность и массоперенос), эффективность катодной защиты (ток, потенциал), географический регион плавания (тропики, умеренные широты, арктические воды), а также время года, определяющее сезонную активацию биопомех. Такой подход позволяет сохранить физическую интерпретируемость и одновременно достичь высокой точности прогноза.

2. Усталостные повреждения: от микропластичности до макроразрушения

Усталость металла — это накопление повреждений при циклическом изменении напряжений. В корпусных конструкциях основным источником циклических нагрузок является волновое воздействие, которое создаёт знакопеременные напряжения в элементах набора и обшивке [3].

Процесс усталостного разрушения традиционно подразделяют на три стадии [3, 8]. Первая стадия — накопление рассеянных микроповреждений, когда на микроуровне происходит локальная пластическая деформация в зонах структурной неоднородности (включения, границы зёрен), образование полос скольжения и зарождение микропор. Вторая стадия — зарождение макроскопической трещины, когда объединение микроповреждений приводит к образованию трещины; момент зарождения трудно фиксируется традиционными методами неразрушающего контроля. Третья стадия — распространение трещины, представляющее собой стабильный и ускоренный рост дефекта под действием циклических нагрузок, описываемый законами линейной механики разрушения; эта стадия завершается критическим ростом и разрушением конструкции.

Наиболее распространённым способом оценки накопления усталостных повреждений остаётся линейное правило Майнера [4], согласно которому суммарное повреждение определяется как отношение фактически реализованных циклов нагружения к числу циклов, вызывающих разрушение при соответствующем уровне напряжений:

$$D = \sum_i \frac{ni}{Ni} \quad (3)$$

где n_i – число циклов нагружения заданной амплитуды $\Delta\sigma_i$ (или σ_{ai});

N_i – долговечность материала при этой амплитуде, определяемая по кривым усталости (S-N кривой);

D – накопленное повреждение, причём разрушение предполагается при D = 1 [3, 4].

Широкое применение правила Майнера объясняется простотой расчётов и наличием экспериментальных данных по усталостной долговечности различных сталей и сварных соединений. Вместе с тем данный подход основан на линейном суммировании повреждений и поэтому не учитывает влияние последовательности нагружения, изменения характера циклов, воздействия коррозионной среды и особенностей развития трещин [3, 8].

Для описания более сложных режимов нагружения используются нелинейные модели, включая правило Кортен-Долана [5]:

$$D = \sum \frac{ni}{Ni} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma i}{\Delta\sigma max}\right)^d \quad (4)$$

а также методы, учитывающие историю изменения напряжений и последовательность циклов [8].

В условиях эксплуатации судна напряжения изменяются неравномерно под действием волнения, вибрации корпуса, работы движительной установки и других эксплуатационных факторов. Поэтому перед расчётом накопленного повреждения экспериментальные данные проходят предварительную обработку: выполняются фильтрация сигналов, выделение циклов нагружения (например, методом «дождя» — rainflow) и их последующая классификация по уровню напряжений.

В последние годы всё более активно исследуются методы машинного обучения для прогнозирования усталостного состояния конструкций. В частности, сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) способны анализировать временные последовательности напряжений и учитывать зависимость текущего состояния конструкции от предшествующей истории нагружения, что расширяет возможности прогнозирования остаточного ресурса по сравнению с традиционными линейными моделями [2, 9].

3. Трещинообразование: механика разрушения и методы обнаружения

Трещины — наиболее опасный вид дефектов: они могут развиваться быстро, часто без видимых признаков, и приводить к внезапному разрушению [2, 3]. Для описания напряжённо-деформированного состояния в окрестности трещины в рамках линейно-упругой механики разрушения используется коэффициент интенсивности напряжений K. В зависимости от типа нагружения различают K_I при нормальном отрыве (растяжении), K_{II} при поперечном сдвиге и K_{III} при антиплоском сдвиге. Критическое значение K_{Ic}, называемое вязкостью разрушения, характеризует сопротивление материала распространению трещины [8].

Рост трещины под действием циклических нагрузок описывается уравнением Пэриса (Paris).

Согласно современному учебнику по механике разрушения [6], это уравнение имеет вид:

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)\hat{}m \quad (5)$$

где a – длина трещины;
N – число циклов нагружения;
ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений;
C и m – эмпирические константы, зависящие от материала и среды [6, 8].

В коррозионной среде наблюдается снижение порогового значения ΔK_{th}, при котором трещина начинает расти, и увеличение константы C, что приводит к ускоренному росту и проявлению коррозионно-усталостного разрушения [3].

Для обнаружения трещин в судовых конструкциях применяется комплекс методов неразрушающего контроля. Визуальный и измерительный контроль остаётся наиболее доступным, но позволяет выявить только макроскопические трещины, уже вышедшие на поверхность. Ультразвуковой контроль чувствителен к внутренним дефектам, однако требует непосредственного доступа к поверхности и высокой квалификации оператора. Магнитопорошковый и капиллярный методы эффективны для выявления поверхностных трещин в ферромагнитных и неферромагнитных материалах соответственно [3]. Наиболее перспективным методом для раннего обнаружения зарождающихся трещин является акустическая эмиссия (АЭ), принцип которой основан на регистрации упругих волн, генерируемых при пластической деформации, раскрытии трещины и трении её берегов.

Применение метода акустической эмиссии на судах осложняется высоким уровнем шумов, возникающих под воздействием гидродинамических процессов, работы судовых механизмов и волнения. Для повышения достоверности обнаружения дефектов всё чаще используются методы интеллектуальной обработки сигналов, в том числе автоэнкодеры — нейронные сети, обучаемые на данных, соответствующих исправному состоянию конструкции [9].

В процессе обучения автоэнкодер формирует модель нормального сигнала и в дальнейшем оценивает степень отклонения поступающих данных от этого состояния. Появление аномальных сигналов, связанных с развитием трещин или других дефектов, сопровождается увеличением ошибки восстановления, что позволяет использовать её в качестве диагностического признака. Такой подход не требует предварительной разметки данных и обеспечивает эффективное обнаружение дефектов даже в условиях значительного уровня шумов [9].

4. Совместное влияние процессов износа корпуса судна

Особенностью процессов износа корпуса судна является их взаимное влияние [3]. На практике коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин протекают одновременно, поэтому их раздельный анализ не всегда позволяет объективно оценить техническое состояние конструкции и остаточный ресурс. Развитие одного вида повреждений может изменять условия возникновения и интенсивность других процессов, что необходимо учитывать при комплексной оценке состояния корпуса судна [1, 9].

Коррозия влияет на усталостное разрушение по нескольким механизмам [3, 8]. Во-первых, геометрический фактор: уменьшение толщины листа и образование язв приводит к увеличению номинальных напряжений и созданию локальных концентраторов. Во-вторых, коррозионная среда снижает предел выносливости стали по сравнению с воздушной средой, что проявляется в явлении коррозионной усталости. В-третьих, происходит изменение механизмов разрушения: в коррозионной среде усталостное разрушение наступает при меньших амплитудах напряжений, а область малоцикловой усталости расширяется [9]. По данным

экспериментальных исследований совместное действие коррозии и циклических нагрузок приводит к существенному сокращению долговечности по сравнению с изолированным воздействием каждого фактора.

В свою очередь, циклическое нагружение способствует развитию коррозии [3]. Оно приводит к разрушению защитных покрытий и оксидных плёнок в зонах пластической деформации, обнажению свежих поверхностей металла, более активных в электрохимическом отношении, созданию условий для застойных зон электролита в микротрещинах и углублениях, а также снижению эффективности катодной защиты из-за циклического изменения поляризации. В результате усталостно-коррозионное воздействие формирует более глубокую и разветвлённую локальную коррозию, чем в отсутствие циклических нагрузок [3].

Коррозионная среда оказывает значительное влияние и на кинетику роста трещин [2, 3]. Под её действием снижается пороговое значение ΔK_{th}, при котором трещина начинает расти, увеличивается константа C в уравнении Пэриса, наблюдается эффект коррозионно-усталостного разрушения, особенно выраженный при низких частотах нагружения (характерных для волновых нагрузок), а также возможно развитие статического коррозионного растрескивания при наличии постоянных растягивающих напряжений [3]. В зонах сварных соединений, где имеются остаточные напряжения и структурная неоднородность, скорость роста трещин может быть на порядок выше, чем в основном металле [3].

Для концептуального описания совместного влияния процессов может использоваться представление, в которой общее повреждение D_total представляется как сумма или комбинация повреждений от отдельных факторов с учётом перекрёстных членов:

$$D_{total} = D_{corr} + D_{fat} + D_{crack} + I_{corr-fat} + I_{fat-corr} + I_{corr-crack} \quad (6)$$

где I_{ij} – интегральные члены, описывающие усиление одного процесса другим.

Такое представление позволяет учесть синергетические эффекты, которые в линейных подходах остаются за рамками анализа.

Для комплексной оценки технического состояния могут применяться вероятностные модели, в частности модель пропорциональных рисков Кокса [7], позволяющая оценить вероятность отказа с учетом совокупности факторов:

$$h(t) = h_0(t) \cdot exp(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_n x_n) \quad (7)$$

где $h_0(t)$ – базовый риск отказа;

x_i – параметры, характеризующие техническое состояние конструкции и условия эксплуатации;

β_i – коэффициенты модели, определяемые по статистическим данным.

Преимущество данного подхода заключается в возможности одновременно учитывать влияние нескольких факторов, включая коррозионный износ, накопленные усталостные повреждения и наличие трещин. Это позволяет использовать модель для оценки риска отказа и прогнозирования остаточного ресурса судовых конструкций, что представляет интерес для систем обслуживания по техническому состоянию [1, 10].

Методика комплексной оценки технического состояния корпуса судна с учётом совместного влияния процессов износа

В практике технической эксплуатации судов состояние корпусных конструкций обычно оценивают по отдельным видам повреждений [10, 14, 15]. Коррозионный износ определяют по результатам измерения остаточных толщин, усталостное состояние — расчётными методами или по данным эксплуатации, а наличие трещин устанавливают средствами неразрушающего контроля. При этом в отечественных

исследованиях особое внимание уделяется выбору контролируемых элементов корпуса, определению объёма измерений и организации дефектационных работ [14].

Несмотря на широкое применение этих методов, чаще всего они используются независимо друг от друга. Между тем в процессе эксплуатации коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин взаимосвязаны. Уменьшение толщины элементов приводит к росту рабочих напряжений, повышение напряжений ускоряет накопление усталостных повреждений, а локальные очаги коррозии становятся концентраторами напряжений и способствуют зарождению трещин.

После появления трещины напряжённое состояние конструкции изменяется вновь, что ускоряет её дальнейшее развитие. Одновременно агрессивная среда, проникая в полость трещины, способствует локальному коррозионному износу. Таким образом, изменение технического состояния корпуса представляет собой последовательность взаимосвязанных процессов, каждый из которых влияет на последующие стадии повреждения конструкции.

С учётом этой взаимосвязи оценку технического состояния целесообразно выполнять последовательно, используя результаты каждого этапа как исходные данные для следующего. Такой подход не изменяет существующие расчётные модели, а объединяет их в единую схему анализа технического состояния корпуса судна.

Предлагаемая методика включает пять взаимосвязанных этапов.

На первом этапе анализируется коррозионный износ корпусных конструкций. Основанием служат результаты очередного освидетельствования судна и измерений остаточных толщин. По полученным данным оценивается фактическое состояние элементов корпуса, выявляются зоны общего и локального износа, а также определяется состояние защитных покрытий и соответствие конструкций требованиям Правил Российского морского регистра судоходства (РМРС) [10]. При необходимости дальнейшее изменение толщины элементов может быть спрогнозировано с использованием модели, рассмотренной в разделе 1.

Далее полученные значения остаточных толщин используются при расчёте напряжённого состояния конструкции. Уменьшение площади поперечного сечения приводит к увеличению рабочих напряжений, поэтому фактическое состояние корпуса должно учитываться при последующей оценке его долговечности. Расчёты выполняются по действующим нормативным документам и общепринятым методикам расчёта прочности судовых конструкций.

Следующий этап связан с оценкой накопленного усталостного повреждения. Для расчёта используются результаты определения напряжённого состояния и сведения об условиях эксплуатации судна. В качестве базового подхода применяется правило линейного суммирования повреждений Майнера [4] (формула 3), а при наличии информации об изменении нагрузок могут использоваться нелинейные модели накопления повреждений [5]. Это позволяет определить степень использования усталостного ресурса рассматриваемых элементов корпуса.

После оценки усталостного состояния выполняется анализ выявленных трещин. Для этого используются результаты визуального и инструментального неразрушающего контроля, по которым определяются размеры, расположение и характер дефектов. Их дальнейшее развитие оценивается методами механики разрушения, включая закон Пэриса [6] (формула 5), что позволяет прогнозировать скорость роста трещин и вероятность достижения ими предельных размеров в течение заданного периода эксплуатации.

На заключительном этапе результаты предыдущих расчётов рассматриваются совместно. Остаточная толщина элементов используется при определении напряжённого состояния, рассчитанные напряжения служат исходными данными для оценки усталостного повреждения, а результаты усталостного анализа и неразрушающего контроля учитываются при прогнозировании развития трещин.

Последовательная передача результатов между этапами обеспечивает комплексную оценку технического состояния корпуса без изменения физических предпосылок применяемых расчётных моделей.

На основе совокупности полученных результатов принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции, необходимости ремонта, усиления или корректировки межремонтного периода с учётом требований нормативных документов, результатов технического освидетельствования и расчётной оценки остаточного ресурса.

Предлагаемая методика не заменяет существующие методы оценки коррозионного износа, расчёта прочности или механики разрушения. Её основная задача состоит в последовательном объединении этих подходов в рамках единой схемы оценки технического состояния корпуса судна. При этом результаты каждого этапа используются на последующих этапах расчёта, что позволяет учитывать взаимное влияние процессов износа без изменения применяемых расчётных моделей.

Практическая реализация методики возможна в составе современных систем технического наблюдения за корпусом судна [9]. В этом случае результаты периодических освидетельствований, измерений остаточных толщин [12], данные о режимах эксплуатации [13], материалы неразрушающего контроля и расчётные модели рассматриваются как единая информационная база. Их совместный анализ позволяет более обоснованно оценивать техническое состояние корпусных конструкций, прогнозировать остаточный ресурс и принимать решения о ремонте или дальнейшей эксплуатации судна [10].

На рисунке 1 показана схема комплексной оценки технического состояния корпуса судна. В её основе лежит последовательное использование результатов каждого этапа расчёта при выполнении последующих. Это позволяет учитывать взаимное влияние коррозионного износа, усталостных повреждений и развития трещин при прогнозировании остаточного ресурса корпусных конструкций.

5. Методы мониторинга и переход к предиктивному обслуживанию

Сегодня на флоте техническое обслуживание построено либо по расписанию — когда судно ставят в док строго по графику, — либо по факту: случилась поломка — устранили [1]. Ни тот, ни другой подход не учитывают, как на самом деле изнашивается корпус. А значит, нельзя понять, сколько он ещё прослужит, что создаёт предпосылки для необоснованных затрат, так и для рисков аварийности.

Чтобы постоянно следить за состоянием корпуса в эксплуатации, используют целый набор инструментов [9]. Это и тензометрия — датчики, которые замеряют деформации и напряжения в самых ответственных местах: на днище, скуле, палубе, сварных швах. Всё чаще вместо обычных датчиков ставят волоконно-оптические — они не боятся ни коррозии, ни помех. Плюс электрохимические датчики, которые прямо на ходу показывают, с какой скоростью идёт коррозия. Ещё — системы акустической эмиссии: они слушают, не появилась ли где-то микротрещина, и сами определяют, откуда идёт сигнал. Отдельно — контроль катодной защиты по току и потенциалу, чтобы понимать, работает ли она как надо. И наконец — дроны и подводные роботы (ROV), которые залезают в самые труднодоступные места и всё осматривают.

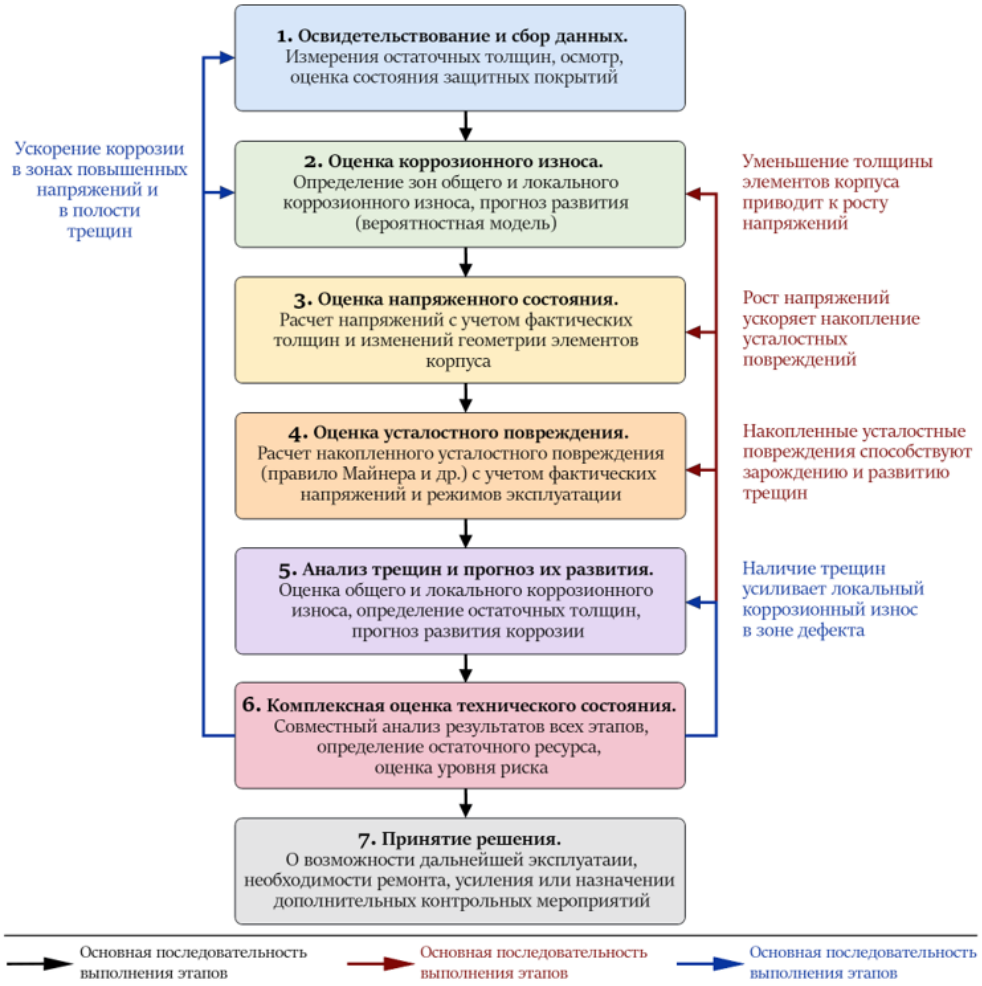


Рис. 1. Алгоритм комплексной оценки технического состояния корпуса судна с учётом совместного влияния процессов износа

Переход на обслуживание по фактическому состоянию — это не просто смена графика. Это целая система: непрерывный сбор данных с датчиков, их обработка, анализ с помощью гибридных моделей искусственного интеллекта, которые совмещают классическую физику и машинное обучение [2, 9]. На основе этих расчётов оценивается риск отказа — с учётом коррозии, усталости, трещин. И выдаются рекомендации по ремонту: экономически обоснованные, привязанные к реальному состоянию судна [1]. Главный результат — вместо плановых докований по графику ремонты проводят тогда, когда они действительно нужны [9].

Переход на обслуживание по фактическому состоянию даёт реальные плоды — эксплуатационные расходы снижаются, внеплановых ремонтов становится меньше, а техника оказывается в большей готовности [9]. Но цифры, конечно, зависят от конкретного судна, от того, какие датчики и системы на нём стоят, и в каких условиях оно работает.

Всё это работает на единой платформе — цифровой модели корпуса, которая постоянно обновляется и живёт в режиме реального времени [9]. Она объединяет геометрию, прочность, технологию, данные с датчиков, расчёты напряжённо-деформированного состояния с учётом актуальных нагрузок и модели износа, которые учитывают совместное влияние разных процессов. На основе такого

объединения обеспечивается прогнозирование остаточной долговечности и визуализация состояния. Создание цифровой модели требует решения комплекса задач: разработки методов калибровки моделей по данным мониторинга, создания высокопроизводительных вычислительных модулей для расчётов в реальном времени, обеспечения кибербезопасности и защиты данных, а также стандартизации форматов обмена информацией между судном и береговыми центрами.

6. Требования Российского морского регистра судоходства (РМРС) к оценке дефектов

В Российской Федерации надзор за техническим состоянием судов осуществляет Российский морской регистр судоходства (РМРС). В соответствии со Стандартными правилами классификации и постройки морских судов РМРС (2026) расчёт степени коррозионного износа и усталостных трещин проводится по результатам периодических проверок по методике «максимальный износ» (сравнение реальной толщины с предельно допустимой) [10]. Действующие Правила РМРС ориентированы преимущественно на оценку фактического технического состояния конструкций по результатам освидетельствований, дефектации и измерения остаточных толщин элементов корпуса.

Некоторые классификационные общества в своих руководствах заявляют о поддержке систем мониторинга на основе обслуживания по фактическому состоянию. Однако детальных алгоритмов, как объединять и интерпретировать данные по коррозии, усталости и трещинам, они не дают. На практике это выливается в проблему: существующие стандарты писаны под традиционные подходы и плохо стыкуются с новыми технологиями. Переход на СВМ тормозится именно из-за этой неопределённости.

Заключение

Проведённый анализ показал, что коррозионный износ, усталостные повреждения и развитие трещин представляют собой взаимосвязанные процессы, совместно определяющие изменение технического состояния корпусных конструкций в процессе эксплуатации. Их раздельная оценка не всегда позволяет в полной мере учитывать взаимное влияние повреждений при прогнозировании остаточного ресурса и выборе эксплуатационных решений.

В работе рассмотрены основные механизмы износа корпусных конструкций и выполнен анализ методов оценки коррозионного состояния, накопления усталостных повреждений и развития трещин. Предложена последовательность комплексной оценки технического состояния, основанная на использовании результатов каждого этапа расчёта в качестве исходных данных для последующего анализа. Такой подход объединяет существующие инженерные методы в единую схему без изменения физических предпосылок применяемых расчётных моделей.

Практическая ценность предложенной методики заключается в возможности её применения при технических освидетельствованиях судов, оценке остаточного ресурса и планировании ремонтных мероприятий. Комплексный анализ состояния корпусных конструкций позволяет более обоснованно оценивать степень их износа и принимать решения о дальнейшей эксплуатации, ремонте или усилении отдельных элементов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на проверку предложенной методики по данным эксплуатации судов различных типов, уточнение закономерностей совместного развития коррозионного износа и усталостных повреждений, а также разработку рекомендаций по её практическому применению в системах технического наблюдения и при выполнении требований классификационных обществ.

Список литературы

1. Guedes Soares C., Garbatov Y. Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion and fatigue // Structural Safety. – 1999. – Vol. 21, No. 2. – P. 107–123.
2. Paik J.K. Ultimate Limit State Analysis and Design of Plated Structures. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2018. – 664 p.
3. Melchers R.E. Probabilistic Models for Corrosion in Structural Reliability Assessment // Corrosion Science. – 2005. – Vol. 47, No. 10. – P. 2391–2410.
4. Dowling N.E. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. – 4th ed. Pearson, 2013. – 960 p.
5. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // International Journal of Fatigue. – 1998. – Vol. 20, No. 1. – P. 9–34.
6. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 753 p.
7. Cox D.R. Regression Models and Life-Tables // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. – 1972. – Vol. 34, No. 2. – P. 187–220.
8. Cui W. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metal Structures // Journal of Marine Science and Technology. – 2002. – Vol. 7, No. 1. – P. 43–56.
9. Zio E. Prognostics and Health Management of Industrial Assets: A Review // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 221. – Article 108321.
10. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – Санкт-Петербург : РМРС, 2026.
11. Барышников С.О., Погодаев Л.И., Чистов В.Б. Надежность механизмов и корпусов судов: монография. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. – 251 с.
12. Барышников С.О., Красюк А.Б., Чистов В.Б. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 1. – С. 85–95.
13. Ганнесен В.В., Петрова Е.Е. К вопросу деградации корпуса судна в результате коррозии // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2023. – Т. 66. – № 4. – С. 144–152.
14. Бимберекov П.А. Определение потребного числа измерений остаточных толщин на участке элемента связи корпуса судна на основе оценочных зависимостей для запаса толщин и рекомендуемых скоростей изнашивания // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 76–80.
15. Казанцев Д.А., Бурмистров Е.Г., Зинченко Д.Ф. Подготовка данных для выявления причин отказов корпусов судов и судовых технических средств // Научные проблемы водного транспорта / Russian Journal of Water Transport. – 2024. – № 80 (3). – С. 15–23.

References

1. Guedes Soares C., Garbatov Y. Reliability of maintained ship hulls subjected to corrosion and fatigue // Structural Safety. – 1999. – Vol. 21, No. 2. – P. 107–123.
2. Paik J.K. Ultimate Limit State Analysis and Design of Plated Structures. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2018. – 664 p.
3. Melchers R.E. Probabilistic Models for Corrosion in Structural Reliability Assessment // Corrosion Science. – 2005. – Vol. 47, No. 10. – P. 2391–2410.
4. Dowling N.E. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. – 4th ed. – Boston : Pearson, 2013. – 960 p.
5. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // International Journal of Fatigue. – 1998. – Vol. 20, No. 1. – P. 9–34.
6. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 753 p.
7. Cox D.R. Regression Models and Life-Tables // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. – 1972. – Vol. 34, No. 2. – P. 187–220.
8. Cui W. A State-of-the-Art Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metal Structures // Journal of Marine Science and Technology. – 2002. – Vol. 7, No. 1. – P. 43–56.
9. Zio E. Prognostics and Health Management of Industrial Assets: A Review // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 221. – Article 108321.

10. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. – St. Petersburg: RMRS, 2026.
11. Baryshnikov S.O., Pogodaev L.I., Chistov V.B. Reliability of Mechanisms and Ship Hulls: monograph. – St. Petersburg: Publishing House of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov, 2018. – 251 p.
12. Baryshnikov S.O., Krasiuk A.B., Chistov V.B. A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation. – 2020. – Vol. 12. – No. 1. – P. 85–95.
13. Gannesen V.V., Petrova E.E. On the issue of degradation of the ship hull as a result of corrosion // Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. – 2023. – Vol. 66. – No. 4. – P. 144–152.
14. Bimberekov P.A. Determination of the required number of measurements of residual thicknesses on the section of the ship hull structural element based on estimation dependencies for thickness allowance and recommended wear rates // Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East. – 2015. – No. 1. – P. 76–80.
15. Kazantsev D.A., Burmistrov E.G., Zinchenko D.F. Preparation of data to identify the causes of failures of ship hulls and ship technical equipment // Scientific Problems of Water Transport / Russian Journal of Water Transport. – 2024. – No. 80 (3). – P. 15–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Трочук Антон Алексеевич, аспирант кафедры судостроение и энергетические комплексы морской техники, Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: trochuk19@gmail.com.

Anton A. Trochuk , Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Energy Complexes of Marine Engineering, Astrakhan State Technical University (FSBEI HE «ASTU»), 16 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, e-mail: trochuk19@gmail.com.

Рубан Анатолий Рашидович, к.т.н., доцент, директор института морских технологий, энергетики и транспорта, Астраханский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «АГТУ»), 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: a.ruban1974@mail.ru.

Anatoly R. Ruban , Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, Director of the Institute of Marine Technology, Energy and Transport, Astrakhan State Technical University (FSBEI HE «ASTU»), 16 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, e-mail: a.ruban1974@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 21.05.2026; published online 20.09.2026.