

УДК 621.59:620.179.1

Интегрированная система оценки технического состояния криогенного оборудования на основе динамической цифровой модели

Воронов Владимир Александрович^(*)

voronov_va@voenmeh.ru

SPIN-код: 2862-6609

Рыбин Олег Александрович

SPIN-код: 9877-9784

Сясько Владимир Александрович

oleg_rybin65@mail.ru

SPIN-код: 6491-9856

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Константа», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлена методика мониторинга технического состояния конструкций с высокой величиной критических отказов, таких как криогенное оборудование (КО) опасных производственных объектов (ОПО), где очень важно актуальное получение прямой меры оценки состояния повреждения металла, а также отслеживание технического состояния и ресурса во времени – на этапах жизненного цикла. Прямая оценка повреждений и деформаций материала достигается через сочетание методов неразрушающего контроля и структурного анализа, определяющих физические изменения, такие как пластические деформации и коррозия. Система призвана показать возможность и преимущества мониторинга технического состояния и ресурса КО на стадиях жизненного цикла.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния, остаточный ресурс, математическая модель, цифровой двойник, диагностика, прочностной расчет, этапы жизненного цикла, паспорт опасного производственного объекта.

Введение. Оценка состояния повреждения материалов КО остается одной из ключевых проблем современной науки и техники [1,2]. Решение этой задачи связано с необходимостью объединения усилий инженеров, физиков, химиков и материаловедов для создания надежных и эффективных решений. Несмотря на имеющиеся трудности, дальнейшие технологические прорывы обещают значительное улучшение качества диагностики и повышение надежности оборудования, работающего в экстремально холодных условиях [3]. Для точной оценки возможности перехода в любое из возможных предельных состояний необходима достоверная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС). Если измерения напряжения металла будут выполнены после проведения производственных, транспортировочных и строительно-монтажных работ, то точность оценки НДС будет не достоверной, так как не будет учтена накопленная деформация металла на этапе производства, транспортирования и монтажа [4]. Одним из направлений развития системы обеспечения надежности и безопасности КО является внедрение системы мониторинга технического состояния и остаточного ресурса на стадиях жизненного цикла.

Методика мониторинга. Основу система оценки технического состояния криогенного оборудования и системы динамической оценки технического состояния, расчетов остаточной прочности и остаточного ресурса объекта составляет его математическая модель (цифровой двойник), которая реализуется путем решения системы уравнений, описывающих связь конструктивно-технологического исполнения оборудования и параметров, определяемых измерительными подсистемами состояний. Методика мониторинга технического состояния криогенного оборудования на стадиях жизненного цикла, положенная в основу исследования, заключается в том, что на этапе жизненного цикла ОПО «проектирование» формируют математическую модель (ММ) обеспечения надежности и безопасности ОПО на основании исходных данных из технического задания к проекту, специальных технических условий, нормативных документов, предъявляющих требования к ОПО. Модель ММ включает в себя требования к материалам и комплектующим для производства ОПО, методологии изготовления ОПО, монтажным (пусконаладочным) работам, транспортированию, вводу в эксплуатацию, режимам эксплуатации, выводу из эксплуатации. Далее, осуществляют оценку рассчитанных показателей надежности и безопасности ОПО, сравнение их с заданными в модели ММ и на основе сравнительного анализа осуществляют выбор наиболее эффективного технического решения. При этом если значения показателей надежности и безопасности ОПО не соответствуют установленным, то подбор альтернативных технических решений осуществляют повторно до достижения установленных значений упомянутых показателей и принимают скорректированную математическую модель ОПО ММ-1 «как спроектировано». На основании принятой ММ-1 корректируют модель ММ и разрабатывают электронный паспорт ОПО, который содержит сведения о допустимых значениях надежности и безопасности ОПО.

На этапе жизненного цикла ОПО «производство» на основании скорректированной на предыдущем этапе модели ММ-1 создают физическую модель (ФМ) ОПО из этих материалов и комплектующих, выбранными вариантами изготовления, проводят испытания этой ФМ с целью получения значений показателей надежности и безопасности, зависящих от свойств и характеристик отобранных материалов, воздействующих на них нагрузок с учетом заданных на этапе «проектирования» геометрических параметров ОПО, технологий производства, эксплуатационных условий и аномалий, характерных для условий и режимов эксплуатации ОПО. Значения показателей ФМ получают с помощью датчиков и исполнительных устройств, аналогичных по своим функциям датчикам и устройствам, применяемых на реальном ОПО на его этапах жизненного цикла «транспортирование», «эксплуатация», «вывод из эксплуатации», «ввод в эксплуатацию». Принимают модель ОПО ММ-2 «как произведено» с выбранными оптимальными материалами и технологией изготовления ОПО, которая будет сопровождать ОПО на следующих этапах жизненного цикла. Корректируют электронный паспорт ОПО на основании скорректированной модели ММ.

На этапе жизненного цикла ОПО «*транспортирование*» определяют возможные способы погрузки/разгрузки, строповки, транспортировки, изготовленных на этапе «производство» ОПО и/или его элементов с учетом их геометрических размеров, требований к их транспортированию и осуществляют моделирование этих способов в части возмущающих воздействий и деформаций ОПО и/или его элементов. По результатам моделирования получают значения показателей надежности и безопасности ОПО. При достижении показателей требуемым принимают на этом этапе модель ММ-3 «как доставлено» с выбранным оптимальным способом транспортирования и корректируют модель ММ. Корректируют электронный паспорт ОПО на основании скорректированной модели ММ.

На этапе жизненного цикла ОПО «*эксплуатация*» в режиме реального времени осуществляют сбор и обработку информации о показателях надежности и безопасности ОПО, техническом состоянии ОПО и/или его элементов, параметрах технологического процесса, авариях и инцидентах. Если показатели надежности и безопасности не соответствуют требуемым, то определяют возможные варианты режимов эксплуатации ОПО, технологических процессов, протекающих с использованием ОПО и т. д., осуществляют моделирование этих вариантов. Если полученные значения показателей надежности и безопасности ОПО не соответствуют требуемым, то осуществляют выработку альтернативных режимов работы, параметров технологических процессов и т. д. При достижении показателей требуемым принимают на этом этапе модель ММ-4 «как эксплуатируется» и корректируют модель ММ. Корректируют электронный паспорт ОПО на основании скорректированной модели ММ.

На этапе жизненного цикла ОПО «*вывод из эксплуатации*» при консервации или утилизации ОПО определяют возможные способы вывода ОПО из эксплуатации, которые могут включать режимы по остановке работы ОПО, параметры завершающих технологических процессов, консервации, демонтажу ОПО для утилизации и т. д., и осуществляют моделирование этих способов. По результатам моделирования получают значения показателей надежности и безопасности ОПО, которые сравнивают с установленными в модели ММ по результатам корректировки ее на предыдущем этапе, при этом если полученные значения показателей надежности и безопасности ОПО не соответствуют установленным, то осуществляют выбор альтернативных способов вывода ОПО из эксплуатации, моделирование этих способов и определяют новые значения показателей надежности и безопасности ОПО в циклическом режиме до достижения упомянутых показателей требованиям и допускам, указанным в модели ММ. При достижении показателей надежности и безопасности установленным принимают на этом этапе модель ММ-5 «как выведено из эксплуатации» с выбранным оптимальным способом вывода из эксплуатации и корректируют модель ММ. Корректируют электронный паспорт ОПО на основании скорректированной модели ММ.

Заключение. Интегрированная система оценки технического состояния криогенного оборудования и методика демонстрирует переход от статиче-

ской отчетной оценки технического состояния к цифровой динамической модели комплексного мониторинга, обеспечивающей накопление инженерных знаний об ОПО, повышение воспроизводимости решений и создание основы для дальнейшего развития интеллектуальных методов технической диагностики и анализа технического состояния ОПО.

Список источников

- [1] ГОСТ 9.021–74. *Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию.* Москва, Стандартинформ, 1974, 4 с.
- [2] Курс М.Г., Гончаров А.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 2. Коррозионное растрескивание под напряжением. *Вопросы материаловедения*, 2019, № 1 (97), с. 175–187.
- [3] *О промышленной безопасности опасных производственных объектов.* Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 08.08.2024). URL: https://www.dporss.ru/upload/files/doc/dpo/FZ_ot_21.07.1997_N_116_FZ_red_ot_08.08.2024.pdf (дата обращения 20.01.2026).
- [4] *О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением.* Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 032/2013. URL: http://cntr.gosnadzor.ru/activity/control/Prom_bezop/npa-prom-bez/Технический%20регламент%20ТС.pdf (дата обращения 20.01.2026).