

УДК 539.4:621.59

Проблема исчерпания ресурса криогенных объектов

*Д-р техн. наук Ю.П. СОЛНЦЕВ, д-р техн. наук Б.С. ЕРМАКОВ, канд. техн. наук С.А. ВОЛОГЖАНИНА,
канд. техн. наук Т.В. ЕРМАКОВА, Н.В. КРУТИКОВ*

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

The aging of the stock of equipment, including the cryogenic one, connected with the exhaust of its operating life, makes a challenge of searching for the possibility of prolongation of its operation beyond the calculated service period. For this purpose it is necessary to develop a scientifically based technique of the control of actual condition of the equipment instead of its evaluation according to weighted average mechanical characteristics, that doesn't consider peculiar features of operation, influence of the repairs carried out and modernization, and peculiarities of materials properties alteration at low temperatures.

Проблемы промышленной безопасности, охраны труда, снижения аварийности и травмоопасности производства особо остро встали в последнее десятилетие [2, 10]. Это связано с резким старением парка оборудования, отсутствием его плановых реноваций, повторным введением отдельных агрегатов и производств в целом в эксплуатацию после длительных, иногда многолетних простоев [13, 14].

По данным [10], до 75 – 80 % парка основных производственных средств в Российской Федерации уже исчерпали расчетный срок службы или приблизились к его завершению. Это привело к снижению надежности и повышению аварийности на производстве, росту числа аварий с тяжелыми последствиями, в частности с человеческими жертвами. Такая ситуация не могла не привлечь внимания правительства, и в 1997 г. был принят Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», регламентирующий новые подходы к вопросам безопасной эксплуатации и сроков службы оборудования опасных производств. С 1997 г. начинается пересмотр всей нормативно-технической документации по вопросам безопасности и охраны труда на опасных производствах. Россия принимает на себя обязательство привести все системы промышленной безопасности в соответствие с международными нормативами, перечисленными в стандарте ИСО 9001.

Тем не менее на предприятиях опасных производств Северо-Западного федерального округа, по данным главной государственной инспекции по охране труда, за период с 1999 по 2003 г. число аварий превысило 9000, при этом погибли 340 человек и еще 963 получили ин-

валидность или профессиональные заболевания. В целом по стране число аварий в промышленности в 2001 г. выросло по сравнению с 1999 г. более чем в полтора раза, причем около 70 % всех аварий совершаются по вине изношенного оборудования, снижения надежности и работоспособности материалов, применяемых при его изготовлении. Это потребовало разработки принципиально новых подходов к вопросам контроля металла оборудования, переосмысливания широко известных классических работ по вопросам металловедения углеродистых и легированных сталей с учетом особенностей их эксплуатации в 90-е годы 20-го века и в настоящее время [13, 1 и др.], позволяющих повысить надежность низкотемпературного оборудования.

Проблема продления ресурса криогенных систем является одной из наиболее важных задач криогенного металловедения и в настоящее время затрагивает целый ряд отраслей оборонной и гражданской направленности: это ракетные космические стартовые системы, криоэнергетика, прецизионная техника и техника физики высоких энергий, системы по очистке и сжижению газов. В гражданских отраслях именно системы очистки и сжижения газов являются наиболее крупными и дорогостоящими технологическими объектами, замена которых потребовала бы многомиллионных капиталовложений [2, 6, 10, 11].

Несмотря на различные назначение и условия эксплуатации, большую часть вспомогательного оборудования криогенных установок изготавливали из низкоуглеродистых сталей, а основного – из крайне ограниченного спектра материалов, основную долю которых составляли стабильные аустенитные стали (САС) на базе

Cr-Ni и Cr-Ni-Mn композиций. Применение САС в криогеннике было обусловлено, с одной стороны, изученностью поведения этих материалов в области температур 77...293 К, высокой стабильностью их структуры и эксплуатационной надежностью в этом температурном диапазоне (это позволило при минимизации объема дополнительных исследований рекомендовать их в качестве материалов для техники жидкого водорода и гелия с температурой 20 и 4,2 К соответственно); с другой стороны, отсутствие опыта эксплуатации такого оборудования не позволило четко сформулировать необходимые требования к стальям и сплавам криогенного назначения, что значительно тормозило разработку специальных материалов.

Научно-технический прогресс низкотемпературного машиностроения в XXI в. невозможен без решения проблемы разработки новых, более совершенных материалов для вновь создаваемого криогенного оборудования и увеличения ресурса, эксплуатационной надежности и безопасности эксплуатации материалов существующих машин и механизмов низкотемпературного назначения. Необходима разработка научно обоснованной методики контроля фактического состояния криогенного оборудования и оценки возможности его эксплуатации за пределами расчетного срока службы.

Решение этой проблемы усложняется как относительной молодостью отрасли и связанным с этим отсутствием практического опыта эксплуатации агрегатов, отработавших расчетный ресурс, так и крайне различающимися условиями эксплуатации и назначением оборудования. До настоящего времени не удалось создать достоверную базу данных об изменениях, протекающих в материалах криогенной техники в ходе длительной эксплуатации при 4,2...20,4 К, и определить влияние различных эксплуатационных технологических факторов на эти процессы.

Существующие методы прогнозирования основываются в основном на прочностных расчетах, исходные данные для которых выбирают методом экстраполяции изменений исходных свойств материалов в зависимости от срока их службы [8, 11]. При этом в ходе экстраполяции вводится допущение о неизменности фазового состава материала в течение всего срока службы и плавного, монотонного изменения его механических свойств при понижении температуры. Такие допущения совершенно справедливы для температурного диапазона 77...293 К, однако при более низких температурах их правомерность достаточно спорна. В обла-

сти ниже 77 К в структуре даже хорошо известных хромоникелевых сталей возможны превращения, приводящие к резкому аномальному изменению их механических свойств. Так, изменение механических свойств и магнитной проницаемости стали 12Х18Н12Т в диапазоне температур 293...4,2 К связано с так называемыми фазовыми превращениями II рода (фазовыми магнитными превращениями [5, 9]). Однако в случае хромоникелевых сталей изменение свойств при фазовых магнитных превращениях относительно невелико, и при усредненных расчетах запасов прочности, пластичности и вязкости материалов оборудования может быть учтено путем повышения коэффициентов запаса. В тех случаях, когда с целью экономии никель в САС частично или полностью заменяют марганцем, такие допущения могут привести к появлению магнитных превращений, в результате которых при температурах порядка 50 К возникает структура типа «у-маргантенит» (ГЦК решетка с тетрагональными искажениями). Как следствие, скачкообразно снижаются пластичность и вязкость материала, учесть которые увеличением коэффициентов запаса при прочностных расчетах уже не представляется возможным [4, 15].

Кроме того, подобные расчетные схемы зачастую игнорируют технологические особенности эксплуатации той или иной установки криогенного назначения, проведение на ней различных ремонтных работ и модернизаций, которые могут резко изменить весь комплекс структурных состояний и физико-механических свойств применяемых материалов [3, 7, 8, 12].

Разработка и внедрение дополнительных критериев стали возможны в последнее время благодаря значительным успехам в развитии физики металлов, новейшим достижениям механики разрушения; совершенствованию расчетно-экспериментальных методов оценки ресурса в смежных отраслях, в частности в энергетическом машиностроении; созданию новых методов и средств неразрушающего контроля [15].

Индивидуальное диагностирование криогенной техники требует:

- ✓ разработки метода длительного прогнозирования характеристик материалов на основе исходной (паспортной) информации и оценки фактического состояния материалов оборудования, отработавшего расчетный ресурс;

- ✓ создания принципиально новых методик контроля фактического состояния металла оборудования, основанных в основном на неразрушающих методах анализа.

Для проведения подобных работ необходимо уточ-

нить основные и разработать дополнительные критерии ресурса криогенного оборудования. К числу основных следует отнести критерии несущей способности оборудования, принятые в поверочных расчетах на прочность, к числу дополнительных – критерии, определяющие: сопротивление малоцикловой и термической усталости, деформационную и коррозионную стойкость, сопротивление хрупким разрушениям и трещиностойкость. В зависимости от того, какая группа эксплуатационных факторов риска характерна для оборудования, к нему необходимы различные подход и объем исследований.

Существующий контроль, экспертиза и расчет остаточного ресурса оборудования опасных производств, к числу которых относятся криосистемы, осуществляются на основании средневзвешенных механических характеристик без учета условий фактической эксплуатации материала оборудования и тех изменений, которые произошли с ним в ходе длительного срока службы. Это ведет к заведомо неполной оценке возможностей материалов оборудования, повышению себестоимости продукции из-за досрочной замены оборудования либо к использованию оборудования на грани риска аварийного состояния. Переход от расчетов по средневзвешенным значениям к методу оценки фактического состояния металла оборудования и его остаточного ресурса, основанному на проведении прямых исследований физико-механических свойств и коррозионной стойкости опасных зон, способен значительно повысить срок службы оборудования, уменьшить финансовые затраты на отечественных предприятиях.

Подобная задача решается и в других странах. В современных нормативных документах западных стран, таких, как «Анализ видов критических отказов» (США) или «Сосуды под давлением. Схема сертификации и промышленной безопасности» (ЕС), также поставлена задача поэтапного перехода от средневзвешенных к реальным свойствам металла оборудования при расчете его остаточного ресурса.

Список литературы

1. Банных О. А. Изыскание безникелевых аустенитных сталей для работы при повышенных температурах: Автореф. д-ра техн. наук – М.: Имет им. Байкова, 1971.
2. Безопасность России. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. В 2 т. – М.: МГФ «Знание», 1998. Т. 1, 2.
3. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издво стандартов, 1988.
4. Ермаков Б.С., Вологжанина С.А., Прудникова В.В. Влияние магнитных превращений на свойства и разрушение аустенитных сталей при криогенных температурах // Труды V науч.-техн. семинара «Прочность материалов и конструкций при низких температурах». – СПб.: СПБГАХПТ, 1999.
5. Ермаков Б. С., Солнцев Ю. П. Влияние структурного фактора и магнитных превращений на долговечность и надежность Cr-Ni сталей при криогенных температурах // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – СПб.: СПБАХПТ, 1998.
6. Лепихин А.М., Москвичев В.В. Базы данных по дефектности и характеристикам трещиностойкости в расчетах надежности сварных конструкций // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1991. № 5.
7. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. – М.: Машиностроение, 1974.
8. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Козлов А.Г. и др. Расчеты на трещиностойкость и эффекты пластического деформирования при наличии коротких трещин // Заводская лаборатория. 1990. № 3.
9. Меньшиков А. З., Такзей Г. А., Теплых А. Е. Спиновое стекло в сплавах // ФММ. 1982. 54.3.
10. Москвичев В.В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений. – Новосибирск: Наука, 2002.
11. Москвичев В.В. Расчетно-экспериментальные методы повышения конструкционной прочности и безопасности технических систем // Вычислительные технологии. Специальный выпуск. 2003. Т. 8.
12. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. – Новосибирск: Наука, 2002.
13. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. – М.: Химиздат, 2004.
14. Фролов К.В., Махутов Н.А. Проблемы безопасности сложных технических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992.
15. Фролов К.В., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Развитие работ по созданию научных основ обеспечения надежности машин и конструкций. – М.: МНТК «Надежность машин», 1991.