

ДОБРЕНЯКИН ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВЫВЕДЕННЫХ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТРАНСПОРТНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность: 05.02.01 - Материаловедение (машиностроение)

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2002

**Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном
техническом университете**

Научный руководитель:

академик Академии инженерных наук Российской Федерации,
засл. деятель науки и техники РФ
доктор технических наук,
профессор **Паршин А. М.**,

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор **Шахназаров Ю. В.**

кандидат технических наук,

доцент **Белецкий В.Г.**

Ведущая организация:

Военно-морской инженерный институт

Защита состоится 18 июня 2002 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета

Д 212.229.19 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лабораторно-аудиторный корпус, кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением».

С диссертационной работой можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке университета.

Ученый секретарь диссертационного

совета, д.т.н., профессор

Востров В.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Отечественные ядерные энергетические установки атомных подводных лодок (АПЛ) в настоящее время делятся на четыре поколения. Помимо этого, ранее были созданы и опытные транспортные жидкометаллические ядерные установки.

В основном на АПЛ разных поколений установлены модернизации атомных установок с реакторами типа ВВЭР.

Отличие ядерных установок стационарных атомных станций от транспортных АПЛ главным образом состоит в том, что при меньших размерах на ядерных установках АПЛ на тепловых нейтронах достигается относительно большая выходная мощность. Это связывается с обогащением ядерного топлива (урана). Если на стационарных атомных станциях оно не превышает 4 %, в то время как уровень обогащения по U^{235} в топливе АПЛ составляет 21 % (атомные подводные лодки 1 и 2 поколений) и даже 43-45 % для АПЛ 3-го поколения (в жидкометаллических АПЛ обогащение топлива составляет до 90 %).

Вывод в данный период из эксплуатации ~ 200 единиц АПЛ 1, 2 и, частично, 3-го поколений и последующая их разделка и утилизация - это неизбежный процесс, ибо идет дальнейшее непрерывное совершенствование новых поколений субмарин. При этом следует отметить, что всего лишь несколько десятков лет назад эти подводные исполины являлись показателем научно-технического уровня Страны, поглотив для своего создания львиную долю национального дохода государства. Над их созданием трудились сотни лучших предприятий России - это парадоксально, но факт. При этом следует отметить, что ядерная энергетика характеризуется не только как стабильный источник энергии, но и как экономически наиболее выгодный по сравнению с электростанциями на органическом топливе. При всех преимуществах, которые дает производство атомной энергии, в природе нет другого более опасного энергоносителя. При цепной реакции почти 99 % реакторного топлива идет в отходы, которые нельзя ни уничтожить, ни хранить в обычных условиях.

Последствия разгерметизации систем первого контура весьма опасны из-за загрязнения окружающей среды радиоактивными продуктами, сложности, а в ряде случаев и практической невозможности последующего ремонта и обслуживания оборудования. Учитывая изложенное, и принимая во внимание другие факты, все же следует категорично отметить следующее:

Ядерная энергетика -

беспрецедентный шаг в научно-техническом развитии одновременно требует и адекватного повышения технологической дисциплины, филигранного инженерного конструирования, неукоснительного исполнения эксплуатационной документации, высочайшей культуры технического мышления.

Предоставленная диссертанту возможность оценки работоспособности конструкционных материалов (аустенитные, ферритно-перлитные стали и др.) основных узлов ППУ АПЛ после их длительной эксплуатации (30-40 лет) повышает актуальность диссертационной работы, ибо дает возможность сравнить предварительные данные научно-экспериментальных исследований с результатами обследований и, при необходимости, вырезки специальных образцов (карточек) и дальнейших исследований, например, в "горячей" лаборатории ЦНИИ КМ "Прометей".

Цель работы. Цель настоящей диссертационной работы в основном заключается в оценке работоспособности конструкционных аустенитных хромоникелевых (различные трубные системы ППУ) и перлитных (корпус атомного реактора) сталей и сплавов при нейтронном облучении вплоть до предельных доз и длительной эксплуатации атомных подводных лодок (до 30-40 лет), а также в разработке предложений по созданию перспективных сталей и сплавов для наиболее нагруженных узлов ППУ энергетических установок на тепловых нейтронах и путей повышения сопротивляемости их различным видам коррозии и охрупчивания в условиях нейтронного облучения.

Наряду с отмеченными аспектами в работе должны быть решены и радиоэкологические вопросы ядерной энергетики, обусловленные обращением с радиоактивными отходами.

Следует отметить, что проблемные вопросы поведения конструкционных материалов ЯЭУ на тепловых нейтронах, являются весьма полезными при создании сталей и сплавов для ЯЭУ работающих на быстрых нейтронах, а также для основных конструкций термоядерных реакторов.

Научная новизна. Выполнено обобщение и сделан анализ работоспособности аустенитных коррозионностойких хромоникелевых сталей и сплавов в ППУ АПЛ I, II, III и IV контуров. Это дало возможность сделать следующие основные заключения:

1. Несовершенство трубной системы парогенераторов, а также конструкций и узлов другого теплообменного оборудования, трубопроводов I контура, деталей

внутриреакторного насыщения и приводов регулирующих органов ядерных энергетических установок создают благоприятные условия для накопления хлоридов и повышения агрессивности среды и, как следствие, приводит к развитию процессов коррозионного растрескивания и щелевой коррозии. Коррозионное растрескивание трубчатых элементов преимущественно начиналось со стороны II контура на границе разделов "вода-пар", т.е. в области доупаривания и накопления хлоридов.

2. Вследствие протечек заборная вода может поступать в отсеки ППУ АПЛ и попадать на наружные (нерабочие) поверхности трубопроводов из аустенитных хромоникелевых сталей и испаряться в местах контакта с ними. Даже в случае протечек химически чистой обессоленной воды на поверхности указанных трубопроводов в таких ситуациях происходит накопление хлоридов. Особенно интенсивное концентрирование хлоридов при этом наблюдается в теплоизоляционной защите (асбест, совелит и др.). В местах накопления хлоридов создаются условия для протекания процесса коррозионного растрескивания трубопроводов и трубных систем из аустенитных хромоникелевых сталей.

3. В интервале умеренных температур (20-400° C), т.е. в температурном интервале работы отечественных АПЛ на тепловых нейтронах, нейтронное облучение оказывает преимущественное влияние на вырождение равномерного относительного удлинения аустенитных Cr-Ni сталей. Вырождение равномерного относительного удлинения под влиянием облучения, т.е. переход от равномерного удлинения всего образца и удлинению его в образовавшейся шейке, с точки зрения механики материалов объясняется недостаточной способностью металла к упрочнению. Из-за недостаточного упрочнения деформация теряет устойчивость и локализуется в отдельном месте. Такая локализация сопровождается интенсивным нарушением сплошности в этой области, при этом поры и микротрещины наблюдаются в шейке задолго до полного разрушения образца.

Вырождение способности аустенитных Cr-Ni сталей к деформационному упрочнению в облученных металлах требует осторожного подхода при рекомендации их к конкретным условиям эксплуатации ППУ АПЛ. Но следует отметить, что не было случаев разрушения трубопроводов I контура ППУ АПЛ по причине исчерпания пластичности при принятых максимальных нейтронных потоках. В то же время было полное исчерпание пластичности материала оболочек твэлов (сталь X16H15M3Б) и происходило их хрупкое разрушение в период выемки.

4. Относительно работоспособности ВВЭР с корпусной низколегированной сталью марки 15X2МФА, плакированной нержавеющей сталью (двухслойная

наплавка) - не было случаев их разрушения- Но с целью дальнейшего повышения их радиационной хладнотойкости уменьшается в них содержание вредных примесей (фосфора и др.). Высококачественная сталь такого типа уже квалифицируется как сталь марки 15Х2МФАЛ

Практическая ценность работы. Разработанные нами и непрерывно совершенствуемые структурно-кинетические концепции позволяют определить дальнейшие пути повышения работоспособности и при этом ослабить вредное влияние нейтронного воздействия на конструкционные материалы ППУ атомных энергетических установок. Основное внимание при этом должно быть уделено изотропности механических свойств, предотвращению локализации пластической деформации, большему развитию процесса равномерного деформирования. Повышение качества исходной стали, уменьшение общего количества и более равномерное распределение неметаллических включений, различных первичных и вторичных фаз, а также создание условий более равномерного распределения дислокации в металле как в процессе металлургического передела, так и в период эксплуатации, будет способствовать обеспечению более изотропного состояния конструкционного материала.

В аустенитных хромоникелевых сталях и сплавах (основных конструкционных материалах ядерных установок) из первичных фаз наиболее нежелательны скопления карбидов (TiC) и карбонитридов (Ti(C,N)) титана, располагающихся как по границам, так и внутри зерен. При тепловой и механической обработке они не испытывают пластической деформации и, в тех случаях, когда они располагаются в виде скоплений, нередко наблюдается их хрупкое разрушение.

Апробация работы. Материалы, составляющие основное содержание работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

1. Международный семинар "Анализ рисков, связанных с выводом из эксплуатации, хранением и утилизацией атомных подводных лодок", 24-26 ноября 1997 г., Москва.
2. XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, 25-29 мая 1998 г., Санкт-Петербург.
3. Научная конференции "Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок", г. Обнинск. 22-24 сентября 1998г.
4. VIII Межгосударственная конференция "Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов", 2-4 сентября 1999 г., Белгород.

5. Работоспособность конструкционных материалов АЭС. Курская АЭС. Курчатов. 3 сентября 1999г.

6. Научно-теоретические семинары кафедры "Металловедение" Санкт-Петербургского государственного технического университета, 1999-2001 гг.

7. Международный экологический симпозиум "Перспективные информационные технологии и проблемы управления рисками на пороге нового тысячелетия" в рамках научных чтений "Белые ночи - 2000", Санкт-Петербург, 1-3 июня 2000г.

8. Второй международный семинар «Радиационное наследие бывшего СССР: современное состояние и проблемы реабилитации» РАДЛЕГ'99, Санкт-Петербург, 22-25 ноября 1999г.

9. Научные чтения "Стратегия выхода из глобального экологического кризиса", 2001 г., Санкт-Петербург.

10. IX Межгосударственная конференция «Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов», ноябрь 2001 г., Белгород.

11. IV Международная конференция "Радиационная безопасность: Экология - Атомная энергия", 24-28 сентября 2001 г., Санкт-Петербург.

12. Международный семинар «Экологические проблемы утилизации атомных подводных лодок», 4-9 июля 2001 г., Северодвинск.

13. Конференция посвященная 70-летию секции прочности и пластичности материалов им. Н.Н. Давиденкова, Санкт-Петербург. 12-14 марта 2002 г.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 20 научных публикациях. По результатам работы подана заявка на выдачу патента.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 188 страниц: 146 машинописных страниц текста, 36 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 105 наименований.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель предлагаемого исследования, приведена структура и объем работы.

На стадии становления ядерной энергетики при выборе конструкционных материалов для основных узлов теплоэнергетического оборудования использовался опыт, накопленный при разработке сталей для традиционных тепловых электростанций, авиастроения, судостроения и других отраслей промышленности. Но при этом особенностью подхода в отечественном ядерном машиностроении (ядерно-энергетическом) явилось ужесточение требований к технологическим процессам

производства сталей и послеоперационному контролю качества полуфабрикатов и готовых узлов. Резко было усилено внимание к вопросам конструкционной прочности.

При этом следует отметить, что новое явление коррозионного растрескивания аустенитных хромоникелевых сталей в процессе эксплуатации выявило недостаточность отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных изысканий по работоспособности конструкционных материалов в специфических условиях эксплуатации. Разработка мер по предотвращению или значительному уменьшению остаточных растягивающих напряжение сварочного (брызги, прижоги, законтачивание и др.) и механического (вмятины, клеймения, грубая шлифовка, холодная гибка и развальцовка без последующей термической обработки, клеймения электрокарандашом и т.д.) происхождения, введение конструктивных особенностей, направленных на ослабление накопления хлоридов в локальных объемах, а также меры по улучшению водоподготовки значительно ослабили интенсивность развития коррозионного растрескивания.

В связи с возможным увеличением срока службы действующих водо-водяных реакторов до 60-80 и более лет необходимо особое внимание уделить теоретическим и прикладным вопросам влияния временного фактора в условиях непрерывного нарастания (флюенса) нейтронного и гамма-излучения при умеренных температурах на комплекс механических, коррозионных и других свойств. Некоторые из этих вопросов актуальны уже и сейчас. Так, недооценка развития во времени процессов радиационно-стимулированной диффузии и, особенно, развития структурно-фазовых превращений при облучении, изменения предельной растворимости вредных примесей в твердом растворе уже привела к пересмотру принципов легирования корпусных сталей, предельного содержания в них основных и примесных элементов, чистоте шихты, и, вообще, к усовершенствованию процессов металлургического передела.

Следует также указать на следующее. Было время, и не так уж давно, когда новые стали и сплавы разрабатывались вообще, затем стало правилом, что новый материал разрабатывается применительно к определенным условиям его работы, сейчас в ряде случаев стало необходимым и конструкции узла разрабатывать применительно к специально разработанным сплавам, т.е. физику и конструктору необходимо учитывать вопросы металловедения и технологий. Это стимулирует создание новой науки - архитектуры изделия. Последнее вызывает единение физика, конструктора, прочниста и металловеда. Только при таком единении возможно в ряде случаев решение проблемных фундаментальных и прикладных вопросов.

Первая глава посвящена основным недостаткам, выявленным на начальных

этапах строительства и эксплуатации атомных подводных лодок таким как несовершенство технологического процесса и отступление от требований технических условий и государственных стандартов, которым наиболее подверженными являются:

- резьбовые соединения трубопроводов;
- районы разветвления трубопроводов и установки отрошков;
- отбортованные концы фланцевых и штуцерных соединений;
- гибели трубопроводов;
- застойные зоны систем;
- участки контакта разнородных металлов и др.

Таким образом, при рассмотрении наиболее слабых мест судовых трубопроводов, имеющих наименьшую долговечность, установлено, что причиной значительной части разрушений является несоблюдение технологии изготовления трубопроводов (и несовершенство конструкций отдельных узлов).

К недостаткам проектирования и конструирования следует отнести выходы из строя в результате коррозионного растрескивания наблюдаются в трубных системах парогенераторов, изготовленных из аустенитных сталей типа 18-8. Коррозионное растрескивание трубчатых элементов преимущественно начинается со стороны воды второго контура на границе раздела «вода-пар», т. е. в области доупаривания и накопления хлоридов,

Наличие щелевых зазоров (подкладные кольца и др.) интенсифицирует развитие коррозионных повреждений.

Отступление от расчетных условий эксплуатации выражается в частности в том, что вследствие протечек теплоноситель (вода) может попадать на наружные (нерабочие) поверхности трубопроводов из аустенитных хромоникелевых сталей и испаряться в местах контакта с ними.

Выполнение мер по устранению недостатков проектирования, конструктивно-технологического исполнения "слабых" узлов трубопроводов и систем, улучшение качества изготовления и монтажа (и правильная эксплуатация судовых систем), т.е. ослабление деградации свойств металла в конструкции, неизбежно увеличит срок безотказной работы трубопроводов и трубных систем и их долговечность.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы радиационной повреждаемости и структурно-принудительной рекомбинации металлов. Отмечены некоторые аспекты физических условий работы конструкционных материалов основных узлов ядерных и термоядерных реакторов. Основное внимание уделено рассмотрению вопросов

радиационных дефектов в металлах и их эволюции, предвыделения вторичной фазы и свойств сплавов, а также особенностям структурных превращений в аустенитных хромоникелевых сталях и сплавах и их влиянию на прочностные и пластические свойства. На основании этого сформулированы критерии работоспособности конструкционных материалов ядерных и термоядерных энергетических установок.

В третьей главе отмечено, что радиоактивные отходы, образующиеся на всех этапах жизненного цикла транспортных ядерных энергетических установок (рис. 1), являются основной проблемой ядерной энергетики. Вывод из эксплуатации транспортных ядерных энергетических установок, как и всех объектов ядерной энергетики, связан с необходимостью обращения с радиоактивными конструкционными материалами. Радиоактивность этих материалов обусловлена наряду с активацией самого металла отложениями на внутренних поверхностях оборудования I контура ядерной энергетической установки АПЛ радиоактивных продуктов коррозии и продуктов деления ядерного топлива, которые проникают в теплоноситель I контура из разгерметизировавшихся твэлов. Наряду с этим особую озабоченность вызывает длительное хранение на плаву более полутора сотен выведенных из эксплуатации АПЛ, две трети которых имеют на борту ядерное топливо. Вырезанные при утилизации реакторные отсеки также хранятся на плаву, ожидая окончательной утилизации, которая планируется через 50-70 лет. Учитывая изложенное необходимо незамедлительно принимать меры по уменьшению напряженности радиационной и радиоэкологической обстановки в местах утилизации АПЛ.

Одним из путей уменьшения радиоактивности конструкционных материалов АПЛ, является способ лазерной дезактивации, который позволяет значительно (на несколько порядков) уменьшить количество твердых радиоактивных отходов без применения реагентов, т.е. без образования жидких радиоактивных отходов.

В четвертой главе изложены вопросы радиационной хладноломкости и учет этого явления в процессе нейтронного облучения перлитных сталей при длительной эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов атомных подводных лодок АПЛ. Отмечена важность учета хладноломкости ферритных сталей в связи с особенностями легирования и структурных превращений, структуры и радиационной повреждаемости мартенситно-стареющих сталей.

С инженерной точки зрения, возникновение кристаллического излома в образце или конструкции весьма опасно. Кристаллический вид разрушения однозначно свидетельствует о неудовлетворительном качестве стали и о возможности появления

хрупких разрушений.

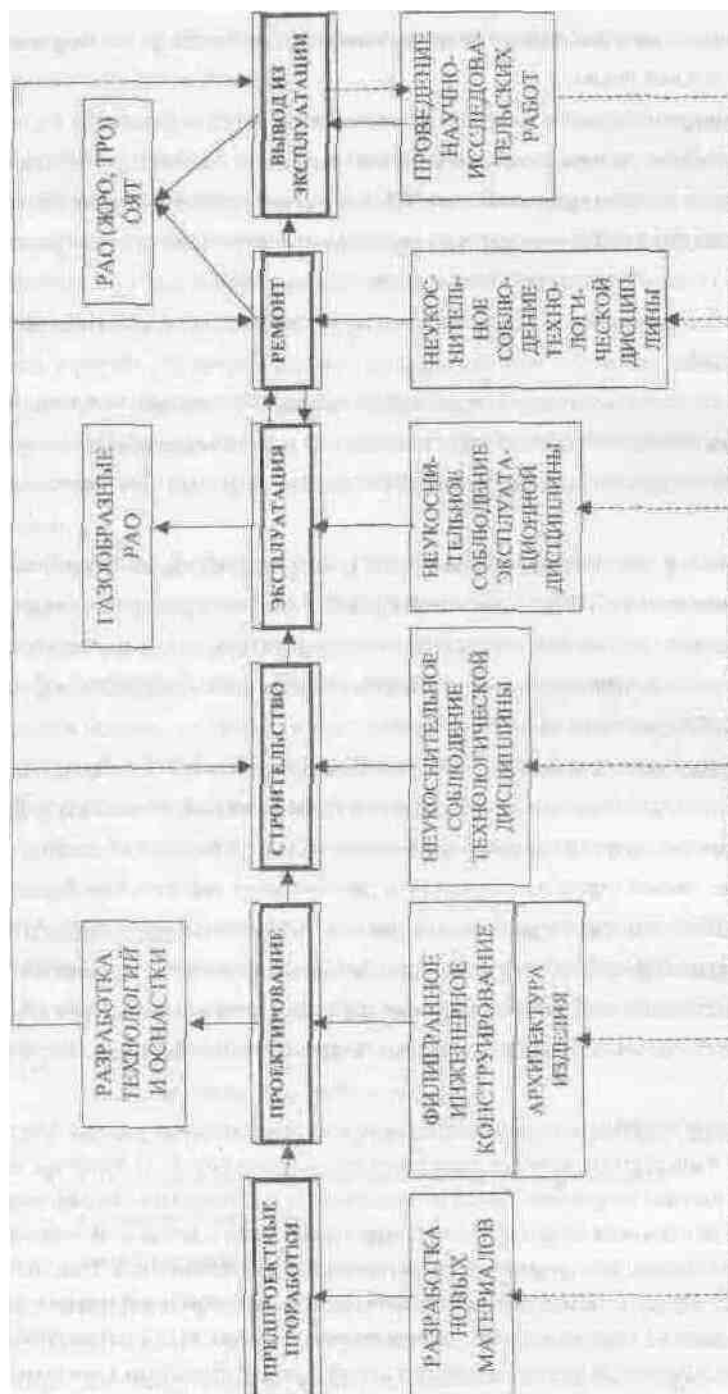


Рисунок 1. Жизненный цикл транспортной ядерной энергетической установки

При электронномикроскопическом исследовании вязкое разрушение характеризуется чашечным строением излома - результатом пластической деформации, вызванной движением тупой трещины. Хрупкое разрушение характеризуется ручьистым изломом: плоские фасетки указывают на отрыв одной части кристалла от другой (рис. 2).

Рассмотрена возможность восстановления механических свойств облученных сталей при последующем отжиге корпусов реакторов (рис.3) и обоснована работоспособность водо-водяных атомных реакторов атомных подводных лодок.

В настоящее время можно сказать, что особенность металлургических технологических процессов, совершенство принципов легирования и высокое качество исходных компонентов (малое количество фосфора, серы и других вредных примесей) при качественном изготовлении и выполнении предусмотренных условий эксплуатации обеспечили высокий уровень надежности и долговечности водо-водяных энергетических ядерных реакторов атомных подводных лодок - за весь период эксплуатации ВВЭР не было случаев их разрушения

Отмечено, что научно-исследовательские и инженерные вопросы охрупчивания и восстановления свойств феррито-перлитных сталей корпусов ядерных реакторов безусловно должны быть продолжены. При этом необходимо особое внимание уделить фактору времени. Это особенно важно для стационарных ЯЭУ, так как срок службы которых может быть увеличен до 60-80 лет.

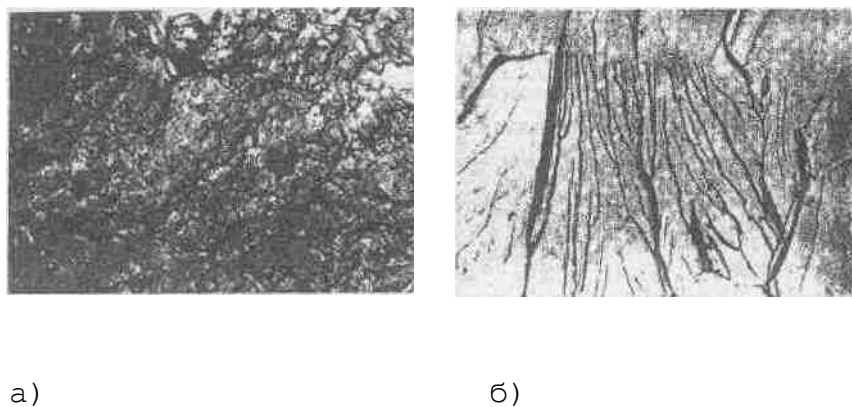


Рис. 2. Чашечное (а) и ручьеистое (б) строение изломов низколегированной реакторной стали

15Х2МФА: а- $t_{исп}=+20^{\circ}\text{C}$, $a_n=126 \text{ Дж/см}^2$, $\times 5000$;
 б – $t_{исп}= - 20^{\circ}\text{C}$, $a_n = 15 \text{ Дж/см}^2$, ступени скола, $\times 5000$ [60].

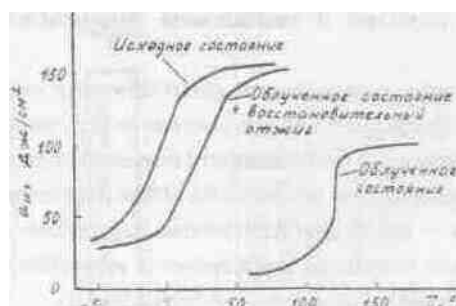


Рис. 3. Восстановление ударной вязкости стали 15Х2МФА после отжига корпуса реактора, предварительно облученного нейтронами

В пятой главе изучены вопросы низкотемпературного радиационного охрупчивания для аустенитных сталей и сплавов и титановых и титан-циркониевых сплавов. Подтверждена связь радиационного упрочнения и охрупчивания с особенностями структурных изменений. Для повышение работоспособности аустенитных конструкционных материалов в системах ППУ атомных подводных лодок и ослабления вредного влияния нейтронного облучения основное внимание должно быть уделено изотропности механических свойств, предотвращению локализации пластической деформации большему развитию процесса равномерного деформирования. Повышение качества исходной стали, уменьшение общего количества и более равномерное распределение неметаллических включений, различных первичных и вторичных фаз, а также создание условий более равномерного распределения дислокации в металле как в процессе металлургического передела, так и в период эксплуатации, будет способствовать обеспечению более изотропного

состояния конструкционного материала.

В шестой главе определены основные недостатки при создании ядерных энергетических установок АПЛ и пути повышения работоспособности конструкционных материалов.

Предложения по дальнейшему повышению работоспособности конструкционных материалов ППУ АПЛ изложены в таблице 1.

Обобщение и анализ опыта эксплуатации и проведение комплекса научно-исследовательских работ указывают на необходимость проведения дальнейших исследований и разработки путей повышения сопротивляемости конструкционных материалов различным видам коррозии, охрупчиванию при нейтронном облучении при статических и динамических нагрузениях с учетом изложенных выше факторов. Эти научные проработки должны проводиться с учетом условий и потребностей, и внедряться на всех этапах жизненного цикла транспортной ядерной энергетической установки (на рис. 1 пунктирные линии).

Таблица 1.

Применяемые и перспективные конструкционные материалы основного оборудования ППУ атомных подводных лодок

№ п/п	Наименование узла, системы, детали	Тип стали или сплава	Особенности легирования и некоторые свойства
1	2	3	4
А. Применяемые стали и сплавы			
1	Оболочки твзлов:		
	а) коррозионностойкие аустенитные стабилизи- рованные стали;	X16H15M3Б	Микродобавка бора
	б) циркониевые сплавы;	а-сплавы циркония	
	в) мартенситно- ферритные хромистые стали ЭП450	12Х1 3МФ Б	Легирование ниобием
2	Корпус реактора (ВВЭР)	15Х2МФ А, 15Х2МФ АА	Чистота по фосфору (и меди)
3	Трубные системы и тру- бопроводы первого кон- тура, металл сварной проволоки	08Х18Н10Т Св. ОХМФ ТУ	Непрерывное совершенствова- ние технологии на металлур- гических и судостроительных заводах

Б. Перспективные конструкционные материалы			
1	Оболочки твзлов: а) высоконикелевые аустенитные сплавы; б) титан-циркониевые сплавы; в) малоуглеродистые хромистые ферритные стали	ОЗХ20Н45МБЧ (ЧС-42П) ОЗХ20Н45МБРЦ (ЧС-42П) Титан, легированный 10-20%Zr 01Х13М	Микродобавки иттрия, бора и циркония. Высокая сопротивляемость коррозионным повреждениям и весьма удовлетворительная пластичность при НТРО. Высокая коррозионная стойкость при относительно удовлетворительном сечении захвата нейтронов
2	Корпуса реакторов, парогенераторов, компрессоров объема и другого оборудования ППУ первого контура ЯЭУ. "Нерабочие" наружные поверхности для повышения коррозионных свойств.	15Х2МФА, 22К и другие низколегированные стали	Высокое сопротивление хрупкому разрушению и относительно высокая хладноломкость. Нанесение антикоррозионных покрытий на наружной поверхности.
3	Прочный корпус АПЛ, примыкающий к реактору	Типа АК	Местное повышение сопротивляемости общей коррозии

Основные выводы.

1. Утверждается, что ядерная энергетика не только стабильный источник энергии, но и экономически наиболее выгодный по сравнению с электростанциями на органическом топливе. Следует отметить, что низкая стоимость производства энергии на АЭС при более жестких требованиях к конструкционным материалам и технологическим процессам получения полуфабрикатов и изготовления узлов и конструкций достигается преимущественно за счет топливной составляющей.
2. Еще раз показано преимущественно отрицательное влияние нейтронного облучения на комплекс различных свойств конструкционных материалов. Это обусловлено не только тем, что нейтронное облучение ускоряет процессы ползучести, усиливает временную зависимость длительной прочности, резко снижает кратковременную и длительную пластичность в широком интервале температур, повышает критическую температуру вязко-хрупкого перехода, снижает коррозионную стойкость, вызывает рост урана, радиационное распухание и вакансионную пористость, но и тем, что в результате протекания (п,а) и (п,р) - реакций возникают трансмутантные элементы (например, газообразные и легкоплавкие примеси), сопутствующие проявлению гелиевого и водородного охрупчивания, газового распухания и др.
3. Проанализировано весьма вредное влияние нейтронного облучения на процессы хладноломкости феррито-перлитных сталей 15Х2МФА и 15Х2НМФА - основных конструкционных материалов водо-водяных атомных реакторов (повышение критической температуры хладноломкости в область положительных температур и

падение при этом сопротивления удару). Известно, что сопротивляемость разрушению корпусов реакторов в процессе нейтронного облучения падает, но не было случаев их разрушений при предельных дозах облучения даже при приложении некоторых динамических нагрузений.

4. Проведено обобщение и сделан анализ вязкого и хрупкого разрушений сталей и сплавов 1-го контура паропроизводящих атомных энергетических установок.
5. Подтверждается, что оболочки тепловыделяющих элементов активной зоны атомных реакторов работают в особо тяжелых условиях (изменение геометрических размеров и формы, рост урана и радиационное распухание, развитие коррозионных повреждений и др.). Указанные факторы приводят к разгерметизации оболочек твэлон.
6. Еще раз отмечается, что, за весь период эксплуатации транспортных атомных энергетических установок из аустенитных сталей (1-й контур, ППУ), не было случаев разрушения трубных систем и конструкций по причине исчерпания пластичности.
7. Показано, что радиоактивность атомной установки определяется не только естественным процессом деления топлива, но и выходом топлива через разгерметизированные оболочки и последующей миграцией его в коммуникациях 1-го контура.
8. Утверждается, что создание особых конструкционных материалов оболочек твэлов, способных обеспечить герметичность их за весь период эксплуатации, - одна из основных задач будущей ядерной энергетики.
9. Отмечается целесообразность повышения сопротивляемости общей коррозии наружных поверхностей феррито-перлитных корпусов водо-водяных реакторов путем, например, диффузионной металлизации (покрытие хромом, алюминием или кремнием).
10. Еще раз для проработки ставится вопрос о создании корпусов атомных реакторов из высокопрочных коррозионностойких мартенситностареющих сталей типа X13H4M, не требующих внутренней антикоррозионной наплавки.
11. Вопросы ослабления напряженности радиационной обстановки, особенно в районах перенасыщенных атомной энергетикой (например, Кольский полуостров Северо-Запада России), должны решаться незамедлительно. Накопление радиоактивных отходов, кладбище атомных подводных кораблей - это признаки экологической опасности для человечества.
12. Показано, что вместо реагентной (химической и электрохимической) дезактивации

поверхностно загрязненных деталей, весьма перспективен метод лазерной дезактивации. Преимущество этой технологии основано на разрушении окисной пленки и дистанционном удалении "летучих" продуктов коррозии.

13. Отмечена также необходимость проведения предпроектных проработок и учета «архитектуры изделия» на этапе проектирования.

Содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Паршин Л.М., Никитин Г.Д., Добренякин Ю.П. Некоторые радиоэкологические аспекты ядерной энергетики, обусловленные обращением с радиоактивными отходами// Паршин А.М., Тихонов А.Н., Бондаренко Г.Г. и др. Радиационная повреждаемость конструкционных материалов.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.

2. Паршин А.М., Никитин Г.Д., Федоров М.П., Добренякин Ю.П. Разрушение радиоактивной окисной пленки и перспективность лазерной дезактивации// Науч. ведомости, БГУ, сер. Физика.-2000.- № 1.

3. Агапов В.Г., Никитин Г.Д., Добренякин Ю.П. Применение лазерной дезактивации при утилизации АПЛ // Междунар. семинар «Экологические пробл. утилизации атомных подводных лодок». Северодвинск, 4-9 июля 2001 г.: Сб. тезисов докл.

4. Никитина К.А., Паршин А.М., Добренякин Ю.П. Транскристаллитное и межзеренное коррозионное растрескивание охрупченной облучением стали ОЗХ16Н15МЗБ в модельной реакторной воде // Науч. ведомости БГУ. Сер. Физика.- 2001.- № 2(15).

5. Костерин Б.И., Никитин Г.Д., Смирнов Б.Н., Добренякин Ю.П. Анализ состояния основных узлов и сварных соединений холодильника фильтра активности атомного ледокола «Ленин» // Науч. ведомости БГУ. Сер. Физика.-2001.-№ 2(15).

6. Паршин А.М., Петкова А.П., Добренякин Ю.П. Низкотемпературное радиационное охрупчивание аустенитных сталей и сплавов : Конференция, посвященная 70-летию секции металловедения и пластичности материалов им. Н.Н. Давиденкова. Санкт-Петербург, 12-14 марта 2002 г.

7. Барковский А.Н., Никитин Г.Д., Добренякин Ю.П. Оценка влияния неограниченного использования металлолома, образующегося при утилизации АПЛ на дозовые нагрузки населения России// Междунар. семинар "Анализ рисков, связанных с выводом из эксплуатации, хранением и утилизацией атомных подводных лодок", 24-26 ноября 1997г.- М.

8. Костерин Б.И., Никитин Г.Д., Добренякин Ю.П. Экологические проблемы

хранения на плаву реакторных отсеков утилизируемых атомных подводных лодок // Стратегия выхода из глобального экологического кризиса: Материалы науч. чтений.- СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2001.

9. Паршин А.М., Добренякин Ю.П., Колосов И.Е., Никитин Г.Д. Некоторые радиоэкологические аспекты и проблемы захоронения радиоактивных отходов и облученных конструкционных материалов ядерных энергетических установок. // Структурно-кинетическая концепция и работоспособность конструкционных материалов. (Труды СПбГТУ).-2001.- № 483.-С.50-55.

10. Никитин Г.Д., Добренякин Ю.П. Правовое и нормативно-техническое обеспечение утилизации АПЛ в России// Междунар. семинар "Анализ рисков, связанных с выводом из эксплуатации, хранением и утилизацией атомных подводных лодок", 24-26 нояб.1997г.- М.

11. Добренякин Ю.П. Никитин Г.Д., Рыбин В.В. Организационно-технические проблемы обеспечения радиоэкологической безопасности при утилизации атомных подводных лодок в России и пути их решения// XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Рефераты докл. и сообщ. N 3. "Химия и проблемы экологии, анализ и контроль объектов окружающей среды." -М., 1998.-С. 196.

12. Добренякин Ю.П. Никишин Г.Д. Перспективы переработки жидких радиоактивных отходов, накопленных на судостроительных и судоремонтных предприятиях Минэкономики России// XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Рефераты докл. и сообщ. N 3. "Химия и пробл. экологии, анализ и контроль объектов окружающей среды".-М.,1998.- С. 195.

13. Добренякин Ю.П. Никишин Г.Д. К вопросу о дозовых нагрузках персонала судостроительных и судоремонтных предприятий Министерства экономики России// XVI Менделеевский съезд по общей и прикл. химии. Рефераты докл. и сообщ..- N 3. "Химия и проблемы экологии, анализ и контроль объектов окружающей среды".- М., 1998.-С.195.

14. Nikishin O.D., Metanikov V.M., Dobrenyakin Y.P. Legal and Technical-Standard Ensuring of Nuclear Powered Submarines Utilization in Russia// A.A.Sarkisov and A.Youmyol du Clos(eds) Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposal 393-396. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netheriands.

15. Rybin V.V., Nikishin G.D., Kopyrin A.A., Dobrenyakin Y.P. Radioactive Waste Management at Enterprises of the Rusian Ministry of Economy. Conceptual Considerations// A.A.Sarkisov and A.Youmyol du Clos(eds) Analysis of Risks Associated with Nuclear

Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposal 383-391. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netheriands.

16. Бармин С.И., Никитин Г.Д., Волков С.Н., Добренякин Ю.П. Обеспечение радио-экологической безопасности при выводе из эксплуатации АПЛ// Междунар. экологический симпозиум "Перспективные информационные технологии и пробл. управления рисками на пороге нового тысячелетия" в рамках научных чтений "Белые ночи - 2000". Санкт-Петербург, 1-3 июня 2000г.:Материалы докладов.- Т. 2.-С.469- 470.

17. Бармин С.И., Никитин Г.Д., Волков С.Н., Добренякин Ю.П. Комплексное использование материалов - радиоэкологически чистая утилизация АПЛ// Междунар. экологический симпозиум "Перспективные информационные технологии и проблемы управления рисками на пороге нового тысячелетия" в рамках научных чтений "Белые ночи -2000". Санкт-Петербург, 1-3 июня 2000г.:Материалы докл.- Т. 2.- С.470-471

18. Бармин С.И., Никитин Г.Д., Волков С.Н., Добренякин Ю.П. Нормативно-правовое обеспечение радиационно-безопасной и экологически чистой утилизации АПЛ в России // Междунар. экологический симпозиум "Перспективные информационные технологии и проблемы управления рисками на пороге нового тысячелетия" в рамках науч. чтений "Белые ночи - 2000". Санкт-Петербург, 1-3 июня 2000г.: Материалы докл.- Т. 2.- С. 472-474.

19. Кобзев В.И., Копырин А.А., Лавковский С.А., Шариков В.П., Добренякин Ю.П, Радиоактивные отходы на заводах Российского агентства по судостроению // Междунар. семинар «Экологические проблемы утилизации атомных подводных лодок». Северодвинск, 4-9 июля 2001 г.:Сб. тезисов докл.

20. Паршин А.М., Неклюдов И.М., Никитин Г.Д., Добренякин Ю.П. Некоторые особенности влияния нейтронного облучения на свойства конструкционных материалов транспортных ядерных энергетических установок Алушта, 10-15 июня 2002 г.-(Находится в печати).

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97.

Подписано в печать 25.04.2002

Объем в п.л. 1,0

Тираж 100

Заказ № 288

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,

в типографии Издательства СПбГТУ

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 19