

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список аббревиатур и сокращений	5
Вместо предисловия	8
Глава 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ТЖМТ	59
Глава 2. «КОРАБЛЬ, ОПЕРЕДИВШИЙ ВРЕМЯ» ИЛИ «АРКТИЧЕСКИЙ ЧЕРНОБЫЛЬ»	72
2.1. Начальный период	73
2.2. Эксплуатация реакторов второго поколения	102
2.3. Неутешительные итоги	115
Глава 3. ЕСТЕСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	137
3.1. Концепция естественной безопасности	137
3.2. Концепция обеспечения безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300	161
Глава 4. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТА РУ БРЕСТ-ОД-300	174
4.1. Коррозия конструкционных материалов	174
4.1.1. Сплошная кислородная коррозия	175
4.1.2. Жидкометаллическая коррозия	179
4.1.3. Деградация механических свойств сталей в свинце	184
4.2. СНУП-топливо	186
4.3. Основные элементы реакторной установки	190
4.3.1. Тепловыделяющие сборки	190
4.3.2. Рабочие органы СУЗ	193
4.3.3. Главный циркуляционный насосный агрегат	195
4.3.4. Парогенератор	198
4.3.5. Корпус блока реакторного	200
4.4. Технология теплоносителя	207
4.5. Экспериментальные исследования и испытания	216
4.6. Программное обеспечение	225
4.7. Детерминистический анализ безопасности	228
4.8. Резюме	229
Глава 5. О ГОТОВНОСТИ К СООРУЖЕНИЮ ОПЫТНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ЭНЕРГОБЛОКА	235

Глава 6. ЭКСПЕРТИЗА РОСТЕХНАДЗОРА	271
6.1. Нормативная база	271
6.2. Так ковалась победа (хроника событий)	277
6.3. Глас вопиющего в пустыне	289
6.4. Реакция 5 Управления	303
Заключение	330
Постскриптум	337
Приложение	345
Литература	370

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТА РУ БРЕСТ-ОД-300

Любая сложная проблема всегда имеет простое, понятное и совершенно неправильное решение.

Закон Мёрфи

Приведем основные характеристики РУ БРЕСТ-ОД-300 [66, п. 4.1.2]:

Проектная тепловая мощность, МВт	700
Объем теплоносителя первого контура, м ³	900
Вид топлива	(U + Pu)N
Высота топливной части твэл, мм	1100
Максимальная глубина выгорания топлива, % т.а.	до 9
Максимальная повреждаемость оболочки твэл, сна	до 140
Расход теплоносителя через а.з., т/с	≈ 41,7
Количество ГЦНА, шт.	4
Количество модулей ПГ, шт.	8
Средняя температура:	
на входе в а.з., °С	420
на выходе из а.з.	535
Температура/давление теплоносителя 2-го контура:	
на входе в ПГ, °С/МПа	340/18,5
на выходе из ПГ, °С/МПа	505/17
Проектный срок службы, лет	30

4.1. Коррозия конструкционных материалов

Проект РУ БРЕСТ-ОД-300 (рис. 4.1) выполнен, исходя из следующих основных постулатов.

1. *В течение первых 1—2 тыс. часов испытаний в СТ на поверхности сталей формируется сплошная прочная диффузионно-непроницаемая защитная оксидная пленка (магнетит и смешанная шпинель) толщиной ~2 мкм. С увеличением экспозиции до 5—10 тысяч часов ее толщина возрастает до нескольких мкм и в дальнейшем существенно не меняется (п. 4.2.1.1.3.8 ПООБ [66]).*

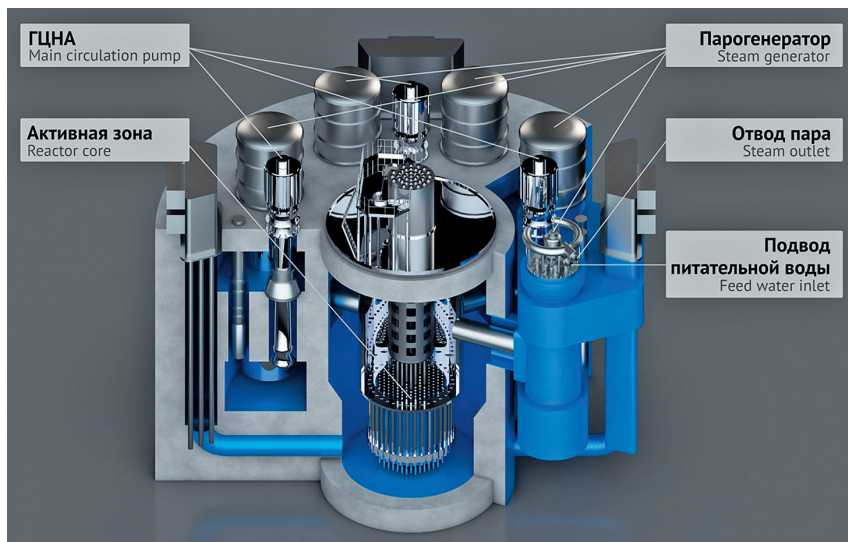


Рис. 4.1. 3D-модель реакторной установки БРЕСТ-ОД-300

(<https://progyv2020.ru/o-proekte/>)

2. При длительности 54 000 ч (6 лет) утонение металла вследствие коррозионных повреждений может составлять не более 18 мкм (п. 4.2.1.1.2.2.3 ПООБ [66]).

3. В расчетах учитывается термическое сопротивление окисной пленки на внешней поверхности оболочек твэл и ПЭЛ, толщина которой приблизительно составляет 10 мкм (п. 4.2.8.2.2 ПООБ [66]).

4. Формирование защитной оксидной пленки при пассивации стали ЭП823-Ш исключает образование очагов жидкометаллической коррозии (п. 4.2.1.1.3.8 ПООБ [66]).

Далее будет показано, что ни один из этих постулатов не соответствует фактическим результатам коррозионных испытаний сталей в свинце.

4.1.1. Сплошная кислородная коррозия

Прежде всего отметим, что никакого «прочного диффузионно-непроницаемого барьера» не существует в принципе. По данным испытаний ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» [134], толщина оксидной пленки на поверхности стали в СТ с регламентным содержанием кисло-

рода не стабилизируется на нескольких микрометрах, а растет по экспоненциальному закону. Например, для стали ЭП302-Ш, установлена следующая зависимость толщины оксидной пленки (δ , мкм) от времени (τ , ч): $\delta = 0,7\tau^{0,4}$. По прогнозу технологов АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», толщина оксидной пленки при температуре 540 °С и $C_O = 4 \cdot 10^{-6}$ % (по массе) за 40 тыс. часов на стали ЭП823-Ш достигнет 107 мкм (п. 4.3.5.2.1.3 ПООБ [66]) — на порядок больше того, что учитывается в теплофизических расчетах твэлов и ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300 при оценке термического сопротивления.

Типичная структура оксидной пленки показана на рис. 4.2, взятом из работы французских исследователей [135]. На рисунке видно, что пленка имеет двухслойную структуру. Нижний слой — сложная хромистая шпинель, верхний — магнетит. Само существование магнетитного слоя свидетельствует о диффузионной проницаемости оксидной

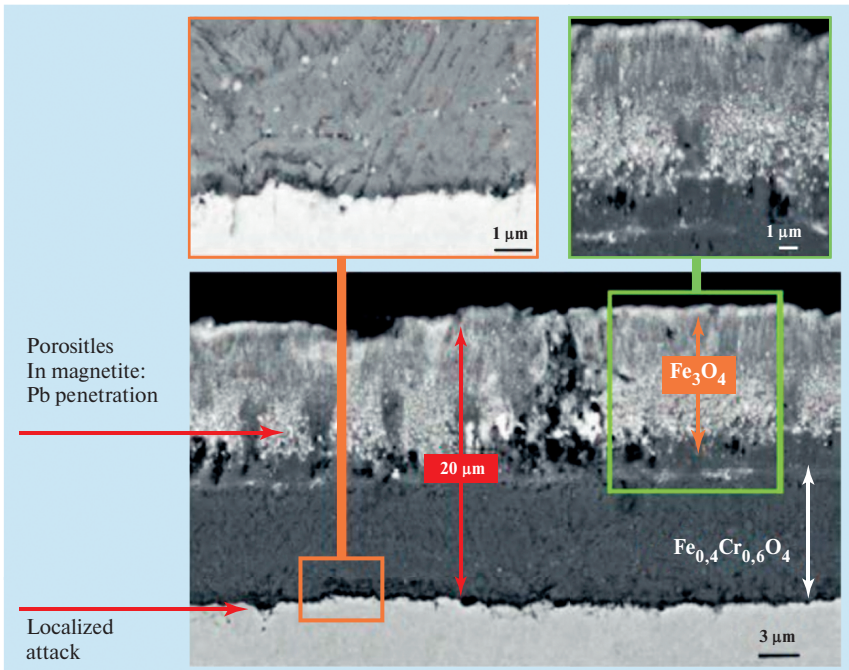


Рис. 4.2. Структура оксидной пленки на поверхности мартенситной стали Т91 (9 % Cr) после 3600 часов испытаний в насыщенном кислороде сплаве Pb-Bi при температуре 470 °С [135]

пленки. Из рисунка становится понятно, как свинец проникает сквозь защитную пленку. Это свидетельствует о том, что оксидная пленка отнюдь не является надежным барьером, как полагают разработчики проекта РУ БРЕСТ-ОД-300.

Подчеркнем, что приведенные выше оценки сплошной кислородной коррозии получены в испытаниях *ненагруженных* образцов, а, как показали испытания ЦНИИ КМ «Прометей» [136, табл. 2], скорость окисления под нагрузкой многократно возрастает (рис. 4.3). Как показано на рисунке, при напряжении 100 МПа скорость окисления стали ЭП302 в свинце с регламентным содержанием кислорода возрастает в примерно в 2 раза, а при напряжении 230 МПа — примерно в 10 раз, по сравнению со скоростью окисления ненагруженных образцов. Скорость окисления хромистой стали 10Х9НСМФБ под напряжение в 2—3 раза выше, чем аустенитной стали ЭП302.

Скорость окисления зависит также и от скорости омывающего сталь теплоносителя. По данным ГНЦ РФ-ФЭИ, при увеличении скорости свинцового теплоносителя от 0 до 0,6 м/с скорость коррозии ферритно-мартенситной стали ЭП823 возрастает в 2,5 раза [131, с. 1584].

Как отмечено в Экспертном заключении [131, с. 72], результаты испытаний подшипника ГЦНА РУ БРЕСТ-ОД-300 в свинцовом теплоносителе с регламентным содержанием кислорода, длительностью 360 часов, при частоте вращения до 500 об/мин [137], показали, что «на всех без исключения пластинах ротора и статора подшипника

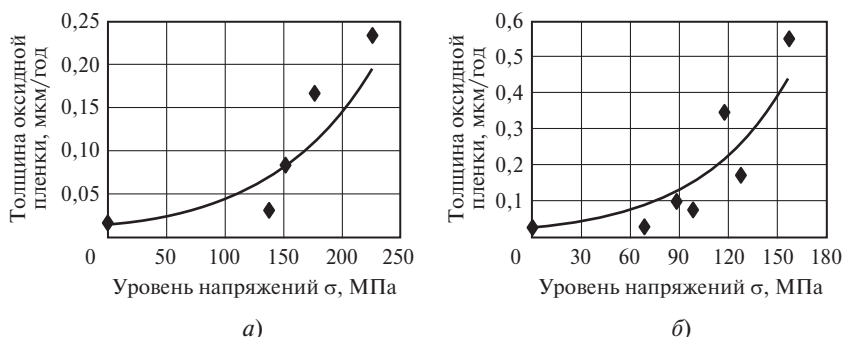


Рис. 4.3. Скорость окисления стали в жидком свинце с массовой долей кислорода $(1 \div 4) \cdot 10^{-6} \%$ при температуре 550 °С и скорости теплоносителя 2 м/с в зависимости от уровня напряжений:

a — аустенитная сталь ЭП302; *б* — хромистая сталь 10Х9НСМФБ

наблюдается увеличение толщины по сравнению с замерами пластин до испытаний на 0,05—0,06 мм. Данное обстоятельство связано с окислением поверхности материала пластин в потоке жидкометаллического теплоносителя».

В испытаниях ненагруженных образцов стали ЭП302-Ш в потоке теплоносителя со скоростью 2 м/с аналогичная толщина оксидной пленки (64 мкм) была достигнута за 52 000 ч [138, табл. 13], т.е. скорость кислородной коррозии во вращающемся подшипнике возросла как минимум в 144 раза по сравнению с той, что принята в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300 для стали ЭП302.

Зависимость сплошной кислородной коррозии сталей в свинце от уровня напряжений и скорости омывающего потока в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300 [66] совершенно не учитывается ни в прочностных и теплофизических расчетах элементов РУ, ни при оценке потребности кислорода и соответственно производительности массообменных аппаратов, ни при оценке скорости накопления в теплоносителе нерастворенных продуктов коррозии и определении требуемой производительности фильтров. Систематические данные о кислородной коррозии *нагруженных* образцов сталей при различных уровнях напряжений, температурах и скоростях омывающего теплоносителя и различном содержанием в нем растворенного кислорода просто отсутствуют.

Было замечено, что скорость окисления стали в свинце существенно зависит от исходного состояния ее поверхности. Были опробованы: оксидирование, различные способы механической и термической обработки, магнетохимия (воздействие сильными магнитными полями), облучение пучком ионов поверхностей сталей. Однако в результате длительных коррозионных испытаний, выполненных в ЦНИИ КМ «Прометей» и ГНЦ РФ-ФЭИ, было установлено, что состояние поверхности сталей существенно влияет на скорость кислородной коррозии лишь на начальном этапе. На интервале времени 20 000—50 000 часов все отличия нивелируются.

Поэтому надежды на то, что шлифованием, подбором режимов штамповки или термообработки, предварительным оксидированием удастся обеспечить коррозионную стойкость стали ЭП823-Ш в свинцовом теплоносителе в условиях эксплуатации РУ, тщетны. Такая обработка может лишь замедлить сплошную кислородную коррозию на начальном этапе.

Как видно из представленных выше данных, сплошная кислородная коррозия конструкционных материалов в ПООБ РУ БРЕСТ-ОД-300 сильно недооценивается, но это еще не самая большая проблема данного проекта.

4.1.2. Жидкометаллическая коррозия

Основную угрозу для работоспособности и безопасности реактора со свинцовым охлаждением представляет жидкометаллическая коррозия (ЖМК) — растворение компонентов сталей в свинцовом теплоносителе. Именно ЖМК является главной проблемой проекта РУ БРЕСТ-ОД-300.

Известно, что скорость растворения низколегированных сталей, а также нержавеющей сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов в свинце при содержании кислорода менее 10^{-7} % и температурах 450—500 °С составляет 1—10 мм/год.

Как отмечено в Экспертном заключении [131, с. 73], результаты коррозионных испытаний макета ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300 в потоке свинцового теплоносителя с содержанием кислорода $C_O = (10^{-8} \div 10^{-7})$ % (по массе) при температуре 450—650 °С в течение 300—1000 часов, выполненных в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» [139], показали, что глубина коррозионных повреждений ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш достигает 1200—1300 мкм (рис. 4.4), что соответствует скорости ЖМК примерно 10—11 мм/год (20 толщин оболочки твэла в год!).

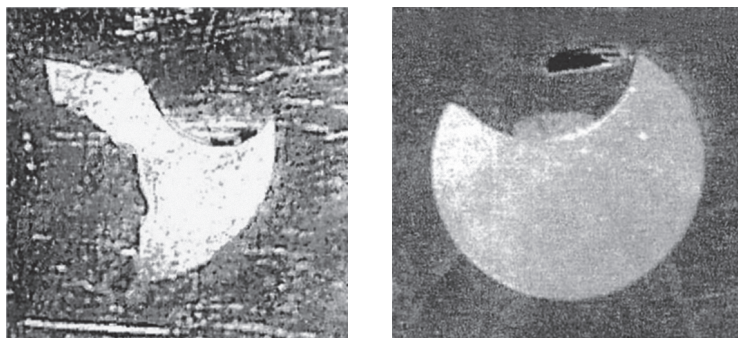


Рис. 4.4. Поперечные сечения образцов стали ЭП823 после коррозионных испытаний в свинце на границе хвостовик — конусная часть образца, $T = 600$ °С, $\tau = 300$ часов [66, 139]

Результаты этих испытаний свидетельствуют о том, что сталь ЭП823-Ш, из которой изготовлены оболочки твэлов и вся активная зона РУ БРЕСТ-ОД-300, относится к наименее коррозионностойким по отношению к ЖМК сталям и непригодна для эксплуатации в свинцовом теплоносителе.

Для защиты от ЖМК в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300, как и полвека назад, используется кислородное ингибирование — создание и поддержание оксидных пленок на поверхности металла за счет предварительного оксидирования и подачи кислорода в теплоноситель в процессе эксплуатации. При этом, как указано в Экспертном заключении [131, с. 74—78], вопреки принятому в ПООБ [66] постулату о том, что формирование защитной оксидной пленки исключает образование очагов жидкометаллической коррозии, фактические результаты испытаний, выполненных в ЦНИИ КМ «Прометей» [56, 134, 136, 138, 140] показали, что уже при напряжении 70—100 МПа на стали ЭП83-Ш происходит растрескивание защитной оксидной пленки (рис. 4.5), проникновение свинца в металл и, как следствие, глубокая локальная ЖМК.

В испытаниях на длительную прочность образцов стали ЭП823-Ш в свинцовом теплоносителе с регламентным содержанием кислорода при напряжении 160 МПа и температуре 590 °С (область рабочих напряжений и температур оболочек твэлов) продолжительностью примерно 1,5 месяца обнаружено проникновение свинца на глубину

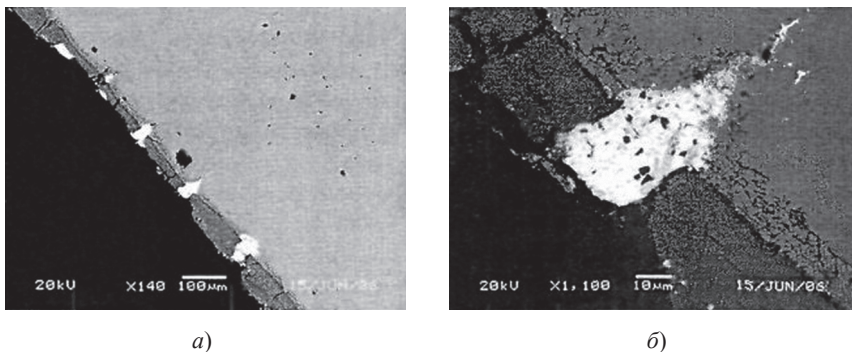


Рис. 4.5. Растрескивание оксидной пленки на ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ после испытаний на длительную прочность в свинце при напряжении 69 МПа (а), то же при большем увеличении (б) [136]

до 180 мкм, «выявлены очаги жидкометаллической коррозии в виде язв, пропитанных свинцом» [56, 138].

Локальная ЖМК стали ЭП823 глубиной 180 мкм (36 % толщины оболочки твэла) примерно за 1,5 месяца — это в 10 раз больше, чем принято за 6 лет (не более 18 мкм) в ПООБ [66].

По данным [140] при температуре 550 °С и напряжении 230 МПа на стали ЭП302 обнаружено растрескивание защитной оксидной пленки и проникновение жидкого свинца в сталь как по микротрещинам, так и по границам зерен на глубину от 80 до 180 мкм (рис. 4.6).

Для сравнения, глубина локальной ЖМК наружной поверхности оболочек твэлов из сталей ЧС-68 и ЭК-164 в натрии после облучения в активной зоне БН-600 в течение 17 500 часов (729 сут), не превышает 17 мкм [141].

Не оправдались надежды и на «самозалечивание» оксидных пленок в регламентном кислородном режиме. По заключению ЦНИИ КМ «Прометей», окислительной способности стали ЭП823-Ш из-за относительно низкого содержания хрома и кремния недостаточно для залечивания поверхностных трещин [138, с. 19].

С этим согласны и специалисты АО «НИКИЭТ»: «концентрация кислорода в свинце на уровне $C_O \approx (5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-6})$ % (по массе) не обеспечивает защиту сталей от воздействия свинца при наличии застойных зон и напряжений» [142, с. 23]. Это неудивительно, если учесть, что скорость жидкометаллической коррозии на 2—3 порядка

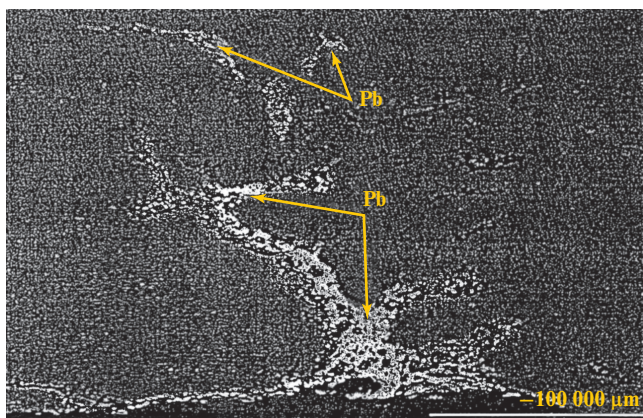


Рис. 4.6. Проникновение свинца в сталь ЭП302, локальная ЖМК [140]

выше, чем скорость кислородной коррозии при указанных выше концентрациях кислорода.

Несмотря на то что главной особенностью коррозии материалов в свинце, отличающей ее от коррозии в воде или в натрии, является преимущественно язвенный характер, обусловленный растрескиванием (механическим повреждением) оксидной пленки и быстрой локальной ЖМК, несмотря на прямое требование НП-089-15 (п. 10 Приложения № 2), разработчики проекта за прошедшие десятилетия не получили никаких данных о характере сопротивления язвенной коррозии конструкционных материалов своей установки, контактирующих со свинцом, — данных о скорости роста количества и глубины язв в эксплуатационных условиях. Без такой информации невозможно достоверно прогнозировать глубину коррозионных повреждений и ресурс основных элементов РУ БРЕСТ-ОД-300.

Неэффективность коррозионной защиты сталей от жидкометаллической коррозии с помощью поверхностных оксидных пленок, неизбежность глубокой локальной ЖМК в условиях эксплуатации и вытекающая отсюда непригодность сталей ЭП823 и ЭП302 для работы в РУ БРЕСТ-ОД-300 — это объективная реальность, твердо установленные в многочисленных и многолетних исследованиях и наглядно представленные экспериментальные факты, а не просто «спорное мнение» отдельных недоброжелателей, как хочется кому-то думать.

Вот данные ведущих зарубежных специалистов (ЕНЕА, Рим; Итальянский технологический институт, Милан; Институт технологии в Карлсруэ, Германия), опубликованные в документе МАГАТЭ в мае 2020 г. — IAEA-TECDOC-1912 [135] (выделение текста в цитатах — наше):

«Контакт со свинцом и свинцовыми сплавами подвергает материалы серьезной деградации в соответствии с различными механизмами — непассивирующим окислением, растворением компонентов сталей и жидкометаллическим охрупчиванием. Формирование хромистого оксидного слоя на стальной поверхности, который выступает физическим барьером для последующего окисления в большинстве сред, не является эффективным для тяжелых жидкометаллических теплоносителей. При температурах выше 450 ~ 500 °С наблюдается сильное коррозионное воздействие как в аустенитной, так и в ферритно-мартенситной стали с образованием толстых незащитных

слоев оксидов, внутреннего окисления и растворения стали в теплоносителе» (с. 195).

«Жидкометаллическое охрупчивание ферритно-мартенситных сталей исключило их рассмотрение в качестве конструкционного материала в реакторах с жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца» (с. 176).

«Локальная коррозия — одна из ключевых проблем, которая еще до конца не изучена» (с. 180).

Выводы европейских исследователей целиком совпадают с выводами экспертизы НТЦ ЯРБ. Процитированные выше три тезиса — это, по существу, приговор «международного трибунала» проекту РУ БРЕСТ-ОД-300, в котором как раз и применяется антикоррозионная защита с помощью поверхностных оксидных пленок, активная зона изготовлена из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш (подверженной, как это показано в испытаниях [140, 143] жидкометаллическому охрупчиванию в интервале температур 360—420 °С) и полностью игнорируется локальная жидкометаллическая коррозия.

Долгое время за рубежом верили в то, что «решение, придуманное русскими конструкторами в 60-е годы для реакторов подводных лодок класса «Альфа», оказалось очень практичным и эффективным. Оно состояло в том, чтобы растворить кислород в жидком металле и поддерживать его концентрацию ниже значения, при котором образуются нерастворенные оксиды свинца, но достаточно высоким, чтобы обеспечить образование защитной оксидной пленки на поверхности нержавеющей стали» [144, с. 196]. Промоутеры свинцово-висмутowego теплоносителя убеждали, что достаточно поддерживать концентрацию кислорода в интервале ($10^{-6} \div 10^{-5}$) % (по массе) и проблема коррозии конструкционных материалов будет решена, а сам теплоноситель не зашлакуется.

Теперь, когда европейцы провели собственные исследования и выяснили, что с оксидной пленкой всё не так просто и эффективно, они, во-первых, перенесли сооружение своего демонстрационного реактора со свинцовым теплоносителем ALFRED с 2025 г. на 2035—2040-е годы, а во-вторых, занялись поиском альтернативных нерастворимых покрытий, например глинозема (Al_2O_3), который предлагается наносить на поверхность сталей с помощью лазера.

У нас в стране активно занимались подобными исследованиями полвека назад. Были испробованы: бериллизация, алитирование, хро-

мирование, молибденирование, силицирование и др. [105, с. 337]. Но ни одно из этих покрытий не оказалось эффективным. Их общая проблема состоит в том, что они не «самозалечиваются», а гарантировать сохранность таких покрытий в течение нескольких лет или даже десятков лет в агрессивной среде тяжелого жидкометаллического теплоносителя затруднительно.

4.1.3. Деградация механических свойств сталей в свинце

Помимо глубоких коррозионных повреждений, длительное воздействие свинцового теплоносителя приводит к существенной деградациии механических свойств конструкционных материалов.

В таблице приведены результаты сравнительных испытаний образцов стали ЭП823-Ш на длительную прочность в свинце и на воздухе, выполненные в ЦНИИ КМ «Прометей» [66, с. 78—80; 138, табл. 1].

Как видно из представленных данных, время до разрушения в свинце при температуре 550 °С, по сравнению с испытаниями на воздухе, сокращается примерно в 2—4 раза, а при температуре 630 °С

Напряжение, МПа	Время до разрушения, ч		Отношение времени разрушения образца для различных сред (воздух/свинец)
	Воздух	Свинец	
<i>T</i> = 550 °С			
70	51 286	20 653	2,5
90	24 547	14 454	1,7
100	16 634	4570	3,6
130	—	1025	≈ 2,3
140	2338	—	
160	524	317	1,7
170	692	—	≈ 2,2
<i>T</i> = 630 °С			
100	2370	—	—
140	232	27	8,6
160	193	25	7,7
180	78	2	39,0