



**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический
университет**

Факультет Прикладной математики и механики
Выпускающая Динамика и прочность машин
кафедра: 15.03.03 «Прикладная механика»
Направление подготовки:
Квалификация: бакалавр

Допускается к защите
Зав.кафедрой ДПМ
В.П.Матвеевко
«20» июня 2020г.

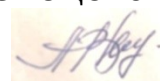
**ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА
ПРЕЖДЕВРЕМЕННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ЦИРКОНИЕВЫХ
ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТОМНЫХ
РЕКТОРАХ**

Выпускная квалификационная работа

Выполнила:
студентка группы ДПМ-16-16
Панькова София Алексеевна

()
подпись

Научный руководитель:
к.т.н. доцент кафедры ДПМ_
Кузнецова Елена Владимировна

()
подпись

Пермь 2020
Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Кафедра «Динамика и прочность машин»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой
ДПМ
Матвеевко
В.П.

«25» мая 2020г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы студента

Фамилия И.О.	Панькова
С.А. Факультет ПММ	Группа ДПМ-
16-16 Начало выполнения работы	25
мая 2020	

Контрольные сроки просмотра работы кафедрой	
16 июня 2020 Дата защиты работы на заседании	
ГЭК	23 июня 2020

1. Наименование работы: Влияние экстремальных условий на преждевременное растрескивание циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов в атомных реакторах;
2. Исходные данные к работе
3. Содержание пояснительной записки:
 - 1) Усовершенствование и создание оболочек,

- адаптированных к аварийным ситуациям с высокой прочностью, коррозионной, термической и трещино-стойкостью
- 2) Поведение оболочек ТВЭЛов в эксплуатационных условиях при наличии поверхностных несплошностей и дефектов
 - 3) Влияние экстремальных условий на преждевременное растрескивание циркониевых оболочек ТВЭЛов
-

4. Основная литература

- 1) С.А. Никулин, В.Г. Ханжин, Д.Б. Рожнов, В.А. Белов: Поведение циркониевых оболочеченых труб ТВЭЛов атомных реакторов в экстремальных эксплуатационных условиях//«Металловедение и термическая обработка металлов».№5.2009 г.С. 32-39
- 2) Влияние эксплуатационных режимов и технологических остаточных напряжений на коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, используемых в атомной энергетике / Е. В. Кузнецова, А. А. Арташова // Вестник ПНИПУ = PNRPU Mechanics bulletin. Механика. - 2012. - № 1. - С. 51-61., РИНЦ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17641483>
- 3) Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Т.2: Перевод с англ./Под ред. Ю. Мураками. - М.:Мир,1990. - 1016с.

Руководитель выпускной квалификационной работы студента

—к.т.н. доцент кафедры ДНМ
(Кузнецова Е.В.)



(должность, Ф.И.О.)



Задание получил

25 мая 2020

(Панькова С.А.)

(дата и подпись студента)

**КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

№ п. п.		Объём этапа, в %	Сроки выполнения		Примечание
			начало	конец	
1	Разработка основных разделов выпускной квалификационной работы	70	25.05.2020	10.06.2020	
2	Оформление выпускной квалификационной работы	20	10.06.2020	14.06.2020	
3	Разработка и оформление иллюстративной части материала к защите диссертации	10	14.06.2020	16.06.2020	
4	Представление ВКР на проверку и отзыв научного руководителя		16.06.2020		
5	Представление работы заведующему кафедрой		16.06.2020		
6	Защита на заседании ГЭК		22.06.2020		

Научный руководитель работы:

к.т.н. доцент кафедры ДПМ
Кузнецова Е.В.



«25» _____ мая _____ 2020 г.

Содержание

Введение.....	6
1. Создание и усовершенствование оболочек, адаптированных к аварийным ситуациям с высокой прочностью, коррозионной, термической и трещиностойкостью.....	9
<i>1.1. Применение циркониевых сплавов в атомной энергетике.....</i>	10
<i>1.2. Меры защиты оболочек ТВЕЛа в экстремальных условиях от разрушения.....</i>	12
2. Поведение оболочек ТВЭЛов в эксплуатационных условиях при наличии поверхностных несплошностей и дефектов.....	16
<i>2.1. Поверхностные дефекты в ТВЭЛах под влиянием экстремальных условий.....</i>	25
<i>2.2. Подходы к определению коэффициента интенсивности напряжений в цилиндрических оболочках и учёт возможных напряженных состояний при определении критических размеров дефектов в трубных заготовках.....</i>	31
3. Влияние экстремальных условий на преждевременное растрескивание циркониевых оболочек ТВЭЛов.....	35
<i>3.1. Определение коэффициента интенсивности напряжений в окрестностях дискообразного дефекта,</i>	

<i>располагающего на границе двух сред с различными физико-механическими свойствами.....</i>	40
3.2. Температурные напряжения вокруг осесимметричных дефектов на границе между покрытиями и материалами оболочки ТВЭЛа.....	46
Заключения по работе.....	50
Библиографический список.....	51

Введение

В последнее время актуальной является разработка технологий изготовления оборудования термоядерных реакторов. Новизна работы заключается в том, что: классические подходы механики разрушения применены к расчётам допустимых эксплуатационных нагрузок в тонкостенных оболочках твэлов (тепловыделяющих элементов); разработаны методики нахождения предельных размеров микродефектов, несплошностей в трубных заготовках с учётом коэффициента интенсивности напряжений для циркониевых сплавов, применяемых в атомной промышленности.

В связи с увеличением опасности повреждения и разрушения оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) при воздействии высоких уровней нагружений, температур и коррозионной среды в настоящее время в России и за рубежом активно ведутся работы по проверке и обоснованию возможности использования уже имеющихся сплавов циркония, а так же по разработке и исследованию новых модифицированных сплавов в качестве материала для изделий активной зоны реакторов в новых эксплуатационных условиях [1].

Многолетний опыт отечественного и зарубежного реакторостроения показал, что успех создания конструкционных материалов для оболочек твэлов достигается при обеспечении высокого уровня трех основных факторов: комплекса физических, механических и технологических свойств (включая свариваемость); радиационной стойкости; совместимости с теплоносителем и топливным материалом.

К оборудованию ядерных реакторов предъявляют повышенные требования по надежности, безопасности и

экологическим характеристикам в реакторах нового поколения и существенным повышением рабочих параметров оболочек твэлов (рабочие температуры 320 - 710 °С; достигаемые повреждающие дозы 140 - 180 с.н.а.; окружные напряжения до 80- 120 МПа; увеличение ресурса до 5 - 7 лет) [2].

ТВЭЛы являются прецизионными деталями, разрушение которых может привести к катастрофе. Так как ТВЭЛы подвержены процессу коррозионного растрескиванию под напряжением (КРН), связанный с образованием трещин на внутренней поверхности труб при одновременном воздействии на них механических напряжений, возникающих из-за радиационного роста топлива, и йода, выделяющегося из топлива в качестве одного из продуктов реакции деления. Поэтому необходимо разработать методики учёта влияния всех напряженных состояний на преждевременное растрескивание циркониевых труб.

Цель проекта - исследование актуальных проблем выхода из строя основных конструктивных тепловыделяющих элементов (оболочек твэлов), существующих в настоящее время при эксплуатации объектов атомной энергетики.

Задачи проекта:

- исследование физико-механических свойств материалов, применяемых при производстве оболочек твэлов и их влияния на поведение твэлов в рабочих режимах;
- построение математических моделей взаимосвязи между свойствами сплавов и прочностью оболочек твэлов при эксплуатации, а также в экстремальных условиях;
- оценка появления и распространения дефектов

(образование и рост питтингов) при эксплуатации оболочек твэлов.

Для реализации цели и решения задач в проекте предлагается использование следующие подходы и методы:

На первом этапе реализации проекта планируется фундаментальное исследование и детализированная систематизация современных способов производства покрытий оболочек твэлов, применяемых в атомной энергетике, а также провести оценку влияния механических свойств и структуры на поведение твэлов в эксплуатационных режимах. Далее на основании этих данных провести анализ влияния технологии производства и обработки оболочек твэлов на точность, прочность и трещиностойкость оболочек твэлов, при рабочих и критических нагрузках с учетом технологических остаточных напряжений. Такой алгоритм первого этапа позволит комплексно подойти к проблеме поведения оболочек твэлов в критических условиях и прогнозировать риски преждевременного разрушения основных конструктивных элементов реактора.

В рамках проекта планируется:

- исследование механических свойств и структуры материалов, применяемых при производстве покрытий оболочек твэлов и их влияния на поведение твэлов в эксплуатационных режимах;
- выполнить расчёт на прочность, определить значения осевых и окружных напряжений при рабочих нагрузках, реальных видах закрепления, а так же размерах оболочечных труб;

- построение математических моделей взаимосвязи между свойствами сплавов и прочностью оболочек твэлов при эксплуатации, а также в экстремальных условиях с учетом технологических остаточных напряжений;
- оценка появления и распространения дефектов (образование и рост питтингов) при эксплуатации оболочек твэлов;
- разработка методики оценки рисков при усложнении конструкции оболочки твэла за счет покрытий при наличии трещин;
- определить термические напряжения с учетом коэффициента трещиностойкости в тонкостенных оболочках;
- рассчитать допускаемые уровни критических напряжений в зависимости от глубины дефекта, а так же от соотношения дефектов в покрытии на поверхности оболочки твэла.

1. Создание и усовершенствование оболочек, адаптированных к аварийным ситуациям с высокой прочностью, коррозионной, термической и трещино- стойкостью

В настоящее время актуальным является изучение проблемы поведения оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов (ТВЭЛОВ) при длительной эксплуатации, а также в экстремальных условиях. Оболочечные трубки ТВЭЛА - это основной конструктивный элемент активной зоны реактора, поэтому к ним предъявляют высочайшие требования качества, обеспечить которое можно решением междисциплинарных задач технологии изготовления, прочности, трещиностойкости, надежности и долговечности. В проекте комплексно планируется решить ряд задач: исследовать влияние структуры и физико-механических свойств материалов, применяемых при производстве оболочек ТВЭЛОВ на поведение ТВЭЛОВ в рабочих режимах, а также в экстремальных условиях, с учетом влияния технологии производства и обработки на формирование остаточных напряжений; построить математическую модель взаимосвязи между свойствами сплавов и прочностью и трещиностойкостью оболочек ТВЭЛОВ при эксплуатации, а также в экстремальных условиях; разработать методику оценки рисков при усложнении конструкции оболочки ТВЭЛА за счет покрытий; решить задачу о целостности покрытия оболочек ТВЭЛА при сборке - проталкивании через дистанционирующую решетку и фреттинг-коррозии; оценить появление и распространение дефектов (образование и рост питтингов) при эксплуатации оболочек ТВЭЛОВ. Отрицательный опыт японской

аварии на АЭС "Фукусима" в 2011 году показал, что наиболее опасной при потере носителя оказалась паро-циркониевая реакция, после чего активизировались научно-исследовательские работы по созданию оболочек, адаптированных к аварийным ситуациям. Краткосрочным решением этой проблемы общепринято считают разработку новых покрытий оболочек твэлов, которые значительно повышают коррозионно-, термо- и трещиностойкость оболочек. Решение поставленных в рамках проекта задач позволит построить адекватные модели деформационного поведения оболочечных трубок с покрытиями, а значит прогнозировать и минимизировать риски преждевременного разрушения твэлов.

1.1. Применение циркониевых сплавов в атомной энергетике

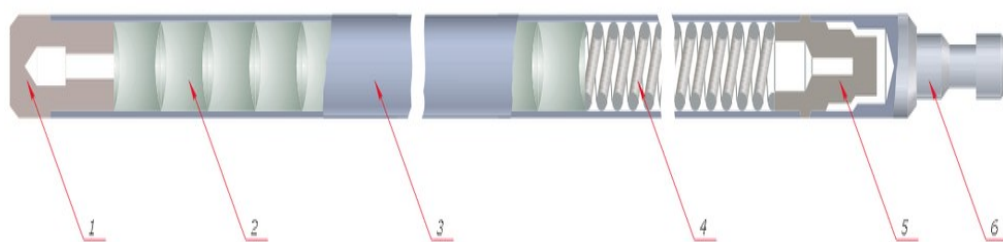


Рис.1.1 Устройства ТВЭЛа реактора большой канальной мощности (1-заглушка; 2-таблетки диоксида урана; 3-оболочка из циркония; 4-пружина; 5-втулка; 6-наконечник)

Таблица 1.1

Сплав	Химический состав, масс. доля, % (основа)
Э110	Zr-1%Nb (электролитический цирконий)
Э110М	Zr-1%Nb-0,13%O-0,12%Fe (электролитический цирконий)
Э110Г	Zr-1%Nb (губка циркониевая + йодидный цирконий)
Э635	Zr-1,3%Sn-0,3%Fe-1%Nb (электролитический цирконий)
Э635М	Zr-0,8%Sn-0,3%Fe-1%Nb (электролитический цирконий)

В таблице 1.1 представлены основные механические характеристики различных циркониевых сплавов применяемых в атомной промышленности [11]. Для них характерна относительно малая степень разупрочнения при повышении температуры. Предел текучести сплавов типа циркалой при повышении температуры от 20 до 300°C уменьшается практически в три раза, в то время как для сплавов циркония с ниобием, например Zr 2,5-% Nb и Zr - 3%Nb - 1% Sn, менее чем в два раза.

Таблица 1.2

Механические свойства при растяжении некоторых сплавов циркония

Сплав*	20°C			200°C			300°C			400°C			500°C		
	σ_0 кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ , %	σ_0 кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ , %	σ_0 кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ , %	σ_0 кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ , %	σ_0 кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ , %
Zr (йодидный)	22	8	45	14	5	55	12	4,5	55	11	4	60	—	—	—
Циркалой-2	48	31	22	25	15	34	20	10	35	17	7	36	15	7	36
Циркалой-4	49	31	28	30	18	32	21	12	35	19	10	36	15	8	36
Zr—0,5%Ta	30	13	40	20	8	42	16	6	42	14	5	45	—	—	—
Zr-2,5%Nb	45	28	25	32	22	24	30	20	23	27	18	22	—	—	—
Zr—5%Nb	65	—	20	57	—	17	53	—	17	48	—	16	—	—	—
Ожент-0,5	29	12	33	20	8	42	16	7	46	13	7	50	—	—	—
Zr—3%Nb—1%Sn	60	46	28	45	34	30	36	24	29	31	18	28	—	—	—
Zr—1,2%Cr—0,1%Fe**	56	40	13	—	—	—	36	—	11	—	—	—	27	24	13
ЦЗМ	50	35	15	37	24	16	30	19	16	26	17	17	20	13	18
Zr—0,6%Cu—0,5%Mo	48	31	25	31	20	33	26	16	34	22	12	39	17	11	62
Zr—1%Cu—0,6%Fe	47	36	20	—	—	—	28	23	19	—	—	—	20	17	40
Zr—0,4%Al—3,4%Nb	65	—	30	45	—	35	42	—	35	39	—	35	28	—	35
Zr—3,9%Al—0,5%Mo	98	—	18	80	—	20	74	—	25	70	—	35	56	—	40
Zr—5,3%Al—1,1%Mo	95	—	18	80	—	22	77	—	22	74	—	25	57	—	25
Zr-1,5%Al-1,1%Mo	91	—	20	70	—	25	63	—	22	63	—	25	53	—	35

Из циркониевых сплавов в атомной промышленности изготавливаются различные изделия, такие как особотонкостенные трубки для оболочек ТВЭЛов длиной до 4,5 м, диаметром 8–20 мм, со стенкой толщиной 0,3–1 мм; тонкостенные трубы для каналов водяных и кипящих реакторов длиной до 8 м, диаметром 80–130 мм, со стенкой толщиной 3–6 мм; прутки диаметром 8–20 мм для пробок-заглушек ТВЭЛов и прутки больших диаметров для массивных концевых изделий кассет-сборок; листы толщиной 1–4 мм для изготовления кожухов кассет и каландровых труб; листы и ленты толщиной 0,3–1,5 мм для дистанционирующих решеток и других деталей кассет; проволока для тех же целей, прутки и трубы разных размеров для крепления и подвески ТВЭЛов в кассетах-сборках, а также для других деталей, находящихся в активной зоне реактора [11].

Поскольку оболочечные трубки имеют стенки толщиной менее 1 мм, а в отдельных конструкциях ТВЭЛов до 0,35–0,4 мм, внутренние дефекты в виде неметаллических включений, плен, засоров, ликвационных неоднородностей, трещин и т. п. могут быть допущены в размерах не более 5–10% толщины стенки. Поэтому все трубки тщательно проверяют ультразвуковым или другими методами, применяемыми в неразрушающей дефектоскопии.

1.2. Меры защиты оболочек ТВЭЛа в экстремальных условиях от разрушения

Решения задач по усовершенствованию и созданию оболочек, адаптированных к аварийным ситуациям с

высокой прочностью, коррозионной, термической и трещино-стойкостью, относятся к важным вопросам стратегии научно-технологического развития РФ – противодействие техногенным угрозам в области проблем противорадиационной защиты, ядерной и радиационной безопасности.

В настоящее время повысился интерес к изучению проблемы поведения оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов (ТВЭлов) при длительной эксплуатации, а также в критических ситуациях. Основными материалами для производства ТВЭлов являются циркониевые сплавы, нержавеющая сталь и алюминиевые сплавы, удовлетворяющие требованиям - высокой коррозионной и термической стойкостью, а также низким сечением поверхности захвата тепловых нейтронов. Оболочечные трубки ТВЭла, обеспечивают изоляцию ядерного топлива от охлаждающей жидкости и ее загрязнения - это главный конструктивный элемент активной зоны реактора. Поэтому к ТВЭлам предъявляют высочайшие требования качества, прочности, трещиностойкости, надежности и долговечности. Основными сплавами российской разработки являются сплавы Э110 - для оболочек и заглушек ТВЭлов, а также для дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторов; Э635 - для труб направляющих каналов для уголков жесткости в ТВС; Э125 - для канальных труб реактора; аналогичные сплавы циркалой-2 и циркалой. После аварии на японской АЭС "Фукусима" в 2011 году, были названы причины разрушения ТВЭлов - это высокотемпературное окисление (паро-циркониевая реакция

при температуре свыше 900 0С), происходит экзотермическая реакция с выделением энергии и образованием большого количества водорода, который поглощает оболочка твэла, что приводит к ее охрупчиванию, в результате которого твэл может разрушиться полностью, что недопустимо для таких ответственных элементов конструкции реактора, выход из строя, которых, приводит к катастрофическим последствиям.

Решениями этой проблемы в современных исследованиях считается несколько направлений:

- радикальное направление (долгосрочная перспектива) – замена циркония материалами, у которых при реакции с водяным паром меньше энерговыделение и наработка водорода, например, сплавы железа, керамики, карбид кремния. В этой связи перспективным считается создание двух- и трехкомпонентных оболочек твэлов.
- консервативное направление (краткосрочное решение), основанное на изменении структурно-фазового состояния циркониевых сплавов с целью повышения коррозионной стойкости, а также разработка покрытий из металлов, сплавов и композитной керамики для защиты оболочек твэлов. В настоящее время начаты исследование и экспериментальные образцы запущены в эксплуатацию в РФ оболочек твэлов с хромовыми покрытиями, МАХ-фазными сплавами (сложные соединения карбиды и нитриды -Х) переходных металлов (например, хрома, циркония и титана - М) с алюминием и кремнием (А). Необходимо отметить, что к сожалению несмотря на очевидные преимущества – устойчивость к высокотемпературному окислению,

покрытия имеют критические недостатки – большее сечение захвата нейтронов, низкие значения вязкости разрушения и пластичности. Кроме того, описанные в литературе способы производства покрытий – это в основном технологии наплавки слоев на оболочки твэлов с применением 3D-технологий. По сути это технология литья, которая сопровождается различными структурно-фазовыми неоднородностями (ликвации, неоднородность размеров зерна ит.д.)

Выше изложенные проблемы необходимо решать в ближайшее время, в том числе в рамках темы заявленного проекта «Исследование влияния структурно-фазового состояния, химико-механических свойств и технологических параметров изготовления покрытий оболочек твэлов ядерных реакторов на прочность, пластичность и трещиностойкость в штатных и аварийных условиях работы».

Результаты исследовательской работы по тематике заявки изложены в публикациях руководителя проекта и сотрудников кафедры ДПМ [23-26].

В работе [27] представлен обзор методов повышения коррозионной стойкости твэлов тепловых и быстрых ядерных реакторов с использованием модификации поверхности и нанесения покрытий. Показаны результаты испытаний, проведенных в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», покрытий на оболочках твэлов из стали ЭП-823-Ш, рассматриваемой для использования в РУ БРЕСТ-ОД-300, и из циркониевого сплава Э110. Представлены результаты коррозионных испытаний экспериментальных образцов оболочек твэлов с покрытиями Al,

Al₂O₃, Cr в жидком свинце при высоком содержании кислорода и температуре 650–720 °С (для стальных оболочек) и на воздухе при температуре 1100 °С (для циркониевых оболочек), которые показали практически полное подавление коррозии. Выявлены физические барьеры применимости покрытий в качестве защитных слоёв на оболочках твэлов: фреттинг-коррозия оболочек твэлов, проблема низкой жаропрочности оболочек твэлов, проблема высокого остаточного энерговыделения твэлов.

В статье [28] Заведующий кафедрой физических проблем материаловедения НИЯУ МИФИ Борис Калинин сформулировал свое экспертное мнение о последних разработках и перспективных направлениях в области создания толерантного топлива. В работе подробно описаны проблемы создания и использования современных твэлов с защитными покрытиями.

Способы производств защитных покрытий – это еще один раздел исследований активно развивающийся в настоящее время. На пример, устройства и способы для нанесения покрытий оболочек тепловыделяющих элементов, описанные в работе [29].

Вопросы применения и разработки толерантного топлива и защитных покрытий оболочек твэлов, устойчивых к разрушению при аварийных ситуациях рассматриваются в работах [30, 31]. Результаты испытаний циркониевых оболочек твэлов с покрытиями из различных сплавов CrN, TiAlN, AlCrN представлены в работе [32]. Также открытым остается вопрос об управлении нанокристаллической структурой и свойствами многофазных композитных металл-углеродных покрытий на

базе карбидов с целью повышения термо- и коррозионной стойкости оболочек ТВЭЛов [33, 34].

Необходимо отметить, что вопросы и задачи по заявленной тематике имеют большой международный интерес, например, с 2018 года ежегодно проводится Международная конференция МАГАТЭ по физической ядерной безопасности. В 2020 году на конференции было зарегистрировано 1600 экспертов из 134 государств. В состав российской делегации вошли представители МИД России, Госкорпорации «Росатом» и её организаций, Ростехнадзора и ФТС России.

Такое пристальное внимание к вопросам заявленным в проекте, подтверждает актуальность и необходимость скорейшего решения поставленных задач.

2. Поведение оболочек ТВЭЛов в эксплуатационных условиях при наличии поверхностных несплошностей и дефектов

Как упоминалось ранее, для оболочек ТВЭЛов используют циркониевые сплавы. Из них изготавливают особотонкостенные трубки длиной до 4,5 м, диаметром 8–20 мм, со стенкой толщиной 0,3–1 мм; тонкостенные трубы для каналов водо-водяных и кипящих реакторов длиной до 8 м, диаметром 80–130 мм, со стенкой толщиной 3–6 мм.

Поскольку оболочечные трубки имеют стенки толщиной менее 1 мм, а в отдельных конструкциях ТВЭЛов до 0,35–0,4 мм, внутренние дефекты в виде неметаллических включений, плен, засоров, ликвационных неоднородностей, трещин и т. п. могут быть допущены в размерах не более 5–10% толщины

стенки. Поэтому все трубки тщательно проверяют ультразвуковым или другими методами, применяемыми в неразрушающей дефектоскопии.

При эксплуатации в циркониевых оболочках ТВЭЛов после достаточно глубокого выгорания топлива и при резком увеличении мощности реакторов (скачках мощности) обычно протекает коррозионное растрескивание под напряжением (КРН).

Процесс КРН оболочек ТВЭЛов связан с образованием трещин на внутренней поверхности труб при одновременном воздействии на них механических напряжений, возникающих из-за радиационного роста топлива, и йода, выделяющегося из топлива в качестве одного из продуктов реакции деления. Дефекты развиваются по толщине стенки трубы вплоть до их выхода на поверхность. Образование сквозных трещин приводит к разгерметизации оболочек ТВЭЛов [1].

Рабочее внутреннее давление в ТВЭЛах достигает 8-16 МПа, во избежание преждевременного выхода из строя (изменение размера, прямолинейности) и крайних проявлений – разрушение, необходим прочностной расчёт тонкостенной оболочки под внутренним давлением.

В практических применениях мы часто встречаемся с задачами, где круговая цилиндрическая оболочка подвергается действию сил, распределённых симметрично, относительно оси цилиндра. Одной из актуальных задач современной техники является прочность цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления (газопроводы, нефтепроводы и т.п.).

Рассмотрим цилиндрическую оболочку постоянной толщины под действием равномерного внутреннего давления, рис.2.1 [15].

Торцы оболочки защемлены, следовательно, лишены возможности смещаться, и потому у торцов возникнет местный изгиб. Уравнение радиального прогиба оболочки

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Eh}{R_3^2} w = p, \quad (2.1)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ - цилиндрическая жесткость, Н*см; E - модуль упругости материала, кгс/см²; h - толщина оболочки, см; R_3 - радиус срединной поверхности, см; p - внутреннее давление, Н/см²; μ - коэффициент Пуассона. Введя обозначение

$$\beta = \frac{Eh}{R_3^2 D} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R_3^2 h^2}}, \text{ получаем}$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{p}{D}, \quad (2.2)$$

Очевидно, величина β измеряется в см⁻¹, поэтому переменная

$$\xi = \beta x,$$

(2.3)

будет безразмерной. Примем ее за новую независимую переменную.

Поскольку

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} = \beta^4 \frac{d^4 w(\xi)}{d\xi^4} = \frac{3(1-\mu^2)}{R_3^2 h^2} \frac{d^4 w(\xi)}{d\xi^4}, \quad (2.4)$$

то уравнение (2.2) примет вид

$$\frac{d^4 w(\xi)}{d\xi^4} + 4w(\xi) = \frac{4pR_3^2}{Eh}, \quad (2.5)$$

Легко проверить, что частным решением этого уравнение будет

$$w_{\text{част}} = \frac{p R_3^2}{Eh}, \quad (2.6)$$

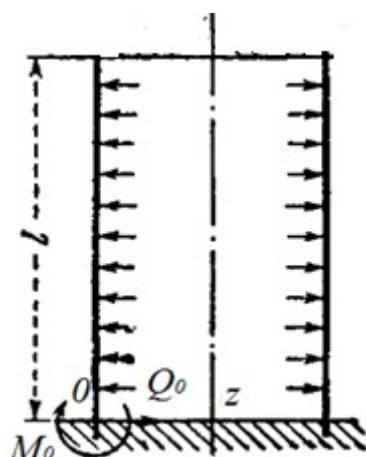


Рис. 2. 1. Силовые факторы в сечениях цилиндрической оболочки

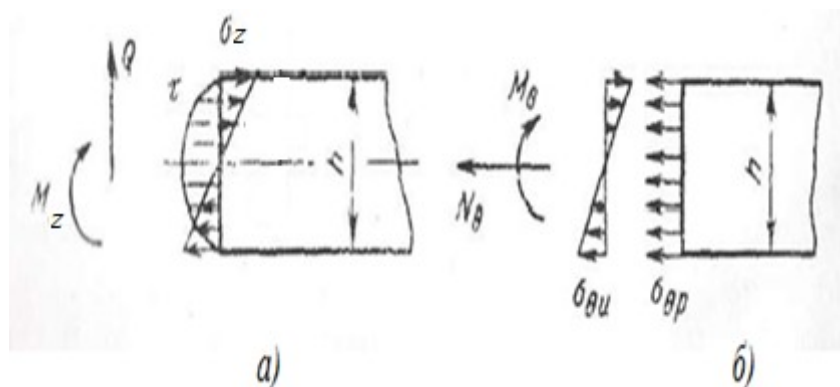


Рис. 2. 2. Напряжения в сечениях оболочки:
а - в поперечном; б - в продольном

Общее решение будет в виде

$$w = \frac{p R_3^2}{Eh} + \frac{1}{2\beta^3 D} e^{-\xi} [\beta M_0 (\cos(\xi) - \sin(\xi)) + Q_0 \cos(\xi)], \quad (2.7)$$

Воспользовавшись известными дифференциальными зависимостями:

$$\theta = \frac{dw}{dx} = \beta \frac{dw}{d\xi}; \quad M = D \frac{d^2 w}{dx^2} = D \beta^2 \frac{d^2 w}{d\xi^2}; \quad Q = D \frac{d^3 w}{dx^3} = D \beta^3 \frac{d^3 w}{d\xi^3}, \quad (2.8)$$

Найдём окончательно

$$\theta = \frac{1}{2\beta^2 D} e^{-\xi} [2\beta M_0 \cos(\xi) + Q_0 (\cos(\xi) + \sin(\xi))],$$

$$M = \frac{1}{\beta} e^{-\xi} [\beta M_0 (\cos(\xi) + \sin(\xi)) + Q_0 \sin(\xi)], \quad (2.9)$$

$$Q = e^{-\xi} [Q_0 (\cos(\xi) - \sin(\xi)) - 2\beta M_0 \sin(\xi)].$$

Причем, как и момент M_0 , так и перерезывающая сила Q_0 определяются из условий, что, как и прогиб, так и наклон на защемленном торце $x=0$ должны обращаться в нуль, следовательно

$$M_0 = \frac{p}{2\beta^2}, Q_0 = \frac{-p}{\beta}. \quad (2.10)$$

Максимальные напряжения определяются по формулам

$$\sigma_{zmax} = \frac{6M}{h^2}, \quad \sigma_{\theta max} = \pm \frac{6M_1}{h^2} + \frac{N_1}{h}, \quad (2.11)$$

где $M_1 = \mu M$, $N_1 = \frac{Eh}{R_3} w(x)$ – окружное усилие

Жёсткое закрепление по торцам в оболочках ТВЭЛа является предельным, в реальности между оболочкой и дистационирующей решёткой присутствуют зазоры, поэтому расчёт эксплуатационных напряжений можно считать справедливым с применением безмоментной теории цилиндрических оболочек под давлением на достаточном расстоянии от места закрепления. На рис. 2.3 представлен расчётные зависимости окружного и осевого напряжений по длине оболочки при толщине стенки $h=0,7$ мм и радиуса $R_3=4,215$ мм для внутреннего давления $p=8,2$ МПа, $E=83000$ МПа, $\mu=0,32$. Подобная задача рассмотрена в работе [15] для стальной трубки ($E=2 \cdot 10^6$ кгс/см², $\mu=0,3$), $R=40$ мм, толщина стенки $h=2$ мм, которая находится под действием равномерного внутреннего давления $p=25$ кгс/см² и краевых моментов $M=3,3$ кгс*см/см.

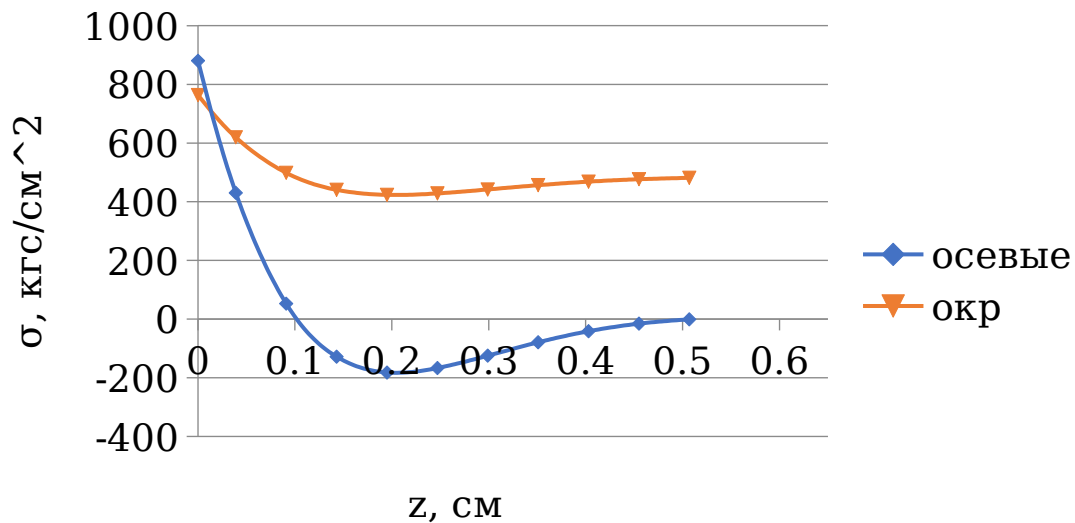


Рис. 2. 3. Изменение по длине оболочки максимальных осевых и окружных напряжений

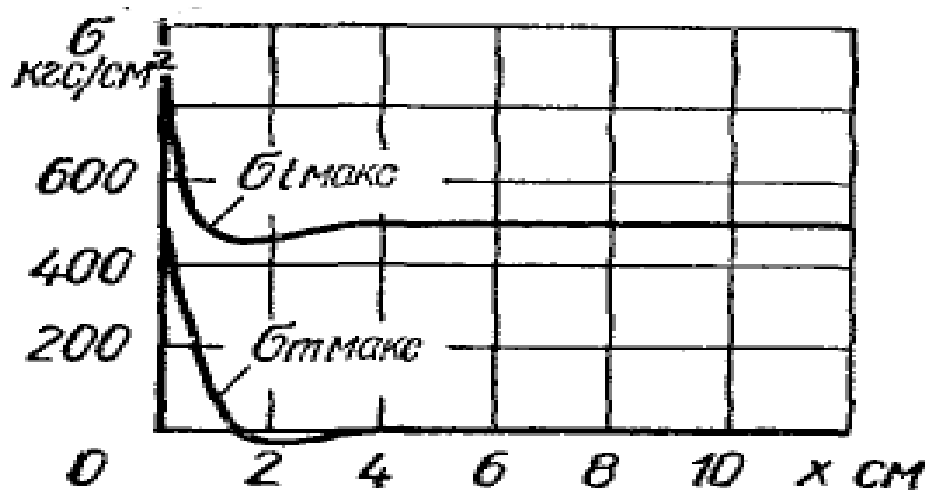


Рис. 2. 4. Изменение по длине оболочки максимальных осевых и окружных напряжений для стали[15].

На рис. 2. 3 и 2. 4 показано, что приложенные к краю оболочки изгибающие моменты M_0 и поперечные силы Q_0 оказывают влияние на напряженное состояние оболочки только в непосредственной близости от места их приложения. На достаточно же удалении от края напряжения практически совпадают с теми, которые получаются в результате расчёта

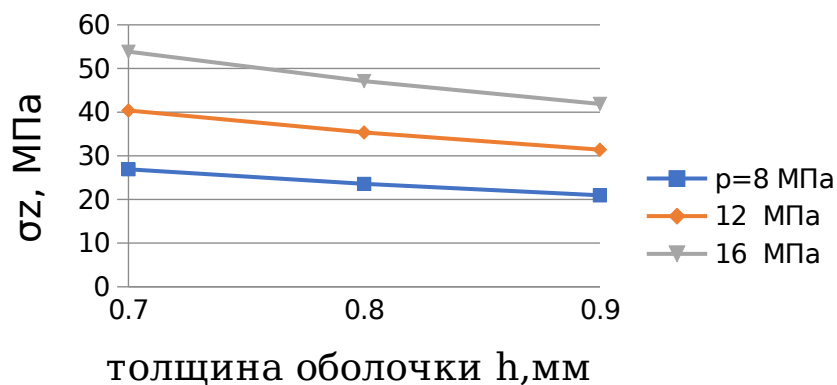
оболочки по безмоментной теории [15]. Выражения для определения окружного и осевого напряжений соответственно:

$$\sigma_{\theta} = \frac{pR_3}{h}, \quad (2.12)$$

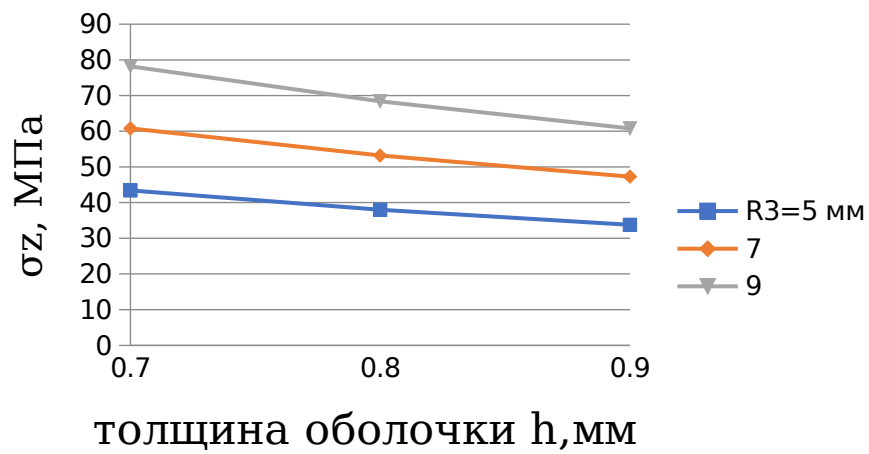
$$\sigma_z = \frac{pR_3}{2h}, \quad (2.13)$$

где R_3 – радиус срединной поверхности, h – толщина стенки оболочки.

На рисунке 2. 5 и 2.6 представлены зависимости эксплуатационных осевых и окружных напряжений, соответственно, для оболочек с толщиной стенки в диапазоне $h=0,7\div 0,9$ мм, со средним радиусом $R_3 = 5\div 10$ мм. Внутреннее давление в оболочках при эксплуатации составляет от 80 до 160 атм., что в обозначениях системы СИ можно задать в диапазоне $p=8\div 16$ МПа.

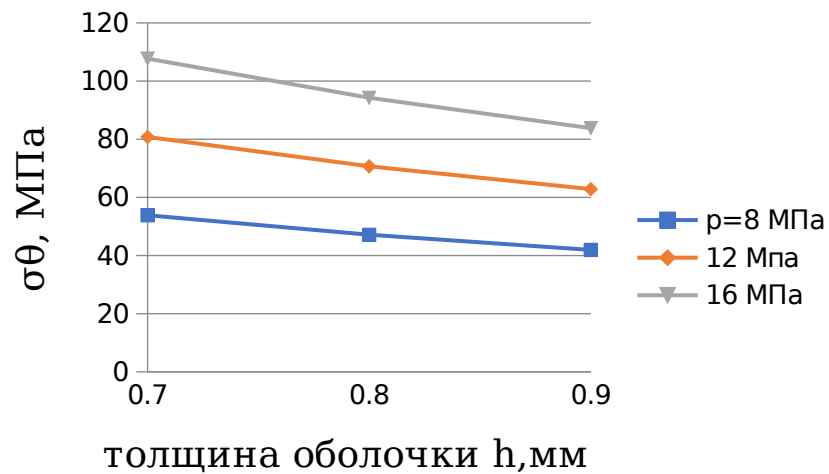


а)

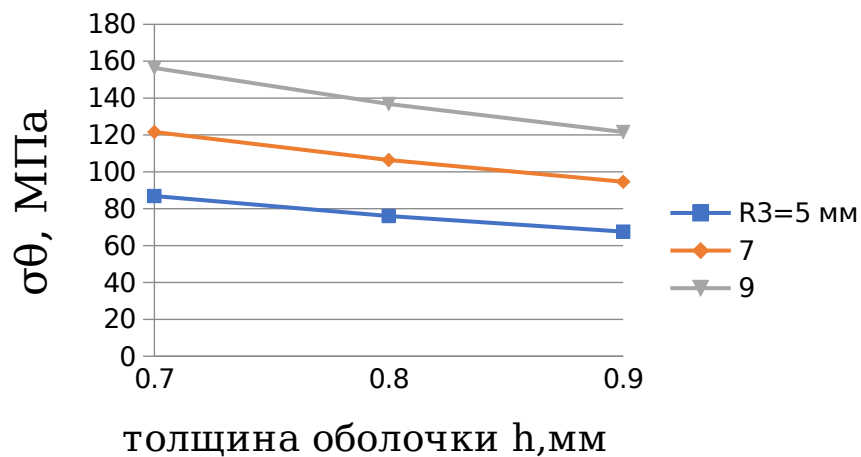


б)

Рис.2.5. Зависимость осевых эксплуатационных напряжений от толщины стенки оболочки а - при разном давлении, б - при различных средних радиусах оболочки



а)



б)

Рис.2.6. Зависимость окружных эксплуатационных напряжений от толщины стенки оболочки а - при разном давлении, б - при различных средних радиусов оболочки.

Из графиков видно, что при увеличении давления окружных и осевых напряжениях пропорционально возрастают. Подобная ситуация складывается при увеличении среднего радиуса оболочки. И напротив, при увеличении толщины стенки оболочки эксплуатационные напряжения уменьшаются.

Определим допускаемое давление внутри оболочки из условия

$$\sigma_{\theta} < [\sigma], \quad (2.14)$$

где $[\sigma]$ – предел прочности материала оболочки.

После подстановки получаем

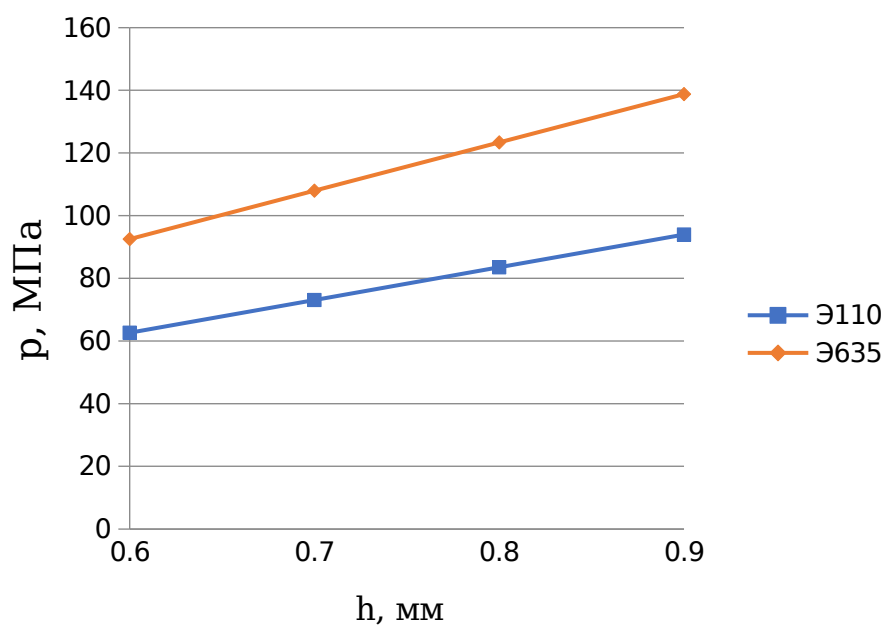
$$\frac{pR_3}{2h} < [\sigma], \quad (2.15)$$

$$p < \frac{2h[\sigma]}{R_3}, \quad (2.16)$$

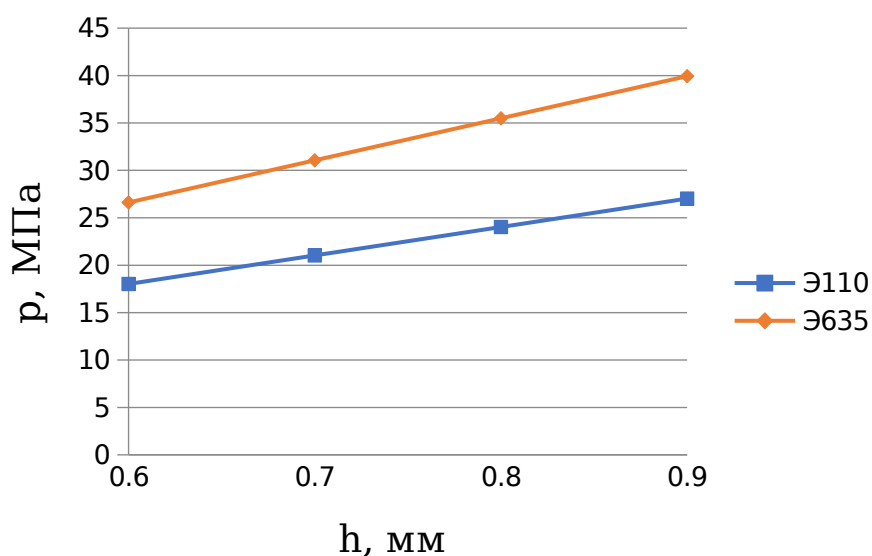
Рассчитаем допустимые напряжения для оболочки со средним радиусом $R_3 = 4,215$ мм и $14,65$ мм с толщиной стенки

$h=0,6\div 0,9$ мм, с для циркониевых сплавов Э110 и Э635, соответственно $[\sigma]=\sigma_{\text{в}}=440$ МПа и $[\sigma]=\delta\sigma_{\text{в}}=650$ [1].

Из рис. 2.7 видно, что на величину допускаемого внутреннего давления существенно влияет прочностные свойства материала. Чем больше предел прочности материала и толщина стенки оболочки, тем большее давление может выдержать оболочка.



а)



б)

Рис. 2.7. Зависимость внутреннего давления оболочки из сплавов Э110 и Э635 от толщины стенки оболочки при средних радиусах а - $R_3=4,2$ и б - $R_3=14,65$ мм.

2.1. Поверхностные дефекты в ТВЭЛх под влиянием экстремальных условий

Помимо эксплуатационных нагрузок – внутреннего давления и способов закрепления оболочек ТВЭЛов в сборке необходимо отметить, что специфика эксплуатации подразумевает особо агрессивные высокотемпературные среды, которые существенно влияют на прочность и долговечность таких изделий.

При создании циркониевых оболочек для новых эксплуатационных режимов актуальной проблемой является обоснование их надежности в условиях возможных аварийных ситуаций. В первую очередь это аварии с потерей теплоносителя (аварии типа LOCA) когда теплоноситель уходит из активной зоны из-за образования "течи" в контуре реактора. В этом случае оболочки ТВЭЛов разогреваются до высоких температур (800 - 1200 °С) и интенсивно окисляются в водяном паре. Залив активной зоны водой при срабатывании системы аварийного охлаждения приводит к резкому охлаждению окисленных оболочек - ТВЭЛов. В результате этих процессов изменяются теплофизические и механические свойства циркониевых сплавов, существенно ухудшается пластичность оболочек[1].

Оболочки ТВЭЛов, охрупченные в результате высокотемпературного окисления и структурно-фазовых превращений, при охлаждении могут разрушаться из-за термических напряжений (термоудар), а также при динамических нагрузках, возникающих при выгрузке ТВЭЛов из активной зоны реактора, их транспортировке и размещении в хранилище. Вследствие этого определение механизмов и причин охрупчивания оболочек твэлов, выявление влияния на

них химического состава циркониевых сплавов при возможном развитии аварии типа LOCA в новых эксплуатационных условиях является важной задачей.

В работе [1] проведены исследования по разработке новых высокочувствительных методов КРН-испытаний, количественных методов анализа структуры и изломов труб. Для исследования процесса КРН оболочек ТВЭЛов была разработана высокочувствительная методика локальных КРН — испытаний циркониевых оболочечных труб (диаметром 9,13мм и толщиной стенки 0,7мм) при комнатной температуре с граничной зоной контакта металла ("пятно" диаметром 5 мм) с коррозионной средой (1%-ный раствор йода в метаноле) и измерением акустической эмиссии (АЭ) от образующихся коррозионных дефектов. Сущность методики состоит в том, что образец трубы механически нагружается в специально разработанном устройстве с помощью оправки в упругой области напряжений ($\sim 0,8 \sigma_{0,2}$, что соответствует ~ 200 МПа) с установленной на него микрованной с коррозионным раствором. После испытаний проводились количественные измерения коррозионной повреждаемости в месте воздействия коррозионной среды на образец: на каждом образце подсчитывались количество и размеры образовавшихся коррозионных дефектов (питтингов, трещин, зон зернограничного разрушения). КРН-испытаниям подвергали оболочечные трубы из циркониевых сплавов Э110, Э635 номинального и модифицированного химических составов с различной прочностью (см. таблицу № 2.1).

Исследовали три партии труб из сплава Э110 (Zr - 1 % Nb] в одинаковом структурно-фазовом состоянии (в состоянии

поставки), различающиеся по суммарному содержанию примесей (Ni, Al, Si, P, Ca, K, Cl, Na, Mg): 1-35 ppm (единица измерения концентрации, миллионная доля) ; 2-70 ppm; 3 - 140 ppm.

Известно, что причиной коррозионного растрескивания оболочек в реакторе является йод, находящийся в газообразном состоянии, поэтому большинство исследований оболочек ТВЭЛов выполнено в среде паров йода, а так же наиболее близко воспроизводящей процессы КРН в среде паров йода, является раствор йода в метаноле (далее - метанол-йод). Использование метанола-Йода обеспечивает создание более жестких условий испытаний, позволяет сократить длительность и повысить чувствительность КРН-испытаний. При испытаниях в среде метанола-йода для всех исследованных сплавов и состояний труб характерна одинаковая последовательность стадий процесса КРН:

1. Растворение оксидной пленки и растравливание поверхности труб. Локальное растравливание поверхности металла происходит на глубину до 10-15мкм на отдельных участках материала диаметром 50 - 500 мкм через 0.8 ч после начала испытаний. Такие растравы поверхности представляют собой плоские поверхностные дефекты, глубина которых намного меньше их ширины или длины, см.рис. 2.8(а).

2. Образование и развитие точечных коррозионных дефектов — питтингов. Питтинги представляют собой "ямки" круглой формы на поверхности материала. Через 8 ч испытаний глубина питтингов составляет 30 - 50 мкм, диаметр 10 - 100 мкм, а их количество 1 - 150 штук в "пятне" диаметром 5 мм, см.рис. 2.8(б).

3. Зарождение и рост на питтингах единичных трещин на поверхности. Такие трещины распространяются по межзеренному механизму преимущественно в осевом направлении трубчатого образца. Раскрытие трещин на поверхности после испытаний и снятия нагрузки достигает 3 мкм, а длина - до 1 мм, см.рис. 2.8(в).

4. Зарождение и рост на питтингах множественных зернограничных трещин в виде объемной сетки трещин внутри материала (так называемые зоны зернограничного разрушения — ЗЗР, рис. 2.8). Эта стадия протекает параллельно со стадией 3. На поперечных шлифах труб, как правило, ЗЗР имеют округлую симметричную форму и достаточно четкий фронт. ЗЗР имеют различную объемную геометрическую конфигурацию — от простой (в виде сфероидов) до сложной. За 8 ч испытания ЗЗР развивается на глубину до 500 мкм. Последующее разрушение протекает одновременно по нескольким механизмам, но часто с преобладанием некоторых из них, см. рис. 2.9. Как правило, питтинго-образование, преобладающее на начальной стадии коррозионного разрушения, практически полностью подавляется образованием поверхностных и объемных трещин на конечной стадии разрушения.

Таблица 2. 1
Химический состав и механические свойства
циркониевых труб

Сплав	Химический состав	Состояние сплава	Тип упрочнения	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
				МПа		
Э635	Zr – 1Nb – 0,3Fe – 1,3Sn (1)	Нагартованное	Д	650	580	21
Э635	Zr – 1Nb – 0,3Fe – 1,3Sn (2)	Частично рекристаллизованное ($n = 60 \%$)	Д, ТВР	585	545	23
Э110	Zr – 1Nb (3)	Рекристаллизованное	ТВР	370	340	32
Э635	Zr – 1Nb – 0,3Fe – 1,3Sn (4)		ТВР, ДИ	490	450	27
Циркалой-4	Zr – 1,5Sn – 0,2Fe – 0,1Cr – 0,10 (5)		ТВР, ДИ	520	470	26
Э110	Zr – 1Nb – 0,070 (6)		ТВР	440	405	28
Э110М	Zr – 1Nb – 0,130 – 0,12Fe (7)		ТВР, ДИ	505	460	27

Обозначения: Д — деформационное упрочнение, ТВР — твердорастворное упрочнение, ДИ — дисперсионное упрочнение (частицы второй фазы).

Примечания: 1. В скобках указано условное обозначение сплавов.

2. Механические испытания сплавов проводили при 20 °С.

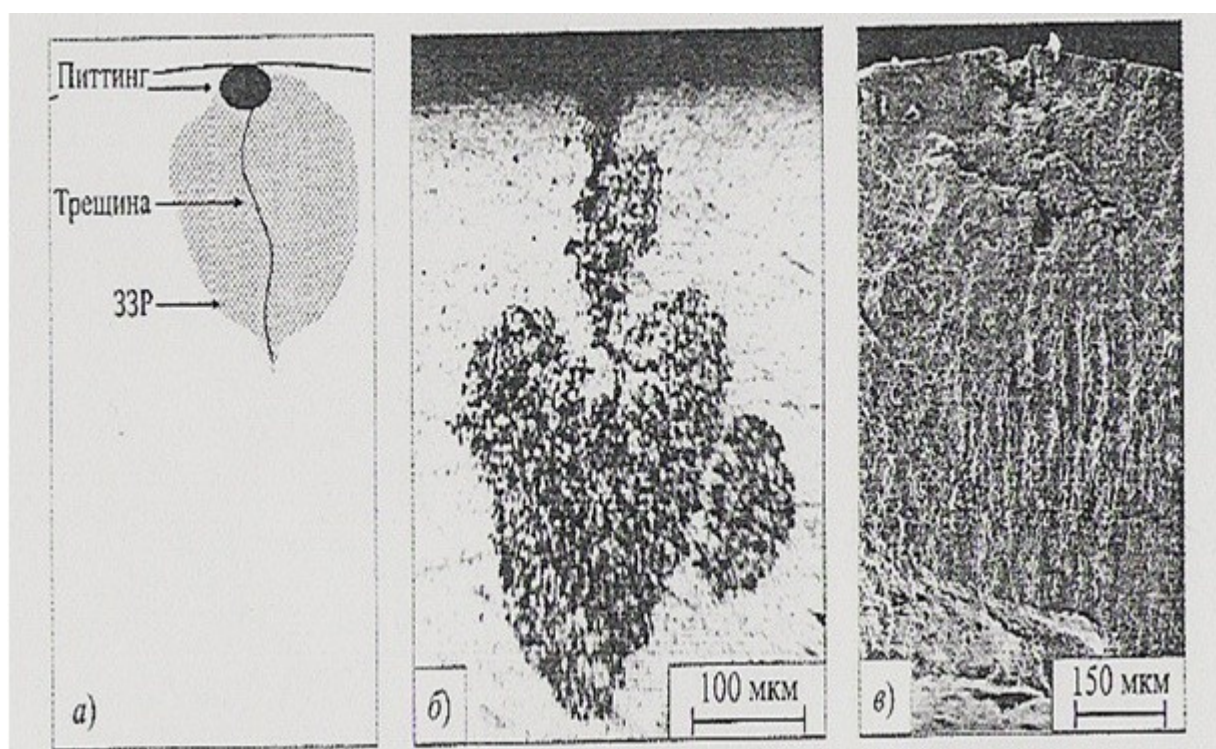


Рис. 2.8 Схема коррозионного разрушения – а, структура – б и излом – в в поперечном направлении циркониевых оболочечных труб при испытаниях на коррозионное растрескивание под напряжением в растворе йод-метанола.

Описанная последовательность событий процесса КРН

характерна для всех испытанных состояний труб. Однако продолжительность отдельных стадий процесса разрушения (время наступления первой и второй стадии) зависит от структуры, прочности и других факторов и является критерием оценки склонности труб к КРН при сравнительных испытаниях.

Основным фактором, определяющим КРН оболочек, является прочность сплавов. КРН-испытания циркониевых труб с различной прочностью (см. таблицу 2.1) показали, что время до начала активного коррозионного разрушения τ_2 уменьшается с увеличением прочности труб (рис. 2.10). В более прочных трубах, количество трещин больше и уменьшается при снижении прочности (рис. 2.10). Повышение прочности труб из сплава Э635 за счет деформационного упрочнения (состояния 1 и 2, см. таблицу 2.1) приводит к еще большему снижению времени до разрушения τ_2 и увеличению трещинообразования (рис. 2.10). Из общей зависимости выпадают трубы из сплава Э110М (состояние 7, см. таблицу №2.1). В них образуется мало длинных трещин. В целом при увеличении предела текучести сплавов от 340 до 580 МПа время до разрушения уменьшается в 3,6 раза, а количество трещин возрастает в 5 раз.

Таким образом, независимо от способа упрочнения повышение прочности труб приводит к снижению их сопротивляемости КРН за счет увеличения трещинообразования. Деформационное упрочнение сильнее снижает сопротивляемость КРН, чем твердорастворное, за счет активизации трещинообразования из-за большей исходной дефектности материала труб.

При эксплуатации в циркониевых оболочках ТВЭЛов после достаточно глубокого выгорания топлива и при резком увеличении мощности реакторов (скачках мощности) обычно протекает коррозионное растрескивание под напряжением

Процесс КРН оболочек ТВЭЛов связан с образованием трещин на внутренней поверхности труб при одновременном воздействии на них механических напряжений, возникающих из-за радиационного роста топлива, и йода, выделяющегося из топлива в качестве одного из продуктов реакции деления. Дефекты развиваются по толщине стенки трубы вплоть до их выхода на поверхность. Образование сквозных трещин приводит к разгерметизации оболочек ТВЭЛов

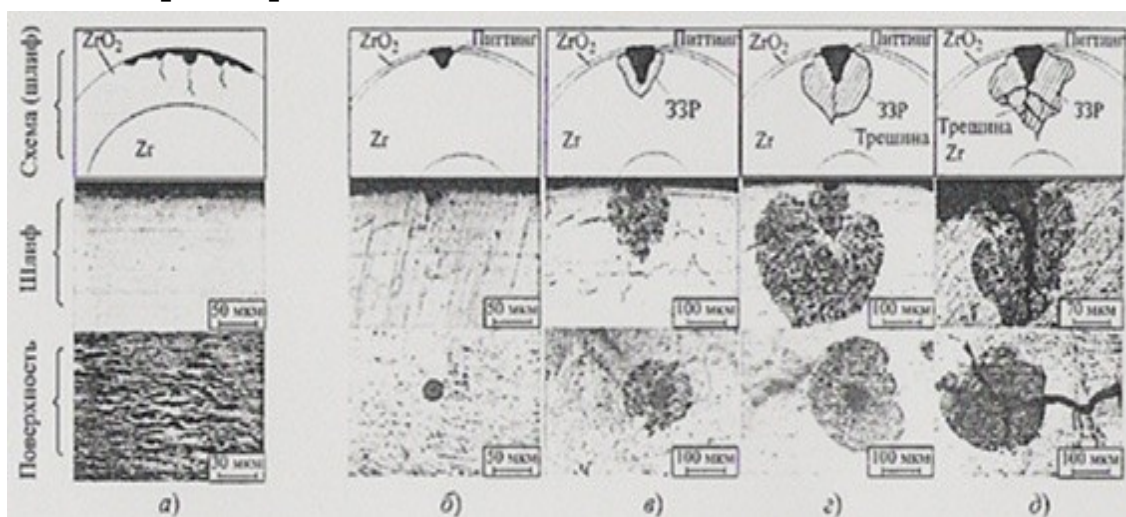


Рис. 2.9. Коррозионные дефекты (а-д) при КРН-испытаниях оболочечных труб: а - растворение оксидной пленки и растравливание поверхности; б - образование и рост питтингов; в - рост питтингов, образование зон зернограничного растрескивание (ЗЗР) и поверхностных трещин; г - рост ЗЗР и поверхностных трещин; д - рост и развитие ЗЗР и поверхностных трещин.

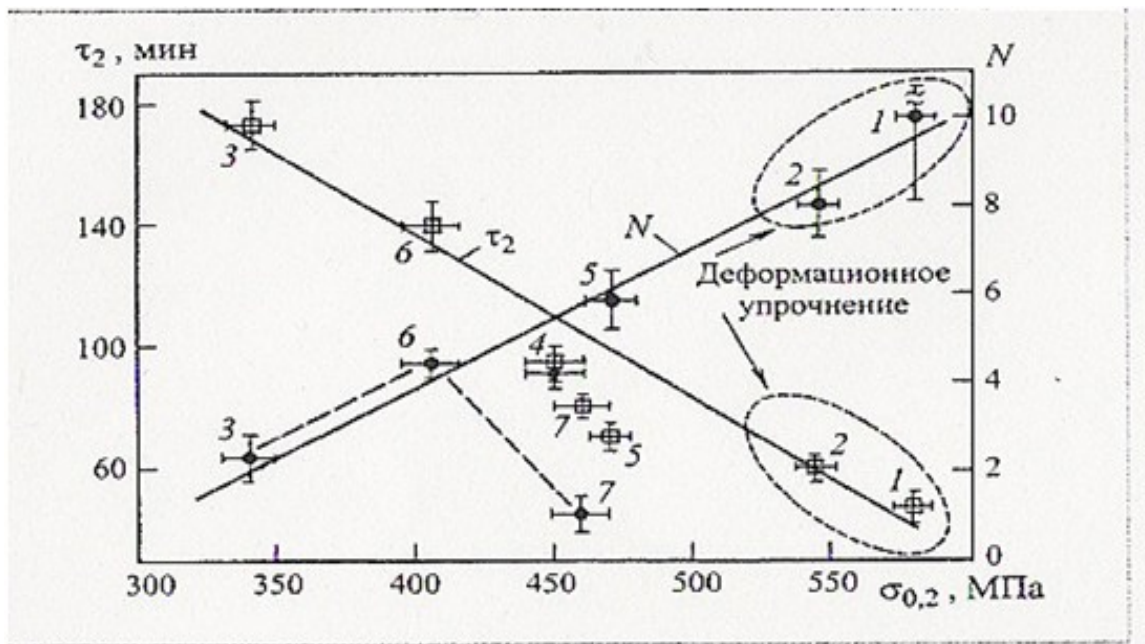


Рис. 2.10 Зависимость времени до разрушения τ_2 и трещинообразования (N - количество трещин) в трубах из различных циркониевых сплавов от предела текучести. Цифры у значков: 1-сплав Э635 после холодной деформации; 2,4 - сплав Э635 после рекристаллизации со степенью $n_{рек}=60$ и 100% соответственно; 3,5,6,7 - сплавы после рекристаллизации с $n_{рек}=100\%$ (3-Э110; 5-Циркалой-4; 6-Э110(700 ppm O); 7-Э110М)

2.2. Подходы к определению коэффициента интенсивности напряжений в цилиндрических оболочках и учёт возможных напряженных состояний при определении критических размеров дефектов в трубных заготовках

В работе [22] рассмотрены известные подходы к определению коэффициента интенсивности напряжения для различных деталей, форм, видов трещин и нагрузок. Рассмотрим цилиндрическую оболочку с внешней несквозной трещиной, подобно питтингов (см. раздел 2.1) рис. 2.11.

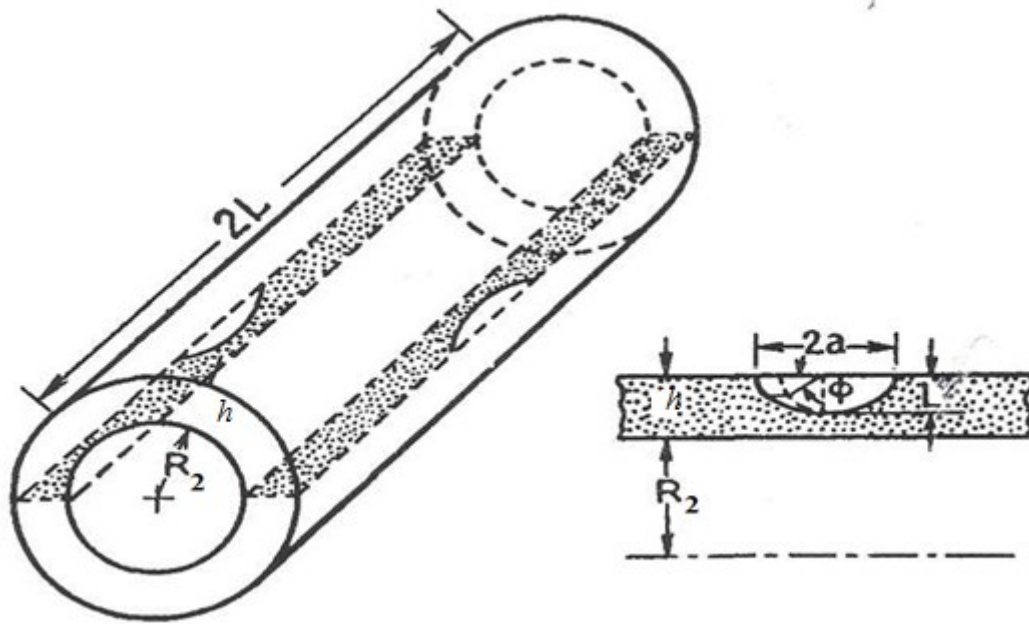


Рис. 2.11. Полуэллиптическая поверхностная трещина в цилиндрических оболочках.

Коэффициент интенсивности напряжения был рассчитан в следующем виде

$$K_1 = \sigma_\theta \cdot \left(\frac{\pi \cdot l}{Q} \right)^{1/2} \cdot F_i \left(\frac{l}{a}, \frac{l}{h}, \frac{h}{R_2} \right), \quad (2.17)$$

где σ_θ - среднее окружное напряжение; a - полудлина трещины; h - толщина стенки оболочки; R_2 - внутренний радиус; l - глубина трещины; Q - квадратный корень из полного эллиптического интеграла второго рода, определяемый приближенной формулой:

$$Q = 1 + 1.464 \cdot (l/a)^{1.65}, \quad (2.18)$$

F_i - корректировочный коэффициент:

$$F_i = \frac{h}{R_2} \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[2G_0 - 2 \frac{l}{R_2} G_1 + 3 \left(\frac{l}{R_2} \right)^2 G_2 - 4 \left(\frac{l}{R_2} \right)^3 G_3 \right], \quad (2.19)$$

В выражении (2.19) учитывается действие внутреннего давления на поверхности трещины. Коэффициенты G_i рассчитаны в таблице 2.2.

Выразим из формулы (2.17) среднее окружное разрушающее напряжение

$$\sigma = \frac{K_1}{\sqrt{\frac{\pi \cdot l}{Q}}} \cdot \frac{1}{F_i\left(\frac{l}{a}, \frac{l}{t}, \frac{h}{R_2}\right)} \quad (2.20)$$

Определим, как изменяется величина Q из формулы (2.18), см. рис. 2.12.

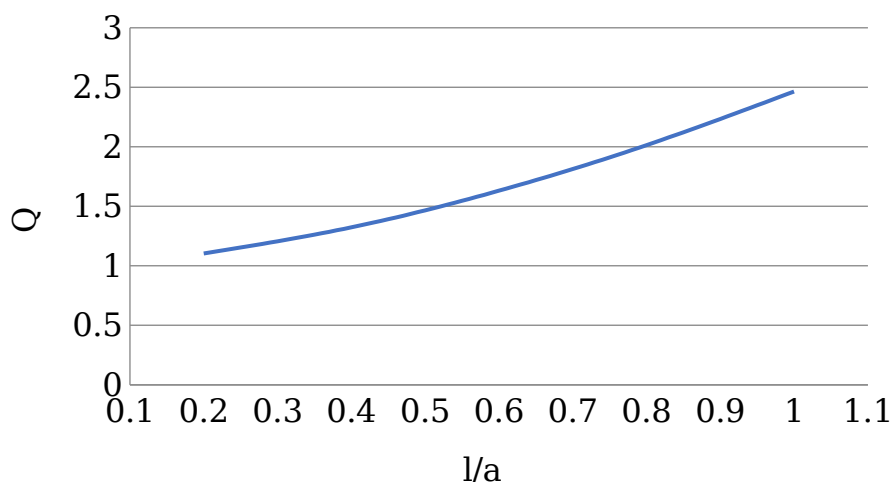


Рис. 2.12 Зависимость величины Q от l/a .

Используя данные для размеров дефектов из главы 2 глубина $l=100\div 500$ мкм и полудлина трещины $a_{кр}=0,5\div 25$ мм, а так же значения коэффициента интенсивности напряжения $K_{Ic}=1\div 1.9\cdot 10^3$ МПа*мм^(1/2) построим зависимости окружных напряжений от размеров дефектов, см. рис.2.13

Таблица 2.2

Коэффициенты влияния G_i полуэллиптической трещины на внешней поверхности цилиндра (h/R_2)

Тип нагрузки	l/a	0.2			0.4			1.0		
	$\frac{2\phi}{\pi} \backslash \frac{l}{h}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
Равномерное (G_0)	0	0.612	0.786	1.160	0.793	0.994	1.400	1.163	1.286	1.498
	0.25	0.752	0.952	1.346	0.828	1.016	1.365	1.088	1.184	1.320
	0.5	0.972	1.278	1.860	0.967	1.175	1.513	1.049	1.123	1.183
	0.75	1.114	1.541	2.344	1.072	1.311	1.682	1.034	1.100	1.163
	1.0	1.162	1.640	2.510	1.109	1.360	1.727	1.030	1.094	1.156
Линейное (G_1)	0	0.080	0.134	0.242	0.130	0.195	0.318	0.204	0.243	0.302
	0.25	0.209	0.272	0.389	0.252	0.315	0.421	0.365	0.396	0.435
	0.5	0.430	0.532	0.713	0.451	0.521	0.626	0.546	0.570	0.583
	0.75	0.618	0.767	1.044	0.620	0.702	0.833	0.674	0.698	0.724
	1.0	0.691	0.861	1.178	0.685	0.773	0.914	0.720	0.743	0.777
Квадратичное (G_2)	0	0.023	0.049	0.097	0.045	0.078	0.134	0.077	0.096	0.122
	0.25	0.076	0.106	0.159	0.100	0.130	0.180	0.156	0.171	0.188
	0.5	0.241	0.291	0.376	0.261	0.295	0.345	0.336	0.347	0.350
	0.75	0.437	0.513	0.654	0.447	0.489	0.556	0.516	0.527	0.542
	1.0	0.524	0.613	0.782	0.530	0.575	0.653	0.591	0.603	0.625
Кубическое (G_3)	0	0.010	0.025	0.051	0.022	0.041	0.073	0.040	0.051	0.064
	0.25	0.032	0.050	0.079	0.046	0.064	0.093	0.077	0.086	0.095
	0.5	0.148	0.177	0.225	0.164	0.184	0.212	0.220	0.226	0.226
	0.75	0.337	0.383	0.468	0.350	0.375	0.416	0.418	0.424	0.433
	1.0	0.434	0.488	0.596	0.445	0.472	0.523	0.513	0.520	0.536

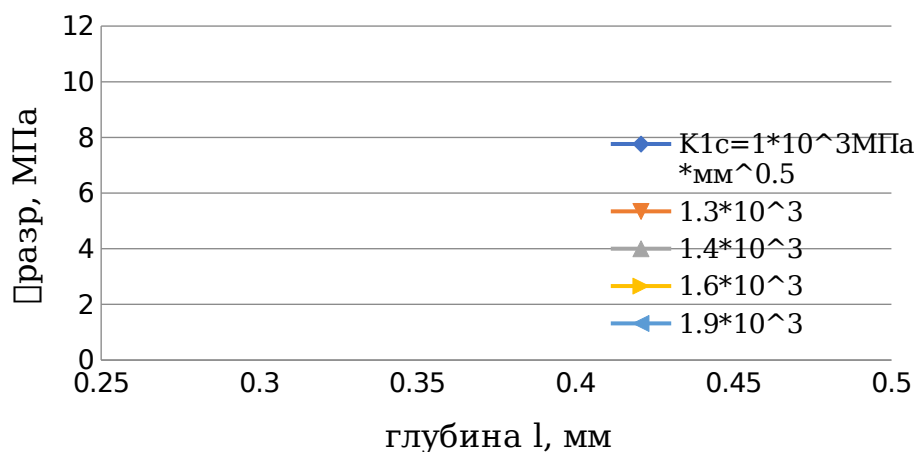


Рис. 2.13 Зависимость величины окружных напряжений от размера дефекта с запасом прочности 5.

Анализируя графики 2.12 и 2.13, видим, что уровень окружных напряжений рассчитанных с применением механики разрушения находятся в одинаковом диапазоне с напряжениями, полученными по формуле (2.20), следовательно, для дальнейших расчетов можем использовать формулу (2.20).

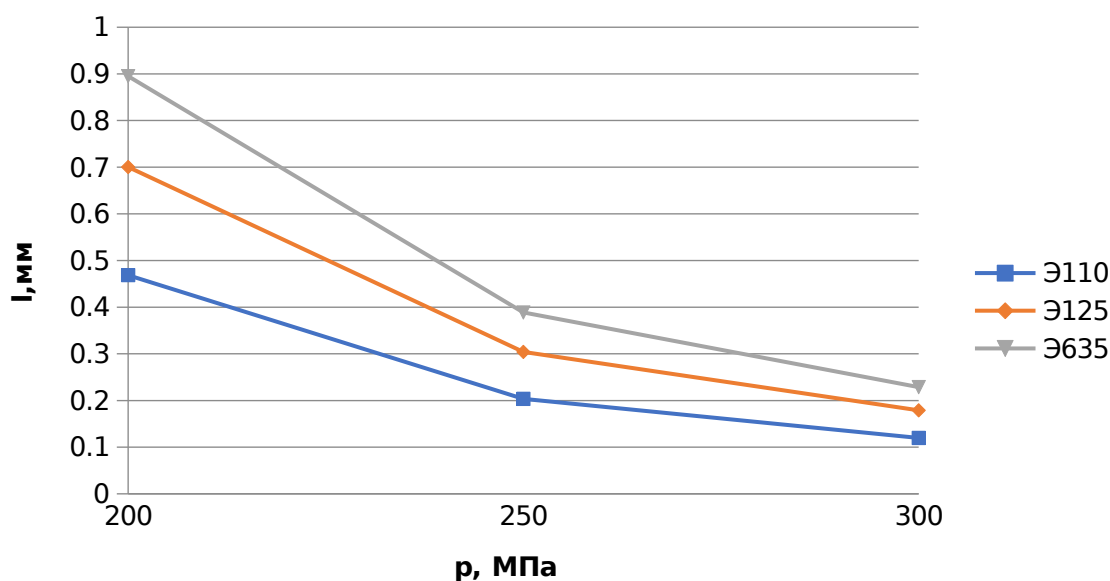


Рис. 2.15. Зависимость глубины дефекта от
внутреннего давления.

Из рис. 2.15 видно, что при большем значении внутреннего рабочего давления допускаются меньшие размеры дефектов. Зная соответствующие параметры технологии изготовления, эксплуатационных нагрузок, а так же коэффициенты интенсивности напряжений можно находить величину допускаемых напряжений, дефектов, а так же геометрические размеры оболочек ТВЭЛов.

3. Влияние экстремальных условий на преждевременное растрескивание циркониевых оболочек ТВЭЛов

В соответствии с современными представлениями механики разрушения практически все металлоизделия имеют микродефекты и несплошности на поверхности и в целом в объеме детали после изготовления. При этом необходимо отметить, что наличие таких дефектов не мешает эксплуатировать изделие. Однако, для прецизионных деталей необходим тщательный контроль и оценка вероятности макроразрушения (несанкционированного раскрытия трещин под действием предельно-допустимых напряжений).

Разрушение это длительный процесс, связанный с образованием и накоплением дефектов в виде трещин. Начало исследований развития трещин связывают с появлением работ Гриффитса, где при оценке прочности учитываются имеющиеся в теле трещины или подобные им дефекты [16]. В трудах Гриффитса учтены силы поверхностного натяжения и получено критическое напряжение для бесконечно хрупкого тела с прямолинейной трещиной полудлиной a (при условии, что напряжения приложены на бесконечности от трещины), по достижении

которого трещина будет распространяться самопроизвольно без подвода энергии извне:

для условий плосконапряженного состояния:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}, \quad (3.1)$$

для условий плоской деформации:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\mu^2)a}}, \quad (3.2)$$

где σ – разрушающее напряжение; γ – поверхностная энергия; a – критическая полудлина большей оси эллиптической трещины.

При распространении трещины процесс разрушения материала сосредоточен в малой окрестности конца трещины. Исходя из этого, можно полагать, что процесс разрушения контролируется асимптотическим выражением для напряжения вблизи конца трещины. Как известно, напряжение около края трещины характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений K , рис.3.1(а). Этот коэффициент зависит от приложенной нагрузки, геометрии тела, положения точки на кромке трещины и размера трещины, но не зависит от координат точки в окрестности вершины трещины r, θ . Для анизотропного материала или при неуравновешенной нагрузке на берегах трещины коэффициент K будет зависеть и от характеристики упругости.

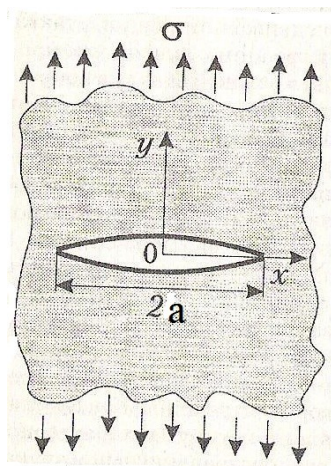
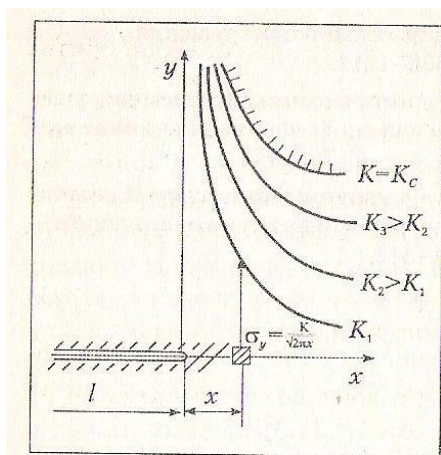
При постоянной нагрузке трещина в некоторых условиях может стабилизироваться, при переменных нагрузках выше определенного уровня длина трещины a постоянно растет. Скорость развития трещины и ее критическая длина $a_{кр}$, при достижении которой возникает опасность быстрого разрушения

конструкции, зависят от коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины, измеряемого в $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.3)$$

В 1957г. Дж. Ирвин предположил, что начало роста трещины можно связать с достижением коэффициентом интенсивности напряжений K_1 некоторого предельного значения. Такое предельное значение коэффициента интенсивности напряжений K_1 получило название критического коэффициента интенсивности напряжений K_c , который стал в дальнейшем характеристикой трещиностойкости материала. Так был сформулирован силовой критерий разрушения Дж. Ирвина. Согласно этому критерию, роста трещины не происходит, если $K < K_c$, а критическое условие имеет вид $K = K_c$.

Все эти формулы приведены для плоской бесконечной трещины рис.3.1(б). В таблице 3.1 приведены формулы для расчета конфигураций тел с различными трещинами.



а)

б)

Рис.3.1. а - Асимптотические напряжения σ_y перед вершиной трещины отрыва при разных коэффициентах K ; б - Растяжение плоскости с одиночной трещиной (задача Гриффитса) [16]

Далее для определения критический коэффициент интенсивности напряжений K_c для труб в состоянии поставки определяли экспериментально как для материала тонкостенного цилиндра в условиях плосконапряженного состояния со сквозной трещиной (растяжение перпендикулярно трещине) [10], т.е. основываясь на формуле (3.3).

$$K_c = \sigma_{ct} \cdot \sqrt{\pi \cdot \frac{l_n}{2}} = \frac{P_c}{\pi \cdot R \cdot h} \cdot \sqrt{\pi \cdot \frac{l_n}{2}}, \quad (3.4)$$

где l_n - длина надреза, σ_{ct} - окружные напряжения в стенке, P_c - нагрузка в момент регистрации на АЭ(акустическая эмиссия) от старта трещины. Данные экспериментальных расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Сплав	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	K_{Ic} , МПа*м ^{1/2}	K_{Ic} , МПа*мм ^{1/2}
Э110	345 ± 6	375 ± 7	81,4 ± 5,6	2,6±0,18*10 ³
Э110М	470 ± 5	505 ± 6	46,9 ± 6,2	1,5±0,19*10 ³
Э635	450 ± 4	490 ± 5	57,7 ± 3,7	1,8±0,12*10 ³
Э635М	453 ± 5	485 ± 6	58,9 ± 4,5	1,9±0,14*10 ³

$$\sigma_{\theta} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi \cdot a_{кр}}}, \quad (3.5)$$

С учётом данных по коэффициентам интенсивности напряжений(табл. 3.2), используя выражение (3.5) рассчитаем величину предельно-допустимых окружных напряжений в зависимости от полудлины продольных трещин, возникающих в металлоизделиях из различных циркониевых сплавов.

На рис.3.2 представлены результаты расчёта разрушающих напряжений с коэффициентом запаса $n=5$, в зависимости от полудлины дефекта $a_{кр}=100\div 500$ мкм с учётом коэффициента интенсивности напряжения K_{1c} для различных циркониевых сплавов.

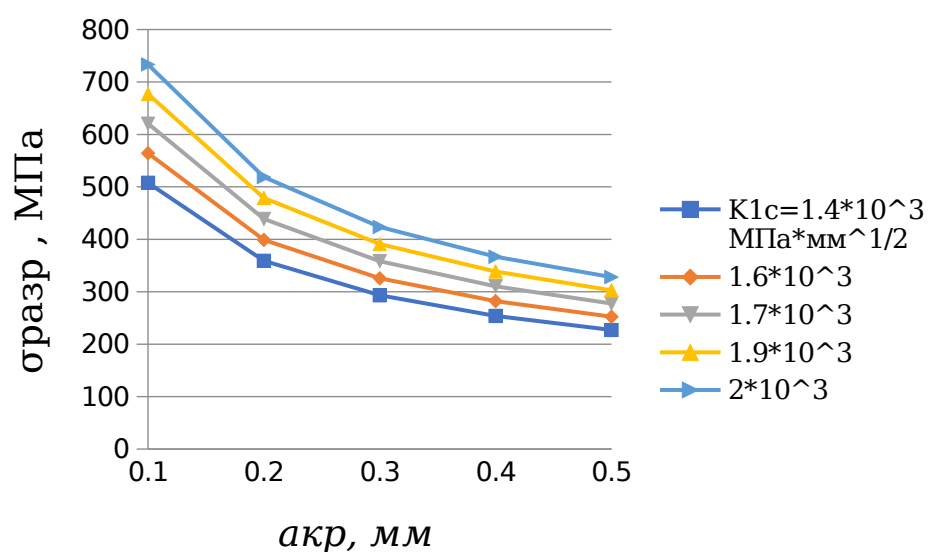


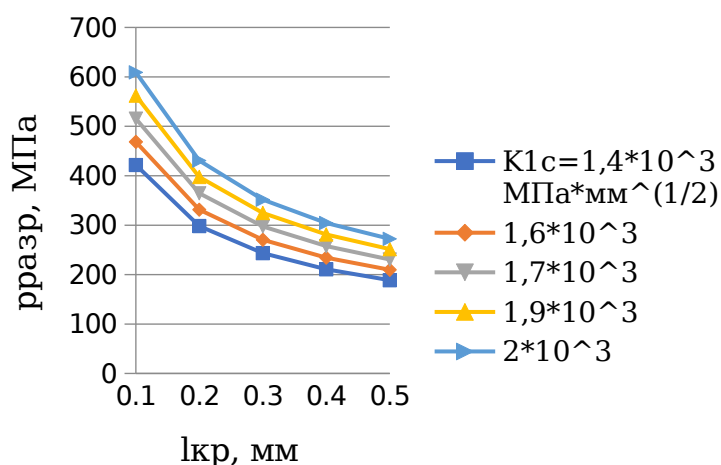
Рис. 3.2. Зависимость величины разрушающих окружных напряжений от размера дефекта ($a_{кр}$ - полудлина трещины).

Из рис. 3.2 видно, что разрушающие суммарное напряжение при величине дефекта 0,1 мм находятся в диапазоне от 500 до 750 МПа и снижаются при увеличении длины дефекта.

Подставляя выражение (2.12) для определения окружного напряжения в выражение (3.5) получаем

$$\sigma_{разр} = \frac{K_{1c} h}{R_3 \sqrt{\pi \cdot a_{кр}}}, \quad (3.6)$$

На рис. 3.3 представлены значения давления, при котором возможно разрушение оболочки в зависимости от



размера трещины.

Рис. 3.3. Пределы разрушающего давления

Из рис. 3.3 видно, что чем больше размер дефекта, тем меньше значение давления, которое оболочка может выдержать во время эксплуатации.

3.1. Определение коэффициента интенсивности напряжений в окрестностях дискообразного дефекта, располагающегося на границе двух сред с различными физико-механическими свойствами

Рассмотрим задачу об определении температурного напряжения дискообразной трещины (см.рис.3.4) на границе раздела двух сред с различными свойствами и с возмущающим однородным тепловым потоком.

В работе [22] представлены данные о применении метода гармонических потенциалов, которые согласуются для предельного случая решения с результатами, приведенными в работе [35].

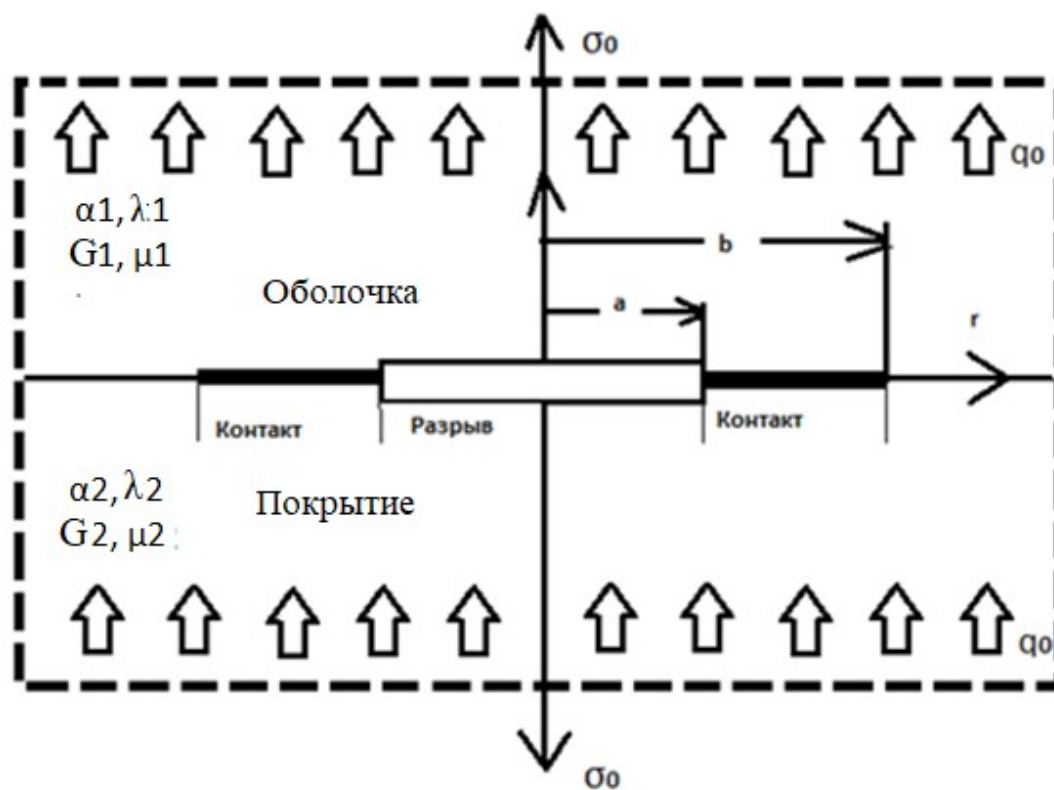


Рис. 3.4. Схема расположения дискообразной трещины на границе раздела двух сред

Распространение теплового потока в эксплуатационных и экстремальных условиях предполагается с внешней поверхности внутрь оболочки. Рассмотрим оболочку ТВЭЛа с нанесенным покрытием, как два разных полупространства, соединённых в плоскости $z=0$ (см. рис.3.4) с упругими характеристиками - модулем сдвига G_i , коэффициентом Пуассона μ_i , коэффициентом теплопроводности λ_i и коэффициентом теплового расширения α_i . Пусть среда с индексом $i=1$ - оболочка, а среда с индексом $i=2$ -

поверхность. Предположим, что среды подвержены тепловому потоку $q_z=q_0$ и равномерному растяжению $\sigma_{zz} \dot{=} \sigma_0$.

Рассмотрим случай, когда тепло переносится в материал с большой степенью теплового возмущения, т.е.

$$q_0(\delta_1 - \delta_2) > 0, \quad (3.7)$$

где δ_i - соотношение физико-механических параметров сред, определяется в виде:

$$\delta_i = \alpha_i(1 + \mu_i) / \lambda_i$$

$i=1,2$ (1 - оболочка, 2 - материал покрытия ТВЭЛа)

На границе раздела между материалом оболочки и покрытием имеется дискообразный дефект (питтинг) (см.рис.3.1.1)

При рассмотрении коэффициентов интенсивности напряжений можно рассмотреть два случая:

1. Преобладает механическое нагружение, в этом случае коэффициент интенсивности напряжений представим в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = \lim_{r \rightarrow b} \frac{\sigma_{zz} \left\{ \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right) \Pi \right\}^{1/2}}{\sigma_0} \\ K_2 = \lim_{r \rightarrow b} \frac{\sigma_{rz} \left\{ \left(\frac{r^2}{b^2} - 1 \right) / \Pi \right\}^{1/2}}{\sigma_0} = \frac{K_1}{\beta} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

2. Если преобладает тепловое нагружение, то коэффициент интенсивности определяется в виде:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow b} \frac{\sigma_{zz} \left\{ \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right) / \Pi \right\}^{1/2}}{[q_0(\delta_1 - \delta_2) b / A]} = S_q K_1 \quad (3.9)$$

где S_q - величина, характеризующая отношение механического и теплового нагружения.

При рассмотрении коэффициента интенсивности исследуются случаи, когда значение S_q большое - преобладает механическое нагружение, с другой стороны при малом значении S_q -преобладает тепловое нагружение. Этот параметр S_q определяется в виде:

$$S_q = \sigma_0 * A / (q_0 (\delta_1 - \delta_2) * b) \quad (3.10)$$

Напряжения записываются через параметры β , γ где

$$\beta = B/A \quad (3.11)$$

$$\gamma = (\delta_1 - \delta_2) / (\delta_1 + \delta_2) \quad (3.12)$$

Параметры A и B зависят от упругих свойств и определяются в виде:

$$A = \frac{1 - \mu_1}{G_1} + \frac{1 - \mu_2}{G_2} \quad (3.13)$$

$$B = \frac{1 - 2\mu_1}{2G_1} - \frac{1 - 2\mu_2}{2G_2} \quad (3.14)$$

Если перенос тепла в обратном направлении, от внутренней на внешнюю поверхность $q_0 < 0$ наблюдается кольцевая зона [36].

В таблице 3.2 представлены значения: μ - коэффициента Пуассона, G - модуля сдвига, α - коэффициента линейного расширения и λ - коэффициента теплопроводности для сплавов Э110, Э635 и для покрытий Al, Al₂O₃, Cr оболочек ТВЭЛа [38]-[40].

Таблица 3.2.

Физико-механические свойства материалов оболочек ТВЭЛа к покрытиям при температуре 300°С

	$\alpha * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\lambda \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К})$	$G \text{ МПа}$	μ
Al	25,4	230	25500	0,32

Al2O3	7,82	15,7	148100	0,25
Cr	7,91	81	115000	0,25
Э110	6,4	20,8	90000	0,33
Э635	6,4	18	90000	0,32

Таким образом, зная физико-механические свойства оболочки и покрытия (см. табл.3.2 и 3.3) можно найти зависимость коэффициента интенсивности напряжений при наличии дефекта на границе двух сред(покрытия и оболочки).

Таблица 3.3

Параметры необходимые для определения коэффициентов интенсивности напряжений

	A	B	β	δ_1	δ_2	γ
Э110+Al	0,34	-0,052	0,1529 4	0,46769 2	0,80731 9	- 0,26637
Э110+Al2O3	0,125	0,062	0,496	0,467	0,8775	- 0,25132
Э110+Cr	0,142	-0,00113	0,0079 6	0,4676	0,088	0,68322 5
Э635+Al	0,341	-0,05	0,1466 3	0,5632	0,807	- 0,17793
Э635+Al2O3	0,125	-0,0017	-0,0136	0,5632	0,8775	- 0,21816
Э635+Cr	0,144	0,03614	0,251	0,5632	0,088	0,10211

На рис.3.5 показано влияние теплового потока на коэффициент интенсивности напряжений K_1 . На рис. 3.6. зависимость K_1 и K_2 от параметра β , характеризующего упругие характеристики материала оболочки и покрытия (см.табл.3.2) для случая механического нагружения.

На рис.3.7 показано влияние теплового потока на коэффициент интенсивности K_1 при $\beta = 0,25$ и при $\gamma = 0,1$. Эти

значения параметров соответствуют физико-механическим свойствам двух сред материала оболочки циркониевого сплава Э635 с хромовым покрытием.

На рис.3.8. показано влияние теплового потока на коэффициент интенсивности K_1 при $\beta=0,5$ $\gamma=0,25$. Здесь параметры β и γ соответствуют двум средам: материалу оболочки - циркониевому сплаву Э110 и алюминиевому покрытию - Al_2O_3 .

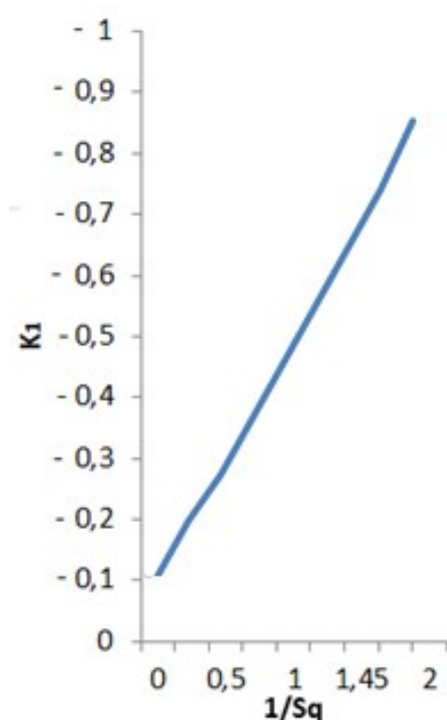


Рис.3.5. Зависимость влияние теплового потока на распределение K_1

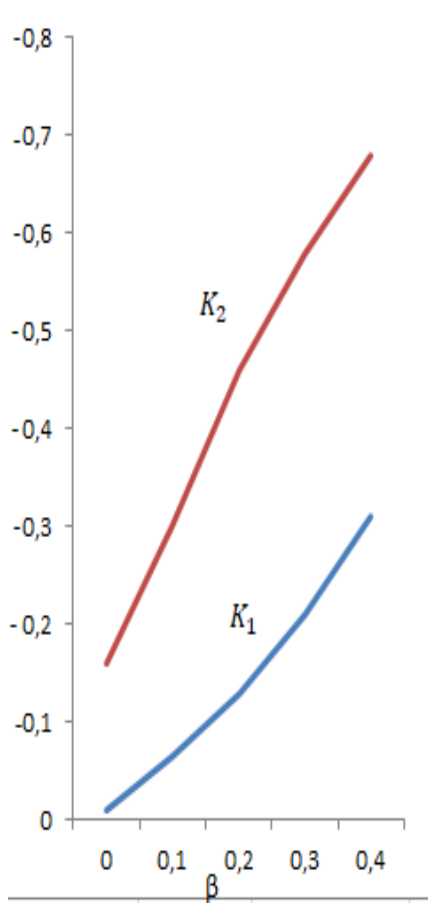


Рис.3.6. Зависимость K_1 и K_2 от β для случая механического нагружения ($q_0=0$)

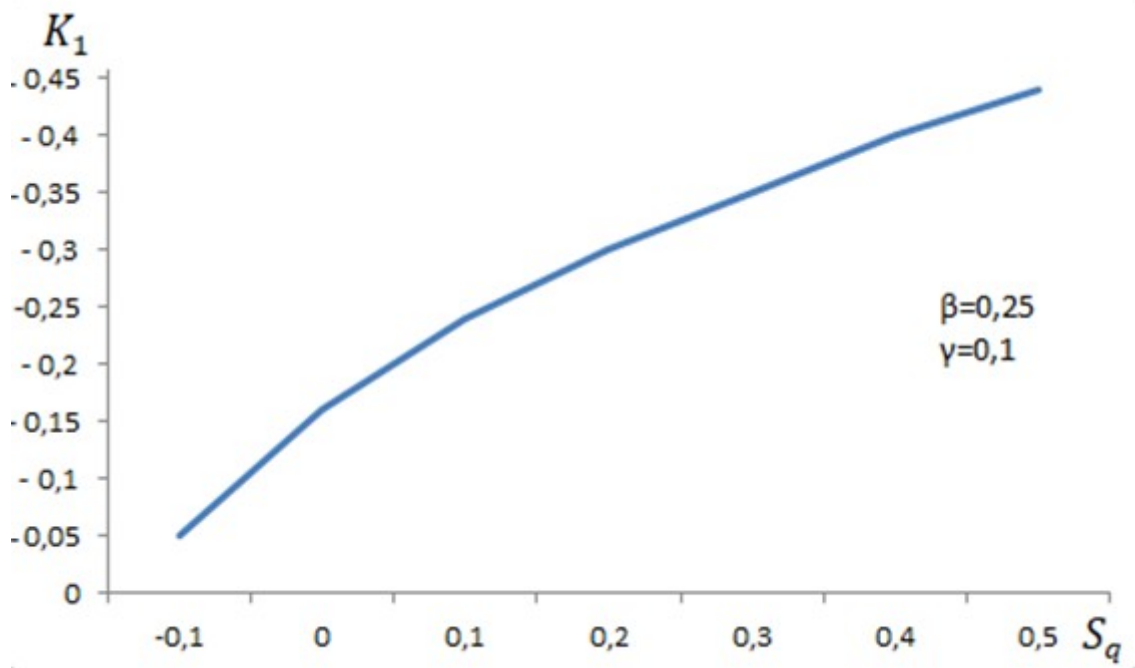


Рис. 3.7 Влияние на K_1 от параметра S_q при значениях $\beta = 0,25$ и $\gamma = 0,1$

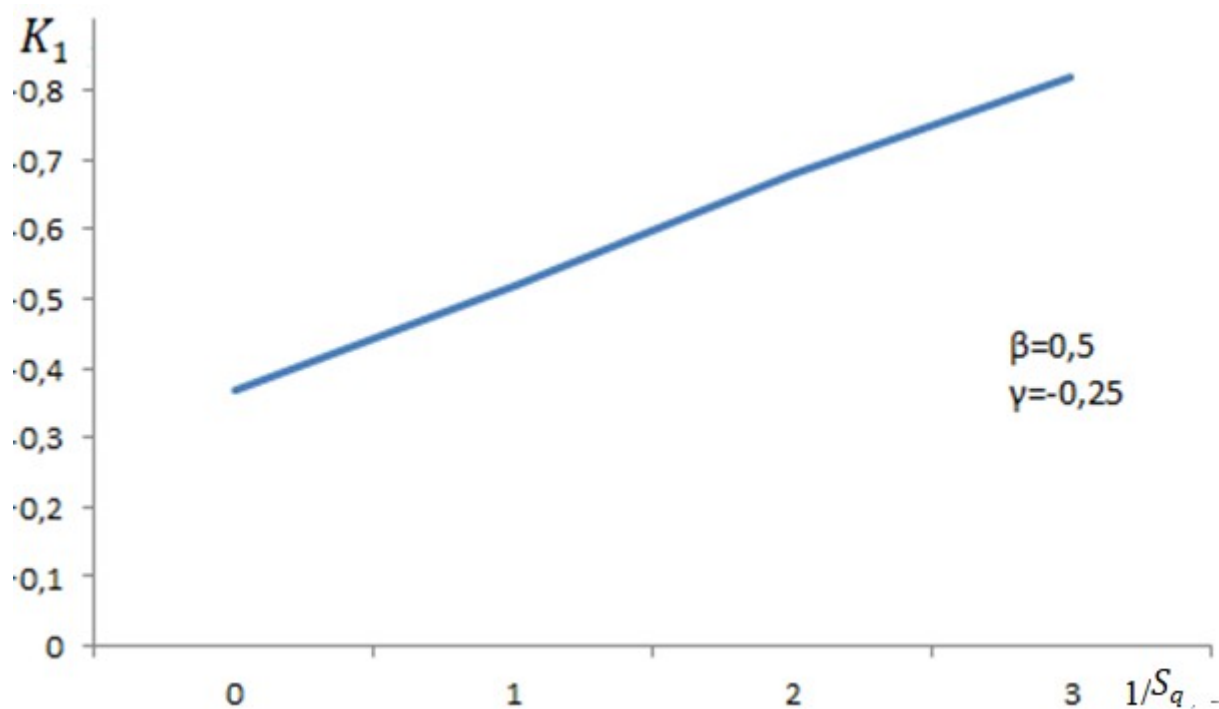


Рис. 3.8 Влияние на K_1 теплового потока. При $\beta\gamma < 0$ тепловой поток уменьшает площадь контакта.

Таким образом, рассмотрев известный метод гармонических потенциалов с учетом физико-механических свойств и питтингов, представлена методика, которая позволяет оценить влияние механического и теплового нагружения и прогнозирует преждевременное разрушение при эксплуатационных, а так же в экстремальных условиях оболочки ТВЭЛа к покрытию.

3.2. Температурные напряжения вокруг осесимметричных дефектов на границе между покрытиями и материалами оболочки ТВЭЛа

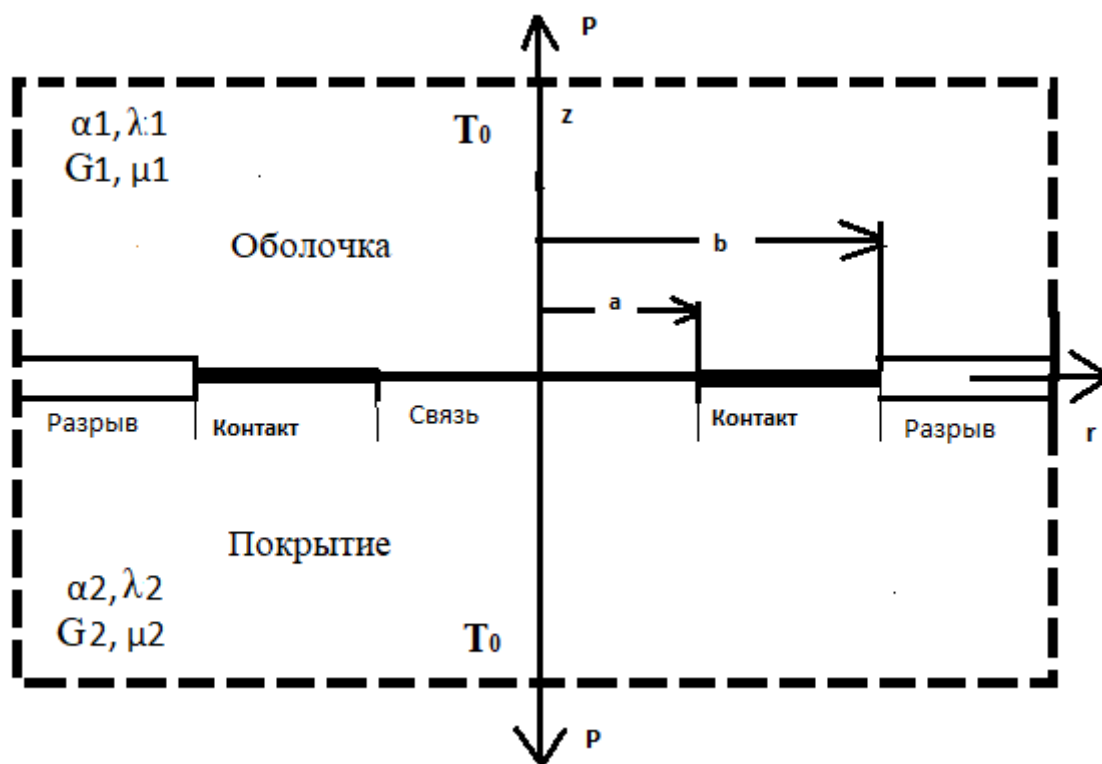


Рис.3.9

Применим метод гармонических потенциалов рассмотренных в предыдущем разделе для случая, когда на границе раздела двух сред с различными физико-механическими свойствами имеются повторяющиеся дефекты, показано на рис.3.9

Вокруг границы раздела существует кольцевая область контакта $a \leq r \leq b'$, а раскрытие дефекта будет наблюдаться при $r > b'$.

Тогда, если температуры в средах (полупространствах) возрастут до T_1^∞ и T_2^∞ появится тепловой поток через кольцевую область контакта (внешний радиус см.рис.3.2.1) и поверхность раздела.

Для случая, когда преобладает тепловое нагружение $T_1^\infty = T_2^\infty = T_0$, а механическое мало по сравнению с ним $P=0$, решение такой задачи упрощается и выполняется неравенство

$$(\alpha_2 - \alpha_1) * T_0 \beta > 0, \text{ где } \beta = A/B, \quad (3.14)$$

$$A = \frac{1 - \mu_1}{G_1} + \frac{1 - \mu_2}{G_2}, \quad B = \frac{1 - 2\mu_1}{2G_1} - \frac{1 - 2\mu_2}{2G_2}.$$

В этом случае $b/a \rightarrow \infty$ область контакта распространяется по всей несвязной области, а

$$\tau_{rz} = \frac{4C}{\pi(1-\beta^2)} \frac{r}{(a^2 - r^2)^{1/2}}, \quad 0 \leq r \leq a \quad (3.15)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2C\beta}{1-\beta^2}, \quad 0 \leq r \leq a \quad (3.16)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{4C\beta}{\pi(1-\beta^2)} \left[\frac{\alpha}{(r^2 - a^2)^{1/2}} - \arcsin \frac{a}{r} \right], \quad r > a \quad (3.17)$$

где $C = (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{T_0}{A}$

В таблице 3.4 представлены физические свойства коэффициента теплопроводности - λ для алюминиевых и хромовых покрытий при различных температурах [42]-[43].

В таблице 3.5 показаны данные по сплавам Э110 и Э635. На рис.3.10 приведены Результаты аппроксимации по известным экспериментальным данным. В таблице 3.5 показаны значения коэффициентов теплопроводности по сплавам Э110 и Э635.

Таблица 3.4

Значения коэффициента теплопроводности для покрытий ТВЭЛа из сплава Al, Al₂O₃ и Cr при различных температурах

Т, К	λ, Вт/(м*К) для Al	λ, Вт/(м*К) для Al ₂ O ₃	λ, Вт/(м*К) для Cr
200	237	-	111
300	237	40	94
400	240	28	91
600	230	15,7	81
800	220	12,5	71

Таблица 3.5

Значения коэффициента теплопроводности для циркониевых материалов оболочек ТВЭЛа из сплава Э110, Э635 при различных температурах

Т, К	λ, Вт/(м*К) для Э110	λ, Вт/(м*К) для Э635
200	-	20,3
400	18,3	18,5
600	20,8	18
800	23	18,5
1000	25	21
1200	-	21,5

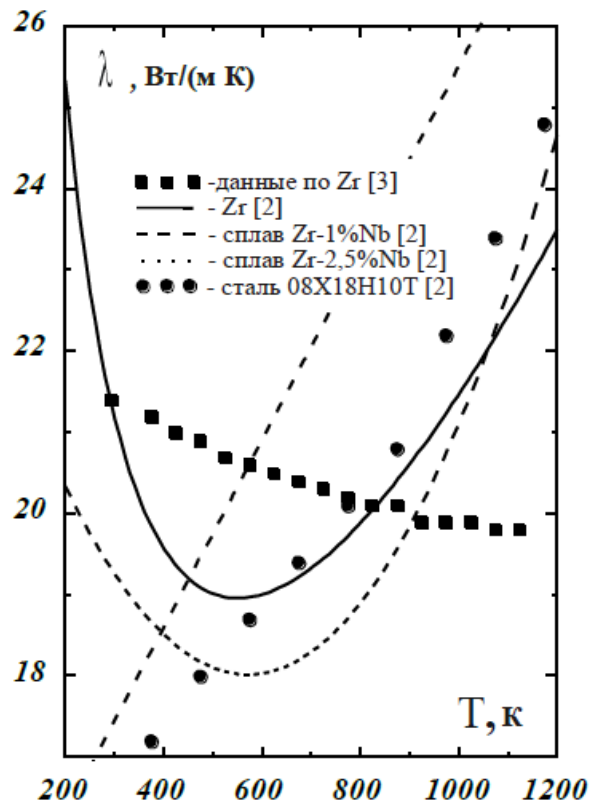


Рис.3.10. Зависимости теплопроводности циркония и его сплава от различных температур

Выше изложенную задачу можно применить к случаю определения предельных температурных напряжений в окрестности дефектов на границе двух сред материала оболочки и покрытия.

На рис 3.11 показано напряжения на разделе границы двух сред при параметре дефекта $b/a=1.5$

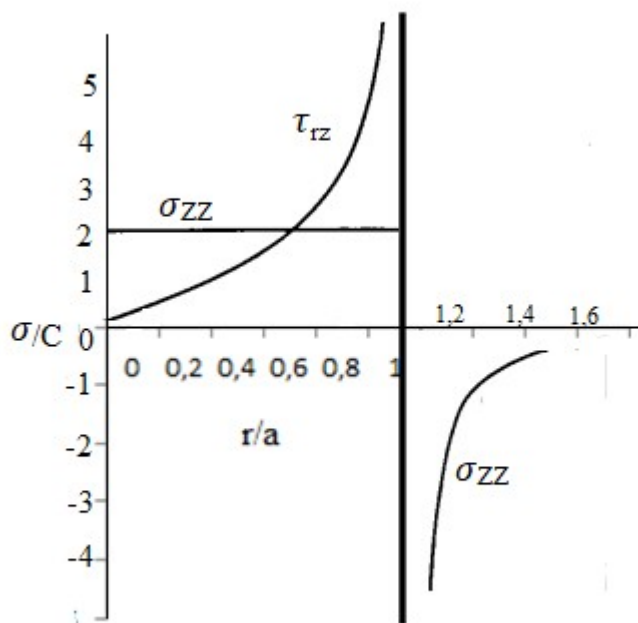


Рис.3.11. Напряжение на границе раздела двух сред с различными свойствами при $b/a=1.5$

Из рис.3.11 видно, что напряженное состояние представляет собой равномерное растяжение в области полного сцепления покрытия и оболочки в зоне где нет дефекта при $r < a$, и сжатия в области с трещиной на границе при $r > a$ с особенностью у вершины трещины при $r \rightarrow a$, где напряжения стремятся к бесконечности.

Заключения по работе

Показаны механизмы разрушения циркониевых оболочек ТВЭЛа. Приведены современные методы защиты циркониевых оболочек ТВЭЛов при работе в экстремальных условиях.

Описаны основные критерии разрушения металлоизделий. Приведены выводы коэффициентов интенсивности напряжений при различных микродефектах.

На примере известных из литературы экспериментальных исследований процессов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) показаны возможные несплошности и дефекты, размеры и условия их раскрытия до критического разрушения.

Определены напряжения, возникающие при эксплуатации циркониевых оболочек при наличии дефектов. Результаты решения показали, что предельно допустимые напряжения для циркониевых оболочек определяется в диапазоне 300 – 850 МПа с заданным коэффициентом запаса.

Разработана методика расчета коэффициентов интенсивности напряжений при расчете предельно допустимых напряжений в циркониевых оболочках с алюминиевыми и хромовыми покрытиями.

Найдены параметры, влияющие на коэффициенты интенсивности напряжений при наличии механического нагружения и теплового воздействия в зависимости от физико-механических свойств для двух сред материала оболочки и покрытия при наличии дискообразных дефектов (питтингов) на границе сред.

Определены распределения температурных напряжений вокруг внешней осесимметричной трещины на границе раздела двух сред с различными свойствами. Результаты показали, что напряженное состояние представляет собой равномерно растяжение в области без дефекта границе и сжатие в области с трещиной с особенностью у вершины трещины, где напряжения стремятся к бесконечности.

Библиографический список

1. С.А. Никулин, В.Г. Ханжин, Д.Б. Рожнов, В.А. Белов: Поведение циркониевых оболочечных труб ТВЭЛов атомных реакторов в экстремальных эксплуатационных условиях//«Металловедение и термическая обработка металлов».№5.2009 г.С. 32-39
2. Никулин С.А., Рожнов А.Б. Коррозионное растрескивание циркониевых оболочечных труб (обзор): Методы исследования и механизмы разрушения // МиТОМ. 2005. №2. С. 31 - 39
3. Соколов И.А, Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Metallurgy, 1981г. 96с.
4. Электронный ресурс: dom-en.ru/itogobzor
5. Электронный ресурс: predinf.ru/energo/35.htm
6. Электронный ресурс: 4energetic.ru
7. Электронный ресурс: antigreen.org/vadim/mycomments/reactarh/reactors.htm
8. Электронный ресурс: 4energetic.ru/pages/page51
9. Васильева Е.М. Стенд для вибрационных испытаний тепловыделяющих сборок ядерных энергетических

- установок//Наука и образование, электронное научно-техническое издание, 2004 г.
10. Белов В.А. Сопротивление разрушению модифицированных циркониевых сплавов для оболочечных труб атомных реакторов: автореф. дис. на соискание уч. степ. кандидата техн. наук. - Москва, 2011. - 23 с.
 11. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоиздат, 1981 г. 232с.
 12. Меерсона Г.А. Металлургия циркония. - М.: Изд-во иностр. лит.,- 1959.
 13. Ваткин Я.Л., Ваткин Ю.Я. Трубное производство, 1970г.
 14. Перлин И.Л. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971, 448 с.
 15. Сопротивление материалов: Учебник для вузов/Под общ.ред.. акад. АН УССР Г.С.Писаренко.- 4-е изд. Перерабю и доп.-Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979.-696 с.
 16. Пестриков В.М., Морозов Е.В. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. - СПб.: Профессия, 2002.-302 с.
 17. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технические остаточные напряжения и прочность осесимметричных полых изделий// Научные исследования и инновации. Научный журнал, Пермь: изд.ПГТУ, 2008 № 4
 18. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О потенциальной энергии остаточных напряжений при осесимметричном деформировании. (статья) Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. Пермь, 2000. С. 92-98
 19. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Остаточные напряжения и прочность анизотропных

- осесимметричных металлоизделий // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2009): Док. междунар. науч.-техн. конф. студентов и молодых учёных.- Пермь: Изд-во ПГТУ,- 2010.- С. 48-54.
20. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением.- М.: Metallurgy, 1986 г., 168 с.
21. Филимонов Г.В., Никишов О.А. Прокатка циркониевых труб. М.: Metallurgy, 1988г. с.104
22. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Т.2: Перевод с англ./Под ред. Ю. Мураками. - М.:Мир,1990. - 1016с.
23. Колмогоров Г. Л., Кузнецова Е.В. Способ производства трубных металлоизделий тепловыделяющих элементов атомных реакторов (положительное решение о выдаче патента RU 2 707 249 C1) опубликовано: 2019.11.25.
https://yandex.ru/patents/doc/RU2707249C1_20191125
24. Manufacturing Residual Stresses during the Production of Zirconium Sheets / E. V. Kuznetsova, G. L. Kolmogorov, A. Y. Vavel // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. - 2016. - Vol. 57, № 2- P. 101-105., Web of Science
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27089785>
25. Влияние эксплуатационных режимов и технологических остаточных напряжений на коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, используемых в атомной энергетике / Е. В. Кузнецова, А. А. Арташова // Вестник ПНИПУ = PNRPU Mechanics bulletin. Механика. - 2012. - № 1. - С. 51-61., РИНЦ
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17641483>

26. Поведение оболочек тепловыделяющих элементов при эксплуатации с учетом остаточных напряжений / Е. В. Кузнецова, Д. А. Мелехин, Е. С. Елистратова, Д. В. Виндокуров // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. - 2016. - № 3- С. 23-34., РИНЦ <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26731796>
27. Якушкин А.А., Высикайло Ф.И.. Проблемы разрушения поверхности оболочек тепловыделяющих элементов ядерных энергетических установок. / Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика 2018. № 4 С. 92-111.
28. http://atomicexpert.com/lecture_kalin
29. Патент RU 2561975/ Борисов В.М., Трофимов В.Н., Христофоров О.Б., Черковец В.Е. Устройство и способ для нанесения покрытий оболочек тепловыделяющих элементов.
30. Investigating Potential Accident Tolerant Fuel Cladding Materials and Coatings / Daub K., Persaud S.Y., Rebak R.B. et al. / Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors. 13–17 August 2017, Portland. Vol. 2. Springer International Publishing, 2018. P. 215–234.
31. AREVA NP’s enhanced accident-tolerant fuel developments: Focus on Cr-coated M5 cladding / Bischoff J., Delafoy C., Vauglin C. et al. // Nuclear Engineering and Technology. 2018. Vol. 50. P. 223–228.
32. In-Pile Testing of CrN, TiAlN, and AlCrN Coatings on Zircaloy Cladding in the Halden Reactor / Nieuwenhove R. van, Andersson V., Balak J., Oberlander B. // 18th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry. Hilton Head,

USA, 2016. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. P. 965–982.

33. Физическое легирование для управления нанокристаллической структурой и свойствами многофазных композитных металл-углеродных покрытий на базе карбитов / Высикайло Ф.И., Митин В.С., Якушкин А.А., Беляев В.В. // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2018. № 3 (170). С. 44–58.
34. Blank V., Vysikaylo P. et al. C60- doping of nanostructured Bi-Sb-Te thermoelectrics / Physica Status Solidi A. 2011. Vol. 208. Iss. 12. P. 2783–2789.
35. Martin-Moran C.J., Barber J.R., Comninou M. The penny-shaped interface crack with heat flow. Part 1. Perfect contact. – Trans. ASME, Ser. E, J. Appl. Mech., 1983, 50, No. 1, p. 29-36.
36. Barber J.R., Comninou M. The penny-shaped crack with heat flow. Part 2. Imperfect contact. – Trans. ASME, Ser. E, J. Appl. Mech., 1983, 50, No. 4a, p. 770-776.
37. Keer L.M., Chen S.H., Comnino M. The interface penny-shaped crack reconsidered. – Int. J. Engng. Sci., 1978, 16, No. 10, p. 765-772.
38. Электронный ресурс : <https://ru.qwe.wiki/wiki/Chromium>
39. Электронный ресурс:
<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2011/documents/kms2011-013.pdf>
40. Электронный ресурс : <https://infotables.ru/fizika/49-koeffitsient-teploprovodnosti-veshchestv/351-koeffitsient-teploprovodnosti-metally-i-splavy-tablitsa>
41. Кузьмин, Ариан Валерьевич. Теплофизические свойства материалов ТВЭЛ современных тепловых реакторов

[Электронный ресурс] / А. В. Кузьмин, В. Ю. Рождествин, Е. Ю. Синяткин // Теплофизические основы энергетических технологий сборник научных трудов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 6-8 октября 2011 г., Томск: [Электронный ресурс] / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. коллегия: Г. В. Кузнецова ; А. С. Заворина ; К. В. Бувакова . — Томск : Изд-во ТПУ , 2011 . — С. [139-143]

42. Электронный ресурс:

https://otvet.imgsmail.ru/download/dc5b0fe83bfc013f2f5d89821a063abb_i-470.jpg

43. Электронный ресурс :http://okvsk.ru/uploads/posts/2017-06/1497976029_122b.jpeg