

В диссертационный Совет Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии “Центральный научно –исследовательский институт конструкционных материалов “Прометей”.

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Поповой Ирины Павловны “Исследование сопротивления разрушению сплава базовой композиции 45Х25Н35С2Б и разработка методов оценки работоспособности реакционных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза”, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Актуальность избранной темы диссертации.

Проблема высокотемпературной ползучести и длительной прочности металлических материалов и элементов конструкций возникла в начале прошлого века в связи с массовыми аварийными разрушениями различных энергетических установок (котлов, паровых и газовых турбин и т.д.), работающих в условиях заметной ползучести. Возникла необходимость экспериментальных и теоретических исследований этой проблемы. На начальной стадии исследований (работы В. Коста де Андраде, Нортон и др.). были изучены кривые ползучести для различных металлических материалов при относительно малых временах испытаний и умеренных температурах, и разработаны простые реологические уравнения теории ползучести. В сороковых – пятидесятых годах были начаты длительные испытания на ползучесть и разрушение в различных странах (в США, Германии, Японии). В некоторых странах эти работы продолжаются и в настоящее время. В СССР такие опыты выполнялись в ЦКТИ под руководством А.А. Чижика и Ю.К.Петрени. В основном исследования

Вх. № <u>3743</u> <u>не</u>	Исполнено
<u>28</u> <u>12</u> <u>20</u> <u>14</u> г.	В ДЕЛО
Основн. <u>7</u> л.	№ _____
Прил. _____ л.	подп. _____

выполнялись в диапазоне повышенных температур ($500-650^{\circ}\text{C}$), а высокотемпературная ($900-1100^{\circ}\text{C}$) область ползучести оставалась малоизученной. Как показывают опыты, в последнем случае возможны возникновения некоторых особенностей поведения металлов и конструкций, учет которых необходим для реального прогнозирования деформационных и прочностных характеристик. В диссертации обращается внимание на проявление этих особенностей в случае реакционных змеевиковых систем высокотемпературных установок пиролиза, используемых в нефтехимической отрасли, эксплуатация которых производится при жестких температурно-силовых воздействиях: температурах ($900-1070^{\circ}\text{C}$), внутреннем давлении до $0,7\text{ МПа}$. Изучению поврежденности и формоизменения при термомеханическом нагружении этих систем, в частности, реакционных труб посвящены многочисленные отечественные и зарубежные публикации. В диссертации выявлены некоторые специфические особенности повреждения этих систем в условиях процесса пиролиза, которые ранее не были изучены, в частности, обращается внимание на несоответствие нормативно-технической документации реальной кинетике роста трещин в реакционных трубах и возможные пути его решения.

Поставленные задачи анализа отмеченных особенностей высокотемпературного поведения, их описание и усовершенствование методов расчета на прочность являются актуальными и их изучение необходимо для прогнозирования безопасной эксплуатации рассматриваемых жаропрочных сплавов и изготовленных из них элементов конструкций, работающих в условиях воздействия сложных температурно-силовых режимов нагружения.

Отметим некоторые основные оригинальные результаты диссертационной работы, обоснованность научных положений и выводов. Выполнен исчерпывающий обзор теоретических и экспериментальных

исследований, опубликованных в мировой и отечественной научной литературе по теме диссертации. Рассмотрены особенности эксплуатации реакционных труб печей пиролиза, работающих в условиях термомеханических воздействий. Проанализированы и определены возможные механизмы их повреждений по результатам исследований отработанных реакционных труб. Обращается внимание на несоответствие нормативных и традиционных расчетов прочности применительно к змеевикам, согласно которым безопасный срок службы при стационарном режиме эксплуатации составляет около 15 лет. На практике наблюдается значительное (до 2-5 лет) снижение работоспособности теплонапряженных выходных труб. Более того, уже через 4000 часов работы трубы выбраковываются из-за значительного формоизменения, при этом микроструктура и служебные свойства материала практически не ухудшаются. В диссертации дается оценка расчетных и наблюдаемых эффектов, устанавливаются их причины (влияние термических напряжений, накопление циклических деформаций, возникающих при теплосменах, охрупчивание, трещинообразование, закоксование стенок трубы) и разрабатываются соответствующие методы их описания. Предложены методы оценки предельных состояний и ресурса реакционных труб по критериям длительной прочности, деформационной способности и циклической прочности. Разработана методология расчета температуры и напряженно - деформированного состояния реакционной трубы, учитывающие процессы закоксования. Дана оценка ресурса реакционных змеевиков по критерию зарождения трещины по результатам длительных испытаний на ползучесть при температурах 900, 1000, 1100⁰С. Показано, что оценка ресурса на основании кривых длительной прочности с нормативным коэффициентом запаса 1,5 обеспечивает консервативную оценку момента зарождения трещины. На основе закона линейного суммирования повреждений предложена процедура оценки ресурса змеевиков на стадии

развития трещины при комбинированном статическом (ползучесть) и циклическом (усталость) нагружении. Показано, что при нормальном режиме эксплуатации усталостный рост трещины составляет около одного процента от роста трещины, обусловленного ползучестью. При одинаковых условиях нагружения рост трещины в сварном шве происходит в полтора раза быстрее, чем в основном металле. Эти результаты позволяют пренебречь величиной подрастания трещины, обусловленной усталостью при теплосменах, и оценить время безопасной эксплуатации трубы с трещиной по скорости роста трещины в процессе ползучести. Обобщая результаты экспериментов, скорость роста трещины определяется кинетическим уравнением типа уравнения Пэриса-Эрдогана, записанного в шкале реального времени, правая часть которой является степенной функцией от величины C^* - интеграла. С учетом экспериментальных результатов над образцами из рассматриваемых сплавов при температурах $900, 1000^{\circ}\text{C}$ конкретизированы параметры предложенного кинетического уравнения роста трещины. Показано, что термическое старение не приводит к увеличению скорости роста трещин в условиях ползучести. Увеличение температуры испытания с 900°C до 1000°C приводит к увеличению скорости роста трещин приблизительно в два раза. При этом ресурс реакционных труб на стадии зарождения и роста трещины, главным образом, определяется скоростью отложения кокса на внутренней стенке труб и качеством проведения операции декоксования в течение межремонтного пробега.

Предложенные в диссертации рекомендации по оптимизации режимов эксплуатации литых изделий, используются в ООО «СИБУР-Кстово» согласно акту использования результатов кандидатской диссертационной работы.

Результаты диссертации отражены в 8 публикациях, из которых 5 в научных журналах, рекомендованных ВАК. Все работы выполнены в соавторстве. При этом указан личный вклад автора в получении результатов по диссертационной работе. Согласно утверждению диссертанта они заключаются в следующем: постановка и проведение экспериментов по исследованию служебных характеристик материала, обработка полученных результатов, расчеты по построению нормативных кривых длительной и циклической прочности материалов, решение температурно-деформационных задач в вязкоупругой постановке, расчетная оценка допускаемых размеров трещины и времени безопасной эксплуатации трубы с трещиной. Разработка методологии и формулировка задач исследования выполнены совместно с научным руководителем. Микроструктурные исследования и определение теплофизических свойств пиролизного кокса выполнены в Центре коллективного пользования "Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей".

Диссертация содержит 211 страниц, состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 99 наименований. Замечания по оформлению диссертационной работы и автореферату отсутствуют.

Замечания по существу работы.

Как показывают результаты исследований основными факторами, определяющими ползучесть и длительную прочность материалов и конструкций в указанных параметрах их эксплуатации являются взаимосвязанные фазовые и структурные изменения, определяющие процессы повреждаемости, охрупчивания и снижения ресурса. Для учета этих эффектов в механике материалов рассматриваются взаимосвязанные кинетические уравнения для скорости ползучести и параметра

поврежденности (концепция Качанова-Работнова) и на их основе формулируются критерии длительной прочности. К сожалению, в диссертации не рассматривается этот подход, с помощью которого можно описать кривые длительной прочности в общем случае вязко-хрупкого разрушения. Автор ограничивается подбором эмпирических соотношений, которые не могут решить проблему дальнейшего прогнозирования.

В диссертации не уточняется какой области длительной прочности соответствуют полученные в опытах зависимости, отложенные на плоскости в двойных логарифмических координатах.

При формулировке условия разрушения по критерию предельной деформации величина деформации при разрушении в общем случае объемного напряженного состояния оценивается уравнением роста одиночной сферической поры Хэнкока-Маккензи (Райса-Трейси). Основанный на таком подходе критерий разрушения нельзя считать обоснованным.

Отмеченные замечания не снижают высокого научного уровня диссертационной работы.

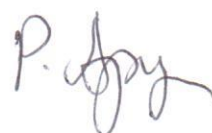
Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертант в полной мере осведомлен о современном состоянии рассматриваемой проблемы, ее сложности, при решении которой используются модельные, экспериментальные и расчетные методы, достоверность которых подтверждается исследованиями физико-механических свойств и микроструктуры материала отработанных труб змеевика установки производства этилена ЭП-300.

В заключение отметим, что в диссертационной работе Поповой Ирины Павловны предложено решение актуальной научно – технической задачи прогнозирования работоспособности элементов установок пиролиза,

используемых в нефтехимической отрасли. Работа является законченным научным исследованием и полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а сам автор заслуживает присвоения ей искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Ведущий научный сотрудник
математико-механического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета,
доктор физико-математических наук,
профессор, Иностранный член НАН
Республики Армения



Р.А. Арутюнян

02 декабря 2014 г.

Арутюнян Роберт Ашотович, телефон 8 (812) 4286944, e-mail: decanat@math.spbu.ru, 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский проспект, дом 28, Санкт-Петербургский государственный университет, Математико-механический факультет, ведущий научный сотрудник, профессор.

Подпись Р.А.Арутюняна заверяю
Ученый секретарь
доктор физ.-мат. наук, профессор



Е.В. Кустова