


05.23.01
М19

На правах рукописи



МАЛИКОВ ДЕНИС АНАТОЛЬЕВИЧ

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАЩИТНОМ СЛОЕ
БИПЛАСТМАССОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УПРУГОПОДАТЛИВОЙ ПРОСЛОЙКОЙ
В СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКЕ**

**Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции,
здания и сооружения»**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск – 2002

Работа выполнена на кафедре «Строительные конструкции и инженерные сооружения» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор В.М. Асташкин.

Научный консультант – кандидат технических наук,
старший научный сотрудник В.А. Пазушан.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор К.И. Еремин;
кандидат технических наук,
доцент С.Б. Шматов.

Ведущая организация – ЗАО «Интерпластик», г. Челябинск.

Защита состоится 17 апреля 2002 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, главный корпус, ауд. 716.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Просим Вас принять участие в защите и направить Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Ученый совет.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Трофимов Б.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При строительстве систем газоочистных сооружений, стволов вытяжных труб и технологических трубопроводов широкое распространение получили бипластмассовые оболочечные конструкции диаметром до 8 м. Срок их службы в условиях воздействия высокоагрессивных сред в 3 раза выше, чем у аналогов из нержавеющей и защищенных обычных сталей. Стенка бипластмассовых конструкций состоит из защитного термопластового и силового стеклопластикового слоев, при этом основная часть внешних нагрузок и собственный вес конструкции воспринимаются наружной силовой стеклопластиковой оболочкой, а агрессивное воздействие – внутренним защитным слоем.

Основной недостаток бипластмассовых конструкций в том, что при низких температурах (ниже -10°C) в защитном слое образуются трещины, через которые агрессивная среда проникает в силовую оболочку и разрушает несущую часть конструкции. Причиной разрушения защитного слоя являются высокие температурные напряжения (ТН), обусловленные различием коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) термопласта и стеклопластика, а также стесненностью их тепловых деформаций из-за жесткой связи слоев.

Для повышения эффективности применения бипластмассовых конструкций необходимы надежные способы снижения ТН и более точные методы их расчета, т.к. существующие методы расчета приводят к ошибкам в определении ТН в опасную сторону. Ошибки появляются из-за принятых в методах упрощений в части учета деформационных свойств материалов конструкции при изменении температуры во времени и эффекта «памяти» материала на тепловое воздействие.

Исходя из изложенного, выявление резервов снижения ТН и разработка уточненных методов их расчета, более полно отражающих действительную работу конструкций, являются актуальной задачей.

Цель работы: выявление закономерностей формирования температурных напряжений в бипластмассовых конструкциях при осесимметричном нестационарном тепловом воздействии, уточнение методов их расчета и оценка эффективности применения в силовой оболочке упругоподатливой прослойки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выявлены закономерности формирования ТН в защитном слое бипластмассовых конструкций при нестационарном тепловом воздействии;
- усовершенствована расчетная модель формирования температурных напряжений в защитном слое конструкции, где учтено проявление «памяти» материала защитного слоя на термомеханическое воздействие;

– усовершенствован метод расчета напряженного состояния бипласт-массовых конструкций с упругоподатливой прослойкой в силовой оболочке, позволяющий учесть радиальную податливость прослойки и особенность формирования температурных напряжений в защитном слое;

– получены новые количественные и качественные данные о напряженном состоянии защитного слоя конструкции при нестационарном тепловом воздействии.

Автор защищает:

– методику проведения и результаты экспериментально-теоретических исследований упругих и вязко-упругих деформационных свойств материала защитного термопластового слоя бипластмассовой конструкции и их проявления при нестационарном термомеханическом воздействии;

– методику и результаты исследования закономерностей формирования температурных напряжений в термопластовом слое бипластмассовой конструкции;

– метод расчета напряженного состояния бипластмассовых конструкций при нестационарном осесимметричном тепловом воздействии, позволяющий учитывать особенности проявления деформационных свойств материалов конструкции при изменении температуры во времени, упругую податливость прослойки силового слоя и проявление памяти материала термопластового слоя на термомеханическое воздействие;

– количественные и качественные оценки влияния вышеуказанных факторов на напряженное состояние конструкции при тепловом воздействии;

– конструктивно-технологические решения оболочек.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

– предложено более эффективное конструктивно-технологическое решение оболочек, позволяющее снизить температурные напряжения в защитном слое и повысить жесткость стенки при изгибе;

– расширена область возможного применения предлагаемых конструкций за счет введения в силовой слой упругоподатливой прослойки.

Внедрение.

Результаты работы использованы при проектировании и изготовлении стволов вытяжных башен-труб Братского алюминиевого завода (4 трубы диаметром 2 м, высотой 80 м) и Челябинского механического завода (одна труба диаметром 3 м, высотой 120 м).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на всероссийской конференции по проблемам проектирования неоднородных конструкций, посвященной 75-летию со дня рождения академика В.П. Макеева (г. Миасс, 1999 г.);

– на научно-технических конференциях ЮУрГУ (г. Челябинск, 1999, 2000, 2001 гг.);

– на научно-практическом семинаре-совещании «Оценка технического состояния строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений» (г. Челябинск, 2001 г.).

По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения с основными выводами и результатами работы, библиографии. Диссертация содержит 105 страниц основного текста, 7 таблиц, 60 рисунков, 115 библиографических источников, три приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава. Состояние вопроса и постановка задач исследования. Рассмотрены области применения, условия эксплуатации, конструктивно-технологические решения коррозионностойких оболочечных конструкций из полимерных материалов с защитным слоем из термопласта, выполнен анализ опыта их проектирования, изготовления и эксплуатации, а также сопоставительный анализ достижений теории и практики расчета напряженного состояния конструкций при тепловом воздействии.

Основным конструктивным элементом газопроводов, стволов вытяжных труб, сооружений газоочисток является цилиндрическая оболочка диаметром 0,5...8 м, длиной 3...6 м и отношением толщины к радиусу $h/R \leq 1/50$. Агрессивное воздействие среды обуславливает применение внутреннего защитного слоя из термопласта (поливинилхлорида, полиэтилена, полипропилена) толщиной 5...20 мм. Большие габариты конструкций и необходимость восприятия нагрузок обуславливают применение силового слоя из стеклопластиков.

Изготовление бипластмассовых конструкций осуществляется в два этапа: 1) листовая сборка термопластовой оболочки с применением сварки; 2) нанесение на термопластовую оболочку стеклопластика методом «мокрой» намотки стеклоткани, предварительно пропитанной эпоксидным или полиэфирным связующим.

Существенным недостатком бипластмассовых конструкций является разрушение защитного слоя (трещины с отслоением от силовой оболочки), наблюдаемое как при хранении, транспортировке, так и при остановках техпроцесса в холодное время года. Повреждение защитного слоя открывает доступ агрессивной среды к менее химстойкой силовой оболочке, из-за чего происходит ее ускоренное разрушение. Основной причиной разрушения защитного слоя являются растягивающие ТН, возникающие в нем при охлаждении конструкций, из-за различия КЛТР термопластов ($5...20 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹) и стеклопластиков ($1...2 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹) и жесткой связи защитного и силового слоев. Верхняя граница температурного диапазона (-10...+80°C) применения конструкций определяется значением температуры, при превышении которой происходит резкое снижение прочностных и деформационных свойств материалов конструкции. Нижняя граница – из условия недопущения хрупкого разрушения защитного слоя от ТН при низких темпе-

ратурах, особенно в зонах сварных швов. Оценочные расчеты по принятой в инженерной практике методике показывают, что при охлаждении в защитном слое бипластмассовых конструкций появляются ТН, составляющие 50...70% от кратковременной прочности (50...80 МПа) основного материала и достигающие прочности его сварных швов.

С момента изготовления конструкция подвергается нестационарным тепловым воздействиям: на стадии изготовления – нагрев-охлаждение в процессе термообработки, необходимой для ускорения полимеризации связующего силового слоя; при длительном хранении на открытом воздухе – сезонные колебания температуры; при эксплуатации – технологические изменения температуры.

Основы методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных конструкций из полимерных материалов в условиях воздействия переменных температур и внешних нагрузок разработаны в рамках теории термоупругости и термовязкоупругости в трудах Б.Е. Гейтвуда, Ю.Н. Работнова, А.Р. Ржаницина, Е.Б. Победри, Н.В. Колтунова. Особенностью рассматриваемой задачи является то, что температурное воздействие приводит не только к образованию ТН в конструкции, но и к изменению вязко-упругих свойств материалов, что совместно с реологическими процессами оказывает влияние на формирование ТН во времени.

В условиях воздействия переменных температур процессы формирования ТН в бипластмассовых конструкциях рассматривались Н.С. Кувшиновым, но раздельно при нагреве и охлаждении. Он показал, что температурно-временная зависимость деформационных свойств материалов конструкции существенно влияет на величину и изменение ТН во времени. Расчет ТН может осуществляться по формулам термоупругости: при нагреве с подстановкой вместо модуля упругости модуля деформаций при конечной температуре нагрева; при охлаждении – среднего значения модуля деформаций при начальной и конечной температурах процесса охлаждения с учетом длительности воздействия. Предложенный метод расчета ТН предусмотрен действующими нормами на проектирование бипластмассовых конструкций.

В работах В.М. Асташкина и В.В. Лихолетова показано, что при определении ТН в бипластмассовых конструкциях процессы нагрева и охлаждения необходимо рассматривать совместно, в противном случае погрешность определения растягивающих ТН достигает 3-кратной величины в опасную сторону. Ползучесть и релаксация приводят к увеличению ТН в конце цикла нагрев-охлаждение. Предложено для описания процесса формирования ТН использовать модель, состоящую из параллельно соединенных вязкоупругих структурных механических моделей. В основу этого подхода положены работы Д.А. Гохфельда и О.С. Садакова, в отличие от которых каждый элемент присоединялся к общей шине через «температурные тормоза», включающие и отключающие элементы при определенной температуре, соответствующей температурной зависимости модуля упругости материала.

Однако такой подход не получил достаточной экспериментальной проверки и требовал уточнения как в части использования более простой методики идентификации параметров модели, так и в части применения к бипластмассовым конструкциям.

В целом анализ методов расчета ТН, применяемых в инженерной практике, показал, что они приводят к ошибке определения ТН в опасную сторону и требуют уточнения в части совместного рассмотрения процессов нагрева и охлаждения с учетом температурно-временного фактора. Для этого требуется уточнение и экспериментальная проверка модели формирования ТН в защитном слое бипластмассовых оболочек.

Имеющиеся случаи разрушения защитного слоя бипластмассовых конструкций определяют актуальность разработки способов снижения ТН в защитном слое. Предложенное нами конструктивное решение с использованием упругоподатливой прослойки (легкого заполнителя) в силовой оболочке позволяет снизить ТН. Для подтверждения эффективности предложенного конструктивного решения необходимы аналитические и экспериментальные исследования с применением надежного аппарата расчета.

Методы расчета слоистых конструкций с легким заполнителем при тепловом воздействии разрабатывались В.Н. Кобелевым, Л.М. Коварским, С.И. Тимофеевым, В.В. Болотиним, А.Р. Ржанитиним. Для расчета ТН в предложенной конструкции эти методы требуют уточнений в части учета особенностей формирования ТН в защитном слое при нестационарном тепловом воздействии и сжимаемости (податливости) слоя заполнителя в поперечном направлении.

На основании изложенного сформулированы основные задачи исследования.

1. Провести экспериментально-теоретические исследования реологических свойств материала защитного слоя бипластмассовых оболочек и особенностей их проявления при нестационарном термомеханическом воздействии.

2. Уточнить расчетную модель формирования температурных напряжений в защитном слое бипластмассовой конструкции и определить ее параметры.

3. Уточнить метод расчета температурных напряжений в бипластмассовых конструкциях с учетом радиальной податливости прослойки в силовой оболочке и особенностей формирования температурных напряжений в защитном слое при нестационарном осесимметричном тепловом воздействии.

4. Скорректировать конструктивно-технологические решения бипластмассовых конструкций, обеспечивающие повышение эффективности их применения.

5. Разработать предложения для корректировки практических методов расчета бипластмассовых конструкций на тепловое воздействие.

Вторая глава. Методика исследований. Программа исследования включает следующие этапы:

- экспериментальную проверку уточненной модели формирования ТН в защитном слое бипластмассовых конструкций;
- экспериментальное и теоретическое исследование процессов формирования ТН в защитном слое при различных программах теплового воздействия и в различных условиях стесненности тепловых деформаций;

Для исследований в качестве материала защитного слоя принят НПВХ (винипласт) как наиболее широко применяемый для этих целей.

Для экспериментальных исследований ТН в защитном слое бипластмассовой конструкции и проверки используемого в работе метода их расчета разработана экспериментальная установка, моделирующая условия работы материала защитного слоя конструкции при нестационарном тепловом воздействии (рис. 1).

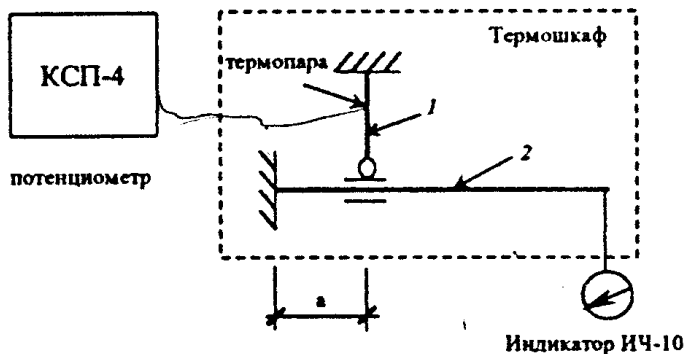


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - образец; 2 - пластина

Защитный слой моделируется вязко-упругим телом 1 (образец), а силовой слой - упругим телом 2 (пластина). Степень стесненности деформаций образца регулируется податливостью пластины (плечом a).

Установка смонтирована в термошкафу. Температура образца контролировалась термопарой, с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Перемещение свободного конца пластины измерялось индикатором часового типа с точностью 0,01 мм через каждые 2°C изменения температуры. Время фиксировалось секундомером. Результаты испытаний представлялись графически в координатах σ - T , где T - температура как функция времени. ТН вычисляли по известной жесткости пластины и перемещению ее свободного конца Δ :

$$\sigma = 6 \cdot E_2 J_2 (\Delta - \Delta_T) / (F_T a^2 (3l - a)),$$

где $E_2 J_2$ - жесткость металлической пластины; Δ_T - тарировочная поправка; a - плечо закрепления образца; l - длина металлической пластины; F_T - площадь сечения образца.

Исследование ТН в образце проведено при 9 программах теплового воздействия (6 циклов нагрев-охлаждение со средней скоростью 1 град/мин) с использованием аппарата математического планирования эксперимента. В качестве наиболее значимых управляемых факторов были выбраны максимальная температура нагрева образца и степень стесненности его деформаций. В качестве отклика выбраны максимальные растягивающие напряжения в образце в конце 6-го цикла теплового воздействия. Предложенная установка позволяет проследить процесс формирования ТН в материале защитного слоя оболочки при различных программах теплового воздействия и степени стесненности его деформаций.

Для описания деформационных свойств защитного слоя оболочки использовалась трехэлементная модель типа Кельвина-Фойгта (рис. 2, б), параметры которой есть функции температуры.

Температурная зависимость модуля упругости $E=f(T)$ определялась по результатам испытаний образцов материала согласно ГОСТ 9550-81, для чего испытано по 5 образцов при температурах 0, 20, 40, 60, 80, 90°C.

Для определения других параметров модели проведены испытания образцов на релаксацию напряжений при изгибе по трехточечной схеме при различных температурах на базе 10^4 с. Испытания проводились на разрывной машине 2055P-0.5, оборудованной термошкафом. Температура образцов при испытаниях контролировалась термопарами.

Для проверки параметров, полученных при испытаниях на релаксацию напряжений, проведены испытания на ползучесть. Всего испытано 50 образцов по 25 на ползучесть и релаксацию напряжений.

Для исследуемого материала проведено определение КЛТР по ГОСТ 15173-70 с помощью кварцевого дилатометра ДКВ-5А, всего испытано 5 образцов.

Для статистической обработки результатов испытаний использовались методы корреляционно-регрессионного анализа.

Третья глава. Экспериментально-теоретические исследования формирования температурных напряжений в защитном слое оболочек при нестационарном тепловом воздействии. В биластмассовых оболочках при нагреве в защитном слое из-за более высокого КЛТР возникают в осевом и кольцевом направлениях нормальные напряжения сжатия, а в силовом слое – растяжения. При охлаждении – знаки напряжений в слоях меняются. Величина напряжений во многом зависит от толщины (податливости) силового слоя. Вязко-упругие свойства стеклопластиков значительно меньше, чем у термопласта, зависят от температуры и в первом приближении не учитываются.

Для моделирования вязко-упругих свойств материала защитного слоя (НГВХ) в диапазоне температур 20...80°C выбрана трехэлементная модель вязко-упругого тела типа Кельвина-Фойгта с зависящими от температуры

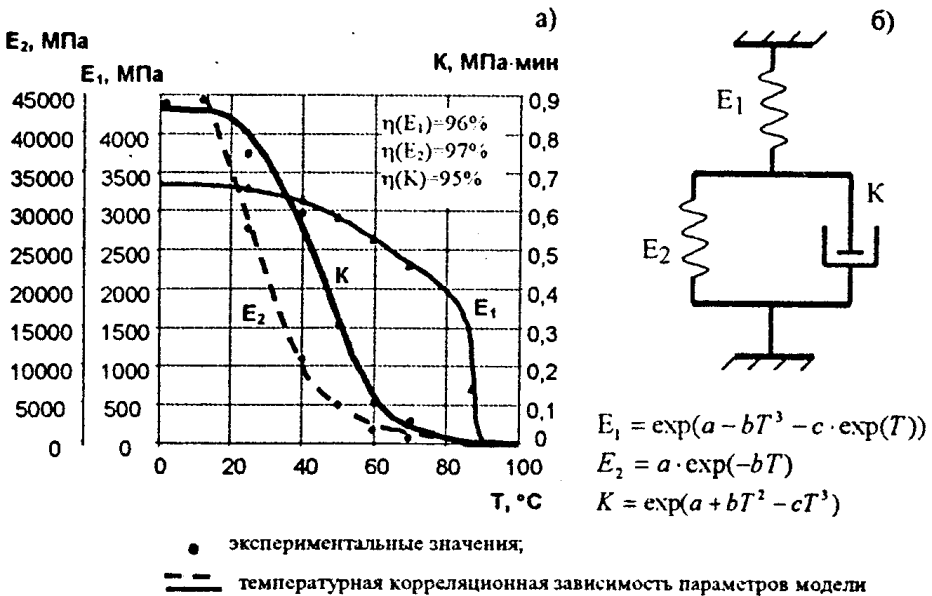
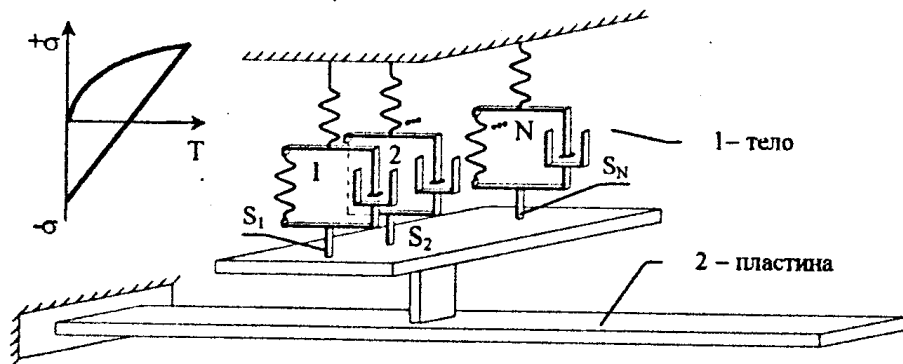


Рис. 2. Температурные зависимости параметров E_1 , K , E_2 (а) трехэлементной модели вязко-упругого тела (б) на примере винипласта

параметрами. Температурные зависимости параметров модели получены по результатам испытаний на релаксацию и представлены на рис. 2.

Указанная механическая модель и ее параметры использовались для построения уточненной модели, описывающей процесс изменения ТН при переменном температурном воздействии. Модель представляет собой ряд параллельно соединенных вязко-упругих элементов типа Кельвина-Фойгта (рис. 3). Каждый i -й элемент соединен с общей «шиной» через стержни S_i : абсолютно жесткие при $T < T_i$ и абсолютно податливые при температуре большей или равной T_i . Закон отключения и включения отдельных элементов модели определяется по температурной зависимости модуля упругости материала из предположения, что работающие элементы в совокупности определяют свойства материала при данной температуре. Таким образом, на каждом этапе нагрева из всей совокупности работают только элементы с порядковыми номерами от i до N , а элементы от 1-го до $(i-1)$ -го выключены из работы. Число элементов модели N равно числу шагов теплового нагружения. В процессе нагрева в образце возникают сжимающие ТН. Их величина обусловлена с одной стороны ростом нереализованной части тепловой деформации приводящим к увеличению напряжений, с другой – снижением модуля упругости материала (отключение части элементов с ростом температуры) и релаксацией напряжений (преобразование части упругих деформаций работающих элементов в вязко-упругие), приводящим к снижению уровня напряжений. В зависимости от скоростей этих процессов, ТН при

нагреве могут как возрастать, так и убывать. В отключаемых элементах накопленная до отключения вязко-упругая часть деформации начинает сниматься в результате обратной ползучести. Параметры E_1 , K , E_2 отключенных элементов определяются как доля величины соответствующих па-



1, 2, N – подэлементы в виде элементов модели Кельвина-Фойгта

Рис. 3. Расчетная механическая модель оболочки

раметров общей модели, например $K=(K_{i-1}-K_i)/K$, на i -м шаге. В конце этапа нагрева ТН будут определяться количеством активных элементов и величиной накопленных в них вязко-упругих деформаций сжатия. Оставшаяся часть вязко-упругих деформаций в отключенных элементах на величину ТН пока не влияет. При охлаждении происходит постепенное включение отключенных на этапе нагрева элементов, что моделирует возрастание с температурой модуля упругости. Сжимающие напряжения снижаются до нуля, и далее происходит рост растягивающих напряжений. При этом в вязко-упругих частях элементов еще сохраняются деформации сжатия, которые стремятся к восстановлению и обуславливают ускоренную релаксацию напряжений в подключенных элементах при охлаждении.

Расчет ТН при заданной программе теплового воздействия выполняется пошаговым методом. На i -м шаге нагрева ТН сначала определяются из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (\varepsilon'_{F0} - \alpha \cdot \Delta T_i) \cdot L &= \frac{\sigma'_0 \cdot Fa^3}{3E_m J_m}; \\ \sigma'_0 &= \sigma^{i-1} E'_1 / E_1^{i-1} + \Delta \sigma^i = E'_1 (\varepsilon'^{i-1}_{F0} + \Delta \varepsilon^i_F); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где a – плечо опирания образца 1 на пластину 2; L – длина образца; E'_1 – модуль упругости образца на i -м шаге при $T=T_i$; α – КЛТР материала образца; $E_m J_m$ – жесткость пластины 2; ε'_{F0} – силовая деформация образца; σ'_0 – температурные напряжения; $\Delta T_i = T_i - T_0$ – приращение температуры.

Затем получаем уточненные значения деформаций (2) и напряжений (3) с учетом протекающих на шаге процессов релаксации и ползучести, для чего решалась система уравнений (4)

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{p0} + \Delta\varepsilon'_p; \quad (2)$$

$$\sigma' = \sigma'_0 + \Delta\sigma'_i; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon'_p &= \frac{(\sigma'_0 + \Delta\sigma'_i) \cdot Fa^3}{3E_n J_n L} + \alpha \cdot \Delta T - \varepsilon'_{p0}; \\ E' n' \dot{\varepsilon}'_p + H' \varepsilon'_{p0} &= n' \dot{\sigma}' + \sigma'_0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $H' = E'_1 \cdot E'_2 / (E'_1 + E'_2)$ – длительный модуль упругости на i -м шаге;
 $n' = K' / (E'_1 + E'_2)$ – реологический коэффициент на i -м шаге.

При охлаждении расчет выполняется аналогичным образом только закон Гука в системе (1) записывается в дифференциальной форме:

$$\Delta\dot{\sigma}' = (E'_1 \cdot \Delta\varepsilon'_p)' = \dot{E}'_1 \cdot \Delta\varepsilon'_p + E'_1 \cdot \Delta\dot{\varepsilon}'_p$$

Характерная картина изменения ТН в образце НПВХ при повторяющихся циклах нагрев-охлаждение представлена на рис. 4.

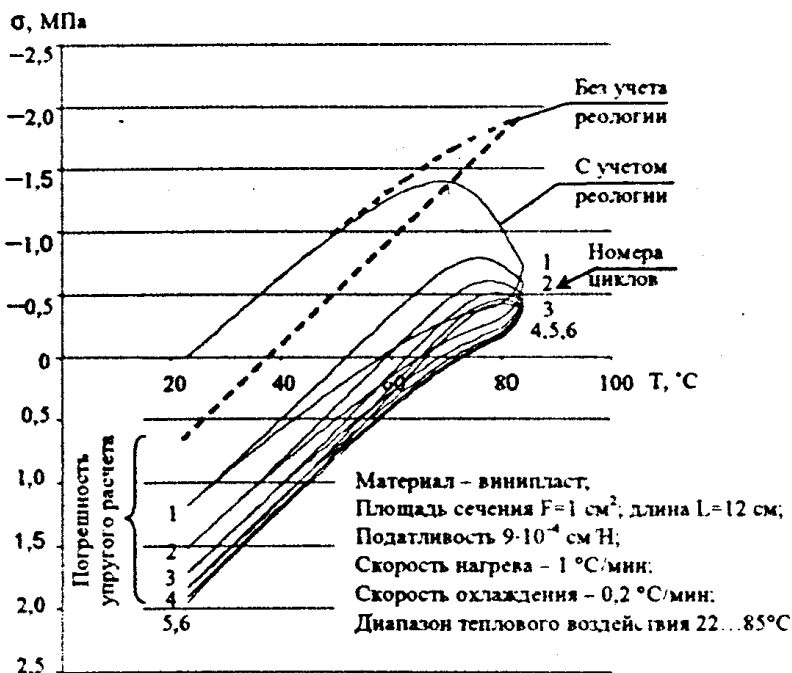


Рис. 4. Характер изменения ТН в защитном слое при нестационарном тепловом воздействии (расчетные данные)

На примере винипласта аналитически получено (см. рис. 4.) и экспериментально доказано, что проявление реологических свойств при нестационарном тепловом воздействии приводит к постепенному росту опасных растягивающих ТН в конце циклов нагрев-охлаждение. Через определенное количество циклов в зависимости от условий проведения эксперимента процесс нарастания ТН стабилизируется. Погрешность упругого расчета может достигать 2...5-кратной величины в опасную сторону.

Экспериментальная проверка модели формирования ТН в защитном слое из НПВХ с привлечением аппарата математического планирования эксперимента показала, что погрешность определения ТН при девяти различных программах теплового воздействия составляет 8...14 %, а характер их изменения во времени в зависимости от скоростных параметров нагрева и охлаждения, а также степени стесненности тепловых деформаций во всем возможном при эксплуатации диапазоне температур, удовлетворительно соответствует расчету.

Установлено, что определяющее значение на величину ТН имеют максимальная температура нагрева и степень стесненности тепловых деформаций образца. Существенно снизить величину ТН возможно за счет уменьшения степени стесненности тепловых деформаций образца (защитного слоя) путем увеличения податливости опорной пластины. Характер температурно-временной зависимости деформационных свойств, скоростные параметры и количество циклов нагрева и охлаждения только ускоряют или замедляют время приближения к максимальному значению ТН.

Четвертая глава. Аналитические исследования ТН в защитном слое цилиндрических бипластмассовых конструкций при нестационарном осесимметричном тепловом нагружении.

За основу уточненного метода расчета цилиндрических оболочек приняты известные методы расчета трехслойных конструкций, разработанные В.Н. Кобелевым, Л.М. Коварским, С.И. Тимофеевым.

Рассматривается бипластмассовая цилиндрическая оболочка радиуса R , длиной L с упругоподатливой прослойкой в силовой оболочке в однородном осесимметричном температурном поле (рис. 5). Стенка оболочки многослойная: внутренний защитный слой из НПВХ толщиной δ_1 , обшивки из эпоксидного стеклопластика δ_2 и δ_4 , прослойка из пенополиуретана толщиной δ_3 . Заданы КЛТР слоев, известны параметры модели, описывающей вязко-упругие свойства материала защитного слоя (E_1 , K , E_2) для разных температур. Изменение температуры во времени t задано функцией. Наибольшие ТН возникают в средней по длине части оболочки, удаленной от торцов. В элементе стенки оболочки как в кольцевом, так и в осевом направлениях возникают нормальные усилия растяжения-сжатия в слоях, а также усилия растяжения-сжатия в радиальном направлении, которые учитываются только для заполнителя (см. рис. 5). Материалы слоев считаются изотропными. При вычислении ТН рассматривается кольцо единичной ши-

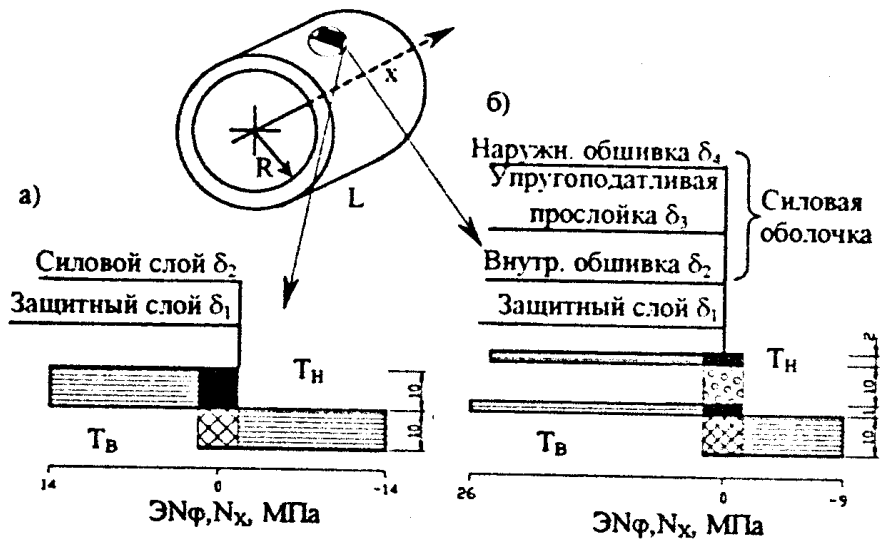


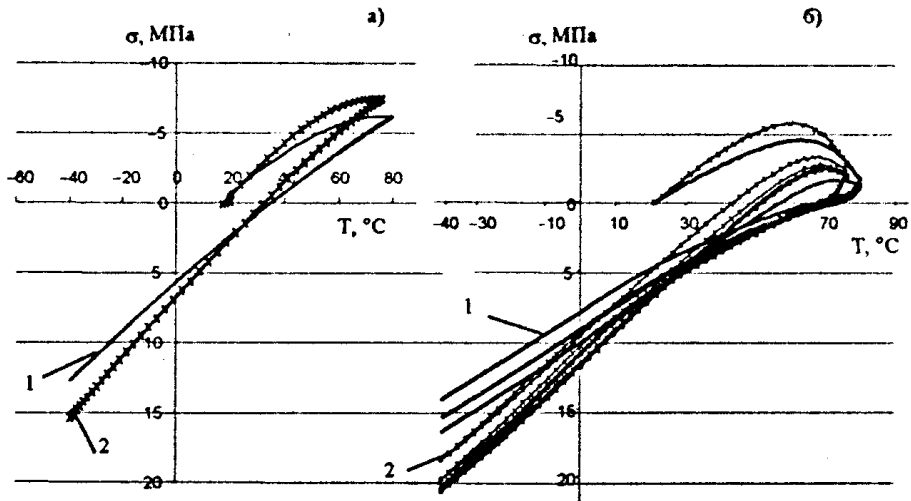
Рис. 5. Эпюры кольцевых и осевых ТН в слоях бипластмассовой конструкции в средней по длине ее части: без упругоподатливой прослойки (а); с упругоподатливой прослойкой в силовой оболочке (б)

рины, вырезанное из средней зоны оболочки плоскостями, перпендикулярными ее оси, слои которого нагружены в осевом и кольцевом направлениях нормальными усилиями растяжения-сжатия, вызванными тепловым воздействием. Работа низко модульной прослойки в осевом и кольцевом направлениях не учитывалась. В крайних зонах оболочки из-за касательных усилий осевые нормальные усилия меньше, чем в средней части оболочки.

Сжимаемость прослойки в радиальном направлении учитывается дополнительными условиями равновесия, совместности деформаций и физическими соотношениями.

На всех этапах теплового воздействия выписываются соотношения для каждого слоя в отдельности, а затем производится «стыковка» полученных решений из условий совместного деформирования слоев.

Для учета переменного теплового воздействия и температурно-временной зависимости свойств материалов конструкции использовался метод вычисления ТН, предложенный и экспериментально проверенный в главе 3. Каждый цикл разбивался на N шагов на этапе нагрева и N шагов на этапе охлаждения. В качестве «начальных» условий на каждом шаге принимается НДС, полученное из расчета предыдущего шага. На каждом этапе нагружения решение вязко-упругой задачи сводится к решению соответствующей «упругой» задачи с дополнительными реологическими деформациями, при этом из «упругого» решения получают начальные на данном шаге напряжения и деформации.



1 – бипластмассовая конструкция с упругоподатливой прослойкой в силовой оболочке;
 2 – бипластмассовая конструкция без прослойки в силовой оболочке

Рис. 6. Температурные напряжения в защитном слое оболочки, полученные без учета (а) и с учетом (б) реологических свойств материала, в диапазоне от $-40...+90^{\circ}\text{C}$

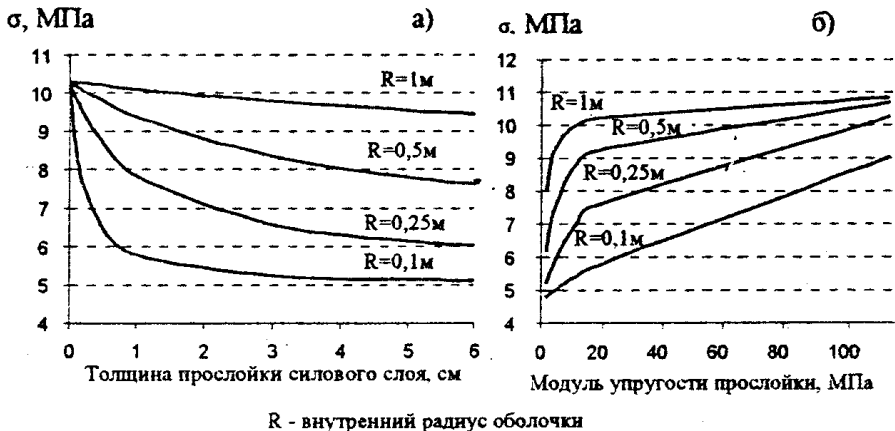


Рис. 7. Остаточные напряжения в защитном слое оболочки в конце цикла нагрев-Зохлаждение ($20...90...-40^{\circ}\text{C}$) в зависимости от толщины прослойки силового слоя (а) и ее модуля упругости (б)

Уточненный метод позволяет учесть сжимаемость прослойки силового слоя, температурно-временную зависимость свойств материалов слоев и особенности формирования ТН при циклическом (нагрев-охлаждение) тепловом воздействии.

Оценка эффективности применения низко модульной прослойки в силовом слое оболочки показала следующее.

Накапливающаяся из-за реологических свойств материала защитного слоя ТН в бипластмассовых конструкциях с прослойкой в силовой оболочке при повторных циклах нагрев-охлаждение на 30% ниже, чем в конструкциях без прослойки в силовом слое (рис. 6).

С увеличением радиуса конструкций эффективность введения низко модульной прослойки в силовой слой уменьшается (рис. 7, а). В этом случае для снижения ТН в защитном слое необходимо обеспечение большей податливости прослойки, которая может быть достигнута увеличением ее толщины и снижением ее модуля упругости (см. рис. 7, б).

Температурные напряжения в защитном слое бипластмассовых конструкций за счет введения в силовой слой прослойки из низко модульного материала могут быть снижены на 10...50%. Увеличение толщины прослойки обеспечивает при этом снижение ТН в защитном слое с одновременным повышением общей жесткости конструкции. Введение низко модульной прослойки в силовой слой конструкции приводит с одной стороны к снижению ТН из-за ее податливости, с другой стороны из-за ее теплоизоляционных свойств возрастает градиент температуры по толщине стенки конструкции, а следовательно ТН также возрастают.

Пятая глава. Практическое использование результатов исследований и конструктивно-технологические мероприятия по повышению эксплуатационной надежности оболочек из полимерных материалов. Предложен вариант конструктивно-технологического решения силового слоя бипластмассовой оболочки со стеклопластиковыми обшивками, связанными кольцевыми ребрами жесткости и прослойкой из низко модульного пенополиуретана (рис. 8). Это конструктивное решение реализовано при



Рис. 8. Слоистая оболочка и ее продольный разрез

реконструкции 4 стволов башен-труб Братского алюминиевого ($H=80$ м, $D=2$ м) и 1 ствола ($H=120$ м, $D=3$ м) Чепецкого механического заводов. Кольцевые ребра жесткости, связывающие обшивки, выполнены изогнутыми в радиальном направлении из плоскости, перпендикулярные оси оболочки. Это обеспечивает совместную работу обшивок, т.к. ребра хорошо работают на сдвиг и одновременно не препятствуют температурным деформациям обшивок в радиальном направлении, т.е. обеспечивают снижение ТН в защитном слое из-за повышенной податливости ребер в этом направлении.

Разработан вариант технологического исполнения оболочки с трехслойной структурой стенки силового слоя, предусматривающий вкладывание пенополиуретановых скорлуп в процессе намотки. Даны технические предложения по ленточному введению сыпучего на стадии переработке пенопласта. Разработан вариант слоистой конструкции с огнезащитным покрытием. Благодаря этому достигается снижение ТН, повышение несущей способности, жесткости оболочек и огнестойкости при сохранении технологичности.

Разработаны рекомендации по уточнению инженерного метода расчета с учетом изменчивости свойств и вязко-упругой работы материала защитного слоя многослойных оболочек при нестационарном тепловом воздействии. Предлагаемый метод расчета сохраняет форму известных инженерных методов и позволяет определить максимально возможные за период эксплуатации ТН. Для этого начальное значение температуры T_0 , при которой напряжения в конструкции считаются нулевыми, предлагается заменить на фиктивное значение температуры T_x , при которой ТН в конце последнего за период эксплуатации цикла становятся равными нулю. Температура T_x в общем случае зависит от программы теплового воздействия и температурно-временной зависимости свойств полимерного материала. Зная T_x , достаточно произвести расчет конструкции на охлаждение в упругой постановке по существующей методике при условии, что $T_0=T_x$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Эффективной структурой стенки конструкций для эксплуатации в агрессивных средах является бипластмассовая, но при температуре ниже -10°C в ней возникают температурные напряжения, величина которых сопоставима с прочностью защитного слоя, что приводит к разрушению последнего и ограничивает температурный диапазон применения этих конструкций.

2. Основными факторами, способствующими образованию опасных температурных напряжений, являются плохая совместимость по тепловым деформациям материалов слоев конструкции, а также малая податливость силовой оболочки. Снизить уровень температурных напряжений в защитном слое возможно за счет увеличения податливости силовой оболочки,

для этого нами предложено в ее состав ввести упругоподатливую прослойку (легкий наполнитель). Оценка эффективности предложенного решения требует проведения аналитического и экспериментального исследования.

3. Существующие методы расчета слоистых конструкций с легким наполнителем не учитывают сжимаемость (податливость) слоя наполнителя в поперечном направлении и не в полной мере отражают специфику работы полимерных материалов при неизотермическом нагружении.

4. Расчетная модель, предложенная в работе, позволяет физически наглядно и с достаточной точностью описывать процесс формирования температурных напряжений в защитном слое оболочек при неизотермическом нагружении. Методики построения и идентификации параметров модели базируются на стандартных испытаниях, просты в реализации и пригодны для использования в инженерной практике. Экспериментальная проверка показала, что погрешность расчета температурных напряжений по модели при различных программах теплового воздействия не превышает 14 %.

5. Проявление реологических свойств материала защитного слоя при нестационарном тепловом воздействии в условиях стесненности тепловых деформаций приводит к постепенному росту опасных растягивающих температурных напряжений, что аналитически обосновано и экспериментально проверено на примере непластифицированного поливинилхлорида. Расчет температурных напряжений без учета реологических свойств материала приводит к погрешности, которая может достигать 2...5-кратной величины в опасную сторону.

6. Периодичность нагрева и охлаждения, параметры температурно-временной зависимости деформационных свойств материалов способны только ускорить или замедлить время приближения к предельному значению температурных напряжений.

7. Предложен метод расчета температурных напряжений в бипластмассовых конструкциях с упругоподатливой прослойкой в силовой оболочке, учитывающий сжимаемость прослойки, температурно-временную зависимость свойств материалов при неизотермическом нагружении и градиент температуры по толщине стенки конструкции. С использованием этого метода установлено, что за счет введения в силовой слой прослойки из низко модульного материала температурные напряжения в защитном слое могут быть снижены на 10...50%.

8. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по уточнению практических методов расчета температурных напряжений, где за основу взята фиктивная температура, соответствующая нулевому значению напряжений при последнем цикле теплового воздействия.

9. Предложены конструктивно-технологические решения силовой оболочки бипластмассовых конструкций, изготавливаемых циклическим и непре-

рывным способами, основанными на введении в состав стенки оболочки прослойки из легкого заполнителя. Эти решения позволяют снизить температурные напряжения в защитном слое без ущерба жесткости стенки силовой оболочки по изгибу и расширить область применения конструкций.

10. Результаты исследований использованы при проектировании и изготовлении стволов вытяжных башен-труб Братского алюминиевого завода (4 трубы диаметром 2 м, высотой 80 м) и Челябинского механического завода (одна труба диаметром 3 м, высотой 120 м). Конструктивно-технологические решения предложенных оболочек защищены тремя патентами РФ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Асташкин В.М., Пазушан В.А., Маликов Д.А. Проблемы эффективного применения композиционных материалов в коррозионно-стойких конструкциях сооружений промпредприятий // Четвертые академические чтения. – Екатеринбург: ЕНУЦ, 1999. – С. 146–149.

2. Асташкин В.М., Пазушан В.А., Маликов Д.А. Повышение эффективности применения композиционных материалов в коррозионностойких конструкциях сооружений промпредприятий // XVIII Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций, посвященная 75-летию со дня рождения академика В.П. Макеева: Тезисы докладов – Миасс: МНУЦ, 1999. – С. 37.

3. Асташкин В.М., Пазушан В.А. Маликов Д.А. Температурные напряжения в многослойных конструкциях из полимерных композиционных материалов при нестационарном тепловом воздействии // Проблемы проектирования неоднородных конструкций: Труды XVIII Российской школы – Миасс: МНУЦ, 1999. – С. 92–97.

4. Слоистая цилиндрическая оболочка: Свидетельство на полезную модель №12999 РФ / В.М. Асташкин, В.А. Пазушан, Д.А. Маликов, В.А. Лужков – Заявл. 15.11.99, опублик. в Бюл. №8 за 2000 г.

5. Слоистая оболочка с огнезащитным покрытием: Свидетельство на полезную модель №16841 РФ / В.М. Асташкин, В.А. Пазушан, В.А. Лужков, Д.А. Маликов, Г.А. Шахтарин – Заявл. 30.10.00, опублик. в Бюл. №5 за 2001 г.

6. Устройство для непрерывного изготовления труб из стеклопластика: Свидетельство на полезную модель №16842 РФ / Д.А. Маликов, В.М. Асташкин, В.А. Пазушан и др. – Заявл. 30.10.00, опублик. в Бюл. №5 за 2001 г.

МАЛИКОВ ДЕНИС АНАТОЛЬЕВИЧ

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАЩИТНОМ СЛОЕ
БИПЛАСТМАССОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УПРУГОПОДАТЛИВОЙ ПРОСЛОЙКОЙ
В СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКЕ**

Специальность 05.23.01 – «Строительные конструкции,
здания и сооружения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно–Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 13.03.2002. Формат
60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 90 экз. Заказ 43/120.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.