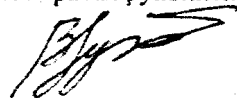


05.23.01

1836

На правах рукописи



ЛУЖКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ ФАОЛИТА В КОНСТРУКЦИЯХ
ГАЗОТВОДЯЩИХ СТВОЛОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ
И ГАЗОХОДОВ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ДЫМОВЫХ
ГАЗОВ ДО 200 °С**

**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
Владимир Михайлович Асташкин.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Николай Петрович Ершов;

кандидат технических наук, доцент
Сергей Борисович Шматов.

Ведущая организация – ЗАО «ПРОЕКТХИМЗАЩИТА», г. Москва.

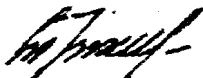
Защита состоится 26 июня 2002 г., в 12-00, на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, главный корпус, ауд. 710.

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 «24» июня 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Трофимов Б.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Снижение тепловой нагрузки, изменения в топливно-энергетическом балансе промышленных печей и котлоагрегатов, а также внедрение ресурсосберегающих технологий и систем мокрой газоочистки привели к снижению температур дымовых газов до 100...200 °С и увеличению их влажности. В этих условиях образование кислого конденсата внутри газоотводящих трактов приводит к интенсивному коррозионному износу несущих конструкций, выполненных из традиционных строительных материалов (кирпича, железобетона и стали). Срок их службы сокращается в 2...4 раза, а затраты на капитальные ремонты, проводимые с периодичностью в 5...10 лет, достигают 30% стоимости сооружений.

Признанным способом восстановления эксплуатационной надежности таких сооружений является устройство внутреннего газоотводящего ствола и газоходов из газоплотных, химически стойких материалов. При этом снижение температур дымовых газов сделало возможным, а изменение соотношения цен на основные конструкционные коррозионно-стойкие материалы - экономически оправданным применение в конструкциях газоотводящих стволов и газоходах полимерных композиционных материалов (ПКМ). К настоящему времени стоимость газоотводящих стволов из ПКМ в 2,5...4 раза меньше, чем у аналогов из легированных сталей и цветных металлов.

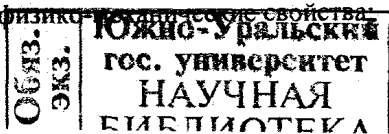
Для наиболее часто применяемых конструкций из ПКМ на эпоксидных и полиэфирных связующих температурным пределом эксплуатации (характеризующимся теплостойкостью по Мартенсу) является 100 °С. Кроме того, из-за горючести таких ПКМ, их применение в газоотводящих трактах тепловых агрегатов, где возможно воспламенение остатков топлива, недопустимо. Поэтому для конструкций газоотводящих стволов и газоходов дымовых труб наиболее перспективными являются ПКМ на фенолформальдегидном связующем, что связано с их потенциально высокой теплостойкостью и трудносгораемостью. Среди ПКМ на этом связующем для подобного рода конструкций вентиляционных труб наибольшее распространение получил фаолит, но теплостойкость выпускаемых до настоящего времени фаолитовых конструкций не превышала 130 °С и это являлось основным фактором, сдерживающим их применение в сооружениях дымовых труб.

Целью работы является разработка научно обоснованных технических предложений, обеспечивающих повышение температурной границы применения фаолитовых конструкций для использования их в газоотводящих стволах дымовых труб и газоходах тепловых агрегатов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

— получены новые данные о физико-механических свойствах фаолита в интервале температур 20...180 °С;

— выявлены закономерности влияния технологических параметров термического отверждения фаолита на его физико-механические свойства.



– исследован процесс формирования остаточных технологических напряжений в конструкциях крупногабаритных фаолитовых оболочек газоотводящих трактов, предназначенных для отвода дымовых газов с температурой до 200 °С;

– получены количественные и качественные данные о влиянии технологической предыстории полимерного композиционного материала на термонапряженное состояние фаолитовых конструкций газоотводящих трактов тепловых агрегатов при их пуске в эксплуатацию.

Автор защищает:

– разработанные способы термического отверждения фаолитовых конструкций, обеспечивающие повышение теплостойкости фаолита до 200 °С;

– результаты исследования механических свойств фаолита высокой теплостойкости при кратковременном и длительном действии нагрузок;

– методику и результаты исследований изменения деформационных свойств и структурной усадки фаолита в процессе термического отверждения материала;

– методику и результаты исследования закономерностей формирования остаточных технологических напряжений в фаолитовых оболочках, отверждаемых разработанными способами;

– количественные и качественные оценки влияния остаточных технологических напряжений и проявления эффекта памяти о термомеханическом воздействии на термонапряженное состояние фаолитовых конструкций при их пуске в эксплуатацию.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

– разработан энергосберегающий способ отверждения фаолитовых конструкций при температурном градиенте по толщине стенки, позволяющий повысить теплостойкость конструкций без увеличения продолжительности цикла тепловой обработки и без снижения их качества;

– получены температурные и температурно-временные коэффициенты прочности и деформативности фаолита высокой теплостойкости для проектирования коррозионностойких конструкций с его применением;

– расширена область применения фаолитовых оболочек на конструкции газоотводящих трактов промышленных печей и котлоагрегатов с температурой дымовых газов до 200 °С.

Внедрение

Результаты работы приняты к использованию ОАО «УРАЛВНИПИ-ЭНЕРГОПРОМ» (г. Екатеринбург) для проектирования газоходов и подвесных стволов дымовых труб.

Режимы тепловой обработки и физико-механические показатели фаолита высокой теплостойкости отражены в ТУ 2257-001-01394834-01, ТУ 2292-004-01394834-00, по которым производится изготовление фаолитовых конструкций на Асбестовском заводе металлоконструкций

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII Российской школе, посвященной проблемам проектирования неоднородных конструкций (г. Миасс, 1999), на конференции молодых специалистов электроэнергетики – 2000 (г. Москва, 2000), на научно-практическом семинаре-совещании «Оценка технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений» (г. Челябинск, 2001), на 51-ой...54-ой научно-технических конференциях в Южно-Уральском государственном университете (г. Челябинск, 1999-2002).

По материалам диссертации опубликовано 10 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, заключения и библиографии. Работа содержит 145 страниц основного текста, в том числе 29 таблиц, 66 рисунков, 164 библиографических источника, и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава. Состояние вопроса, постановка задач исследования

Анализ зарубежного и отечественного опыта проектирования и применения ПКМ для стволов вентиляционных труб показывает, что с позиций теплостойкости и пожаробезопасности наиболее перспективным материалом для конструкций газоотводящих трактов тепловых агрегатов является фаолит – хаотически армированный реактопласт на резольном фенолоформальдегидном связующем. К настоящему времени эксплуатируется свыше 200 фаолитовых вентиляционных труб, основными элементами которых являются прямолинейные цилиндрические царги – оболочки диаметром 1...7 м, длиной до 6 метров и отношением толщины стенки к радиусу $h/R < 1/50$. При этом теплостойкость этих конструкций не превышает 130 °С, что до сих пор не позволяло применять конструкции из фаолита в газоотводящих трактах тепловых агрегатов.

Технология производства конструкций из фаолита и механизм термического отверждения резолов подробно изложены в работах А.Ф. Николаева, И.А. Егорова, А. Кнопа, В. Шейба, В.П. Кондратьева. Ими показано, что теплостойкость и механические свойства фенольных реактопластов напрямую связаны со степенью полимеризации связующего, полная конверсия которого достигается только при температурах, близких к температуре деструкции полимера. В то же время увеличение максимальной температуры термообработки крупногабаритных фаолитовых оболочек, изготавливаемых по эмпирически подобранным режимам (без прессования, в течение 30...54 ч), и поликонденсационный механизм реакции отверждения фенолоформальдегидной смолы приводят к резкому росту технологической дефектности конструкций (образованию макропор и трещин), т.к. при 130 °С до 95% олигомера конвертируется в жесткий полимер сетчатой структуры.

Кроме того, увеличение максимальной температуры отверждения и более глубокие процессы структурного превращения связующего обуслав-

ливают рост в фаолитовых оболочках остаточных температурных и усадочных макронапряжений, которые могут вызвать разрушение конструкций сразу после их изготовления.

Основы методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) неоднородных конструкций в условиях фазовых превращений материала разработаны в трудах Н.Х. Арутюняна, В.Б. Колмановского и др. Применительно к конструкциям из композиционных материалов теоретические основы оценки остаточных технологических макронапряжений и их влияния на поведение конструкций при эксплуатации заложены в работах В.В. Болотина, И.Ф. Образцова, В.Т. Томашевского, Ю.А. Афанасьева, В.С. Яковлева. Но решение прикладных задач в строгой постановке трудоемко, поэтому введение ряда упрощений в работах Л.В. Клычникова, А.С. Захватава, В.С. Куликова (переход от рассмотрения сплошного тела к его слоистой модели, принятие гипотезы о неизменности теплофизических и механических свойств слоев в течение отдельных этапов изготовления, упрощение термовязкоупругой модели ПКМ) позволило упростить расчетную оценку остаточных напряжений без существенной потери точности.

Аппарат расчета оболочечных конструкций, в том числе и из полимерных материалов, на внешние нагрузки и воздействия нашел полное и глубокое отражение в трудах С.А. Амбарцумяна, И.А. Биргера, В.В. Болотина, В.З. Власова, А.С. Гольденвейзера, Н.П. Ершова, С.Н. Кана, С.П. Тимошенко, Е.Б. Победри и др.

Исследованиями В.М. Асташкина и Н.С. Кувшинова показано, что в крупногабаритных оболочечных конструкциях газоходов из ПКМ даже при умеренных температурах рабочих сред (до 80 °С) доля температурных напряжений в общем напряженном состоянии превышает 50%, поэтому оценка термонапряженного состояния фаолитовых оболочек при температурах рабочих сред до 200 °С является, очевидно, актуальной задачей.

Кроме того, при охлаждении конструкции после тепловой обработки одновременно с ростом остаточных напряжений часть силовых деформаций «замораживается», преобразуясь в вынужденно-эластические. Последние являются обратимыми и при повторном нагреве формируют новую картину НДС конструкции. Это отмечено в работах Ю.С. Лазуркина, И.Ф. Образцова, Р.А. Турусова и получило развитие в работах О.С. Садакова, В.М. Асташкина. Ими предложен общий подход к моделированию эффектов памяти в полимерных материалах на основе структурных моделей. В работах В.В. Лихолетова, В.А. Пазушана показано, что для учета эффектов памяти в термопластовых элементах конструкций целесообразно применение многоэлементных механических моделей с «температурными тормозами».

В целом анализ методов расчета температурных напряжений в оболочках из ПКМ показал, что существующие методы не учитывают влияние технологической предыстории на напряженное состояние конструкций при эксплуатации.

Таким образом, для использования фаолитовых конструкций в газоотводящих стволах дымовых труб и газоходах тепловых агрегатов необходимо решить следующие задачи:

1. Определить режимы термообработки фаолита, позволяющие повысить его теплостойкость без увеличения технологической дефектности, и разработать энергосберегающие способы тепловой обработки конструкций.
2. Исследовать основные физико-механические свойства фаолита высокой теплостойкости в интервале температур до 200 °С.
3. Исследовать закономерности формирования остаточных технологических напряжений в фаолитовых оболочечных конструкциях.
4. Оценить влияние технологической предыстории на термонапряженное состояние фаолитовых оболочечных конструкций при пуске в эксплуатацию газоотводящих трактов тепловых агрегатов с температурой дымовых газов до 200 °С.
5. Разработать технические предложения по проведению термообработки фаолитовых конструкций.

Вторая глава. Методика исследований

Последовательность проведения исследований соответствовала порядку постановки основных задач работы.

Для исследования влияния основных технологических параметров отверждения фаолита разработано лабораторное оборудование, позволяющее автоматически поддерживать температуру отверждения опытных фаолитовых изделий (пластин и оболочек), скорость подъема температуры и заданный температурный градиент на поверхностях изделий, а для количественной оценки интенсивности выделения низкомолекулярных продуктов реакции отверждения фаолита при температурах до 200 °С использован дифференциальный термический анализ.

Сложность одновременно протекающих явлений различной природы при отверждении фаолита определила целесообразность применения методов математического планирования эксперимента для построения математической модели процесса. Основными откликами приняты дефектность отвержденного фаолита, его теплостойкость по Мартенсу (методика ГОСТ 21341-75) и удельная ударная вязкость (методика ГОСТ 4647-80).

Дефектность фаолита оценивалась по относительному содержанию в сечении фаолитового образца макропор площадью свыше 0,001 мм². Для этого поперечное сечение 10 образцов, отвержденных в одинаковых условиях, полировалось и с разрешением 2232 точки/мм² вводилось в ЭВМ. После чего выполнялась векторизация и определение площади внутренних дефектов на единицу площади фаолитового образца.

Экспериментальное исследование механических характеристик фаолита (прочности при изгибе и модуля деформаций) выполнялось при кратковременном и длительном действии нагрузок при температурах образцов 20,

100, 130, 150, 180 °С. При каждой температуре испытывалось по 5 образцов. Температура при испытаниях фиксировалась при помощи ХК термопар, введенных в образцы, и потенциометра КСП-4 с точностью ± 2 °С.

Прочность фаолита определялась при изгибе по трехточечной схеме (методика ГОСТ 4648-71) в термокамере, установленной на испытательной машине 2055P-0.5, с определением разрушающей нагрузки электронным силоизмерителем с точностью ± 0.1 Н.

Определение модуля деформаций и испытания на ползучесть фаолита проводились в термошкафу SPT-200 на установке, подобной прибору Мартенса, при чистом изгибе образцов.

Для оценки механических характеристик фаолита при длительном действии нагрузок использовались экспресс-методы: метод температурно-временной аналогии при исследовании деформационных свойств и метод прогнозирования длительной прочности по результатам ее определения при разных скоростях нагружения. По результатам испытаний определялись температурно-временные коэффициенты прочности (k_{it}) и деформативности (n_{it}) фаолита:

$$n_{it} = E(t, \tau) / E(20), \quad k_{it} = \sigma(t, \tau) / \sigma(20), \quad (1)$$

где $E(t, \tau)$, $\sigma(t, \tau)$ – соответственно модуль деформаций и предел прочности фаолита при температуре t на момент времени τ ,
 $E(20)$, $\sigma(20)$ – то же, в нормальных условиях.

Статистическая обработка результатов испытаний выполнялась методами корреляционно-регрессионного анализа.

Исследование структурной усадки фаолита в процессе его термического отверждения выполнялось на установке, предложенной Д.А. Маликовым (рис. 1). В этом случае определение усадки ε_x возможно непосредственно во время тепловой обработки фаолита по известной жесткости металлической консоли и перемещению ее свободного конца, пренебрегая, в силу малых усилий l в образце, пластическими деформациями материала.

$\varepsilon_x = \varepsilon_{\text{поли}} - \varepsilon_{\text{упр}} - \varepsilon_{\text{тепл}} = 6a(f - \Delta_T) / (l_0(3l - a)) - 6E_{\text{мж}}(f - \Delta_T) / (E_{\text{обр}} F_{\text{обр}} a^2 (3l - a)) - \alpha T, \quad (2)$

где $E_{\text{мж}}$ – изгибная жесткость металлической консоли;

l – длина металлической консоли; f – перемещение конца консоли;

l_0 – исходная длина фаолитового образца; α – КЛТР образца;

a – плечо закрепления образца; $F_{\text{обр}}$ – площадь сечения образца;

$E_{\text{обр}}(T)$ – модуль деформаций фаолитового образца;

$\Delta_T(T)$ – температурная тарировочная поправка установки.

Расчетная оценка остаточных технологических напряжений в фаолитовых оболочках выполнялась на основе предпосылок механики неоднородных наращиваемых тел с использованием многоэлементных механических моделей полимерных материалов.

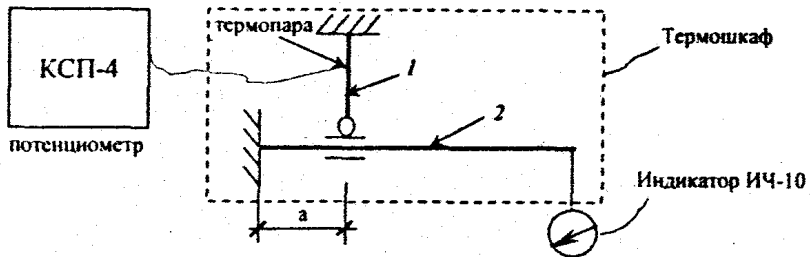


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по определению усадки:
1 - образец фаолита; 2 - металлическая консоль

Экспериментальное определение остаточных технологических напряжений проводилось методом разрезки колец, выпиленных из средней зоны опытных фаолитовых оболочек, предполагая линейное изменение модуля упругости фаолита и остаточных напряжений по толщине стенки.

$$\sigma_{\text{внутр}} = \Delta E_{\text{внутр}} \cdot h \cdot (1+2k) / (6\pi R^2 (1+k)), \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{наруж}} = \Delta E_{\text{внутр}} \cdot h \cdot (2+k) / (6\pi R^2 (1+k)), \quad (4)$$

где Δl - перемещение концов распила кольца после его разрезки;

R - радиус серединной окружности кольца до разрезки;

$E_{\text{внутр}}$ - модуль упругости фаолита внутреннего слоя кольца;

$E_{\text{наруж}}$ - то же, наружного слоя кольца; h - высота сечения кольца;

$k = E_{\text{нар}} / E_{\text{внутр}}$ - коэффициент приведения сечения.

Для оценки влияния способа термообработки на физические характеристики фаолита выполнено определение его коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР по ГОСТ 15173-70) и кислотостойкости (ГОСТ 12020-66). Всего испытано по 10 образцов на каждый вид испытаний.

Третья глава. Исследование режимов термообработки фаолита и оценка их влияния на физико-механические свойства материала

Дифференциальный термический анализ сырого фаолита показал, что при его тепловой обработке продукты реакции поликонденсации выделяются при температурах вплоть до 200 °С, с экстремумом при 120...130 °С. При этом 40 % летучих выделяется в интервале температур 140...200 °С, когда до 95% олигомера конвертировалось в жесткий резит. Поэтому увеличение температуры отверждения с принятой скоростью ее подъема приводит к образованию макропор и резкому росту технологической дефектности.

Экспериментально установлено, что для обеспечения высокой теплоустойчивости фаолита (по Мартенсу - не ниже 200 °С) без увеличения его дефектности необходимо после отверждения оболочек существующими способами выполнять их дополнительную тепловую обработку подъемом температуры со 130 до 180 °С в течении 100 часов.

Учитывая, что фаолитовая оболочка газоотводящего ствола (газохода) контактирует с дымовыми газами только с внутренней стороны, нами предложен способ отверждения фаолитовых оболочек при температурном градиенте по толщине стенки (с максимальной температурой на внутренней

поверхности), полагая, что движение фронта полимеризации изнутри наружу оболочки создаст благоприятные условия для удаления летучих, снизит дефектность и придаст внутренним слоям высокую теплостойкость.

Для построения математической модели процесса отверждения применен дробный факторный эксперимент 2^{4-1} , где в качестве факторов выбраны технологические параметры: X_1 - максимальная температура термообработки; X_2 - величина температурного градиента; X_3 - скорость подъема температуры; X_4 - толщина стенки конструкции.

Условия проведения эксперимента (табл. 1) назначены исходя из механизма отверждения фаолита и охватывали всю область возможностей существующего технологического оборудования.

Таблица 1

Условия проведения эксперимента

	$X_1, ^\circ\text{C}$	$X_2, ^\circ\text{C}/\text{см}$	$X_3, ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$X_4, \text{см}$
Основной уровень	150	15	10	1,5
Шаг варьирования	20	15	5	0,5

В качестве функций – откликов выбраны: Y_1 – дефектность образцов фаолита (%), Y_2 – общая теплостойкость образцов фаолита по Мартенсу ($^\circ\text{C}$); Y_3 – удельная ударная вязкость образцов фаолита ($\text{кДж}/\text{м}^2$).

Матрица планирования полуреплики полного факторного эксперимента составлена при генерирующем соотношении $x_4 = x_1 * x_2 * x_3$ и реализовывалась 3 раза при своей рандомизации. После статистической обработки результатов испытаний, определения значимых коэффициентов уравнений регрессии и проверки на адекватность модели установлено:

– функция дефектности в натуральных переменных имеет вид:

$$Y_1 = -22,27 + 0,153X_1 + 0,97X_2 + 0,148X_3 + 0,0064X_1X_2 + 0,0028X_1X_3 - 0,02X_2X_3;$$

– функция теплостойкости в натуральных переменных имеет вид:

$$Y_2 = 135,03 + 0,09X_1 - 13,83X_2 + 5,60X_3 - 6,6X_4 + 0,09X_1X_2 - 0,032X_1X_3 - 0,078X_2X_3;$$

– функция ударной вязкости в натуральных переменных имеет вид:

$$Y_3 = 13,13 - 0,051X_1 - 0,363X_2 - 0,331X_3 - 1,086X_4 + 0,002X_1X_2 + 0,001X_1X_3.$$

Из анализа графических срезов функций – откликов (см. рис. 2, 3) определены режимы отверждения (см табл. 2) которые не увеличивают технологическую дефектность оболочек (рис. 4), повышают теплостойкость стенки конструкции до 150...165 $^\circ\text{C}$ и сокращают продолжительность термообработки в 2...3 раза.

Таблица 2

Наилучшие режимы термообработки при температурном градиенте

Параметры режима термообработки	Режим "Гр-1" ($\delta_{\text{стенки}} = 10 \text{ мм}$)	Режим "Гр-2" ($\delta_{\text{стенки}} = 20 \text{ мм}$)
Максимальная температура, $^\circ\text{C}$	170	170
Величина градиента, $^\circ\text{C}/\text{см}$	25...30	25...30
Скорость подъема температуры, $^\circ\text{C}/\text{ч}$	15...10	10...5
Длительность термообработки, ч	10...15	30...15

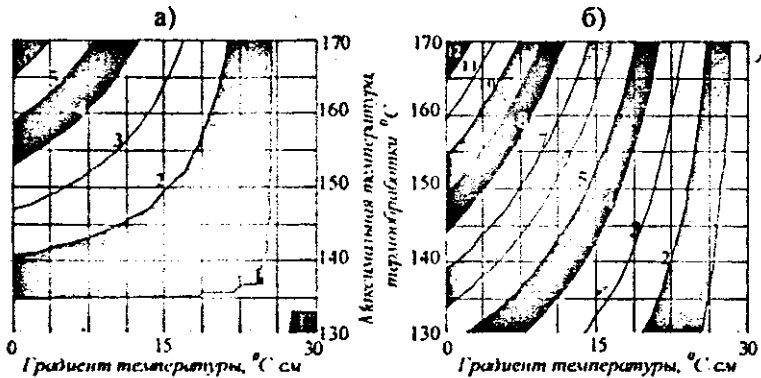


Рис. 2. Изолинии дефектности фаолита (%) при скорости нагрева $5\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ (а) и $15\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ (б)

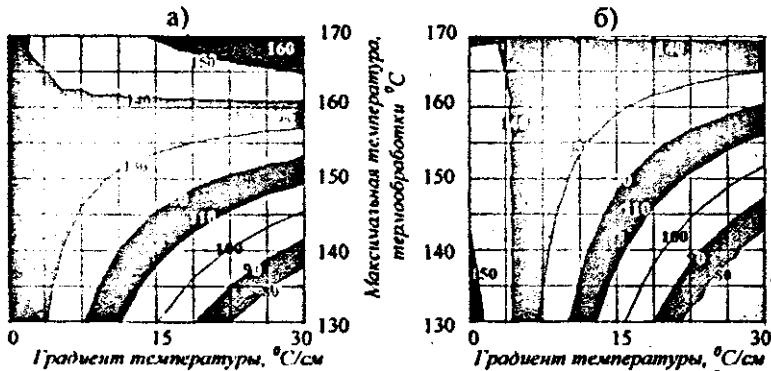


Рис. 3. Изолинии теплостойкости фаолита по Мартенсу ($^{\circ}\text{C}$) толщиной 2 см при скорости нагрева $5\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ (а) и $15\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ (б)

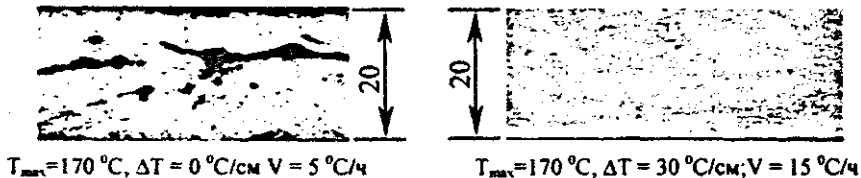


Рис. 4. Влияние градиента температуры и скорости ее подъема на технологическую дефектность отвержденного фаолита

Результаты экспериментального исследования механических свойств фаолита обычной теплостойкости (по Мартенсу – не ниже $130\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высокой теплостойкости (по Мартенсу – не ниже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) при кратковременном и длительном действии нагрузки даны в табл. 3, 4. Всего испытано 110 образцов фаолита для определения температурных зависимостей механических свойств и 30 образцов при оценке температурно–временных зависимостей. Коэффициенты вариации составляли от 5 до 14%.

Установлено, что фаолит высокой теплостойкости имеет слабо выраженную температурную зависимость механических свойств, а при температуре 170...180 °С средние показатели его механических свойств соответствуют показателям фаолита обычной теплостойкости при 20 °С.

Таблица 3

Температурная зависимость механических свойств фаолита
обычной и высокой теплостойкости

Температура, °С	Модуль деформаций фаолита				Прочность при изгибе фаолита			
	обычной теплостойк.		высокой теплостойк.		обычной теплостойк.		высокой теплостойк.	
	МПа	n_t	МПа	n_t	МПа	k_t	МПа	k_t
20	7285	1,00	10620	1,00	36,51	1,00	53,85	1,00
80	5785	0,79	9704	0,91	—	—	—	—
100	4724	0,65	—	—	23,86	0,65	44,93	0,83
130	3805	0,52	9295	0,88	16,24	0,44	38,32	0,71
150	3036	0,42	7940	0,75	12,52	0,34	37,47	0,70
180	1572	0,22	7412	0,71	9,53	0,26	30,14	0,56

Таблица 4

Результаты прогнозирования температурно-временной зависимости
механических свойств фаолита высокой теплостойкости

Темп, °С	130 °С		150 °С		175 °С	
	k_{tr}	n_{tr}	k_{tr}	n_{tr}	k_{tr}	n_{tr}
1 месяц	0,35	0,40	0,23	0,19	0,17	0,11
1 год	0,26	0,30	0,13	0,14	0,09	0,08
10 лет	0,18	0,22	0,04	0,13	0,02	0,05

Примечание Из исследований С.Г. Иванова и Б.М. Маслова следует, что для фаолита обычной теплостойкости температурно-временные коэффициенты уже при температуре 100 °С близки к нулю.

Количественная оценка закономерности распределения термоупругих свойств по толщине фаолита, отвержденного при температурном градиенте, показала, что механические свойства его наиболее отвержденных слоев соответствуют свойствам фаолита высокой теплостойкости, а наружных слоев – свойствам фаолита обычной теплостойкости. Это удовлетворяет условиям эксплуатации стенки фаолитовой оболочки, где температура наружных слоев существенно ниже, чем внутренних.

Экспериментально установлено, что термообработка фаолита при температурном градиенте незначительно влияет на КЛТР материала ($1,33 \cdot 10^{-5}$) и на 35 % увеличивает химическую стойкость внутренних слоев. При этом КЛТР слабо зависит от температуры в диапазоне 20...200 °С.

Четвертая глава. Экспериментально-аналитические исследования напряженного состояния фаолитовых конструкций газоотводящих стволов дымовых труб и газоходов

В главе последовательно рассматриваются процессы формирования в крупногабаритных фаолитовых оболочках остаточных технологических напряжений, их релаксация при доэксплуатационном хранении конструкций и влияние технологической предыстории на термонапряженное состояние конструкций при пуске их в эксплуатацию.

В основу расчетного способа определения остаточных технологических напряжений заложены подходы, разработанные В.Т. Томашевским, Ю.А. Афанасьевым, В.С. Яковлевым. Рассматривается тонкая длинная фаолитовая цилиндрическая оболочка в осесимметричном температурном поле. Стенка оболочки представлена набором изотропных слоев с различными термоупругими характеристиками, но с постоянными КЛТР $\alpha = 1,33 \cdot 10^{-5}$ и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$. Распределение тепловых полей по толщине стенки определяется из решения задач нестационарной теплопередачи.

При действии постоянного по длине оболочки температурного поля в слоях стенки оболочки на удалении от ее торцов возникают одинаковые в кольцевом и в осевом направлениях нормальные усилия растяжения-сжатия и изгибающие моменты. В краевых зонах оболочки из-за касательных усилий осевые нормальные усилия меньше, чем в средней части оболочки. Поэтому решение задачи термоупругости многослойной оболочки находится из рассмотрения напряженно-деформированного состояния полоски единичной ширины, вырезанной из средней по длине части оболочки, с неизменяющимся (вследствие замкнутости оболочки) контуром. Переход от линейного напряженного состояния расчетного элемента к плоскому напряженному состоянию оболочки выполняется по (5).

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_x = \sigma_{\text{лин}} / (1 - \mu), \quad (5)$$

где σ_{φ} , σ_x , $\sigma_{\text{лин}}$ – нормальные напряжения соответственно в кольцевом и осевом направлении оболочки и в расчетном элементе (слоистой полоске).

Расчет термонапряженного состояния слоистой полоски выполняется шаговым методом, для чего весь цикл изготовления фаолитовой конструкции разбивается на конечное число малых по температуре шагов. Температура слоя на каждом шаге постоянна и на следующем шаге меняется на малую величину dt . Из решения системы уравнений (равновесие вырезанной части, условия совместности деформаций слоев, условия закрепления – сплошности сечения, связь внутренних усилий и напряжений) определяются элементарные напряжения $d\sigma^j$ ($j=1, n$), возникающие в слоях от теплового воздействия, усадки, взаимодействия слоев друг с другом.

Изменение модуля деформаций и структурной усадки фаолита, происходящие в процессе тепловой обработки установлены экспериментально и даны на рис. 5.

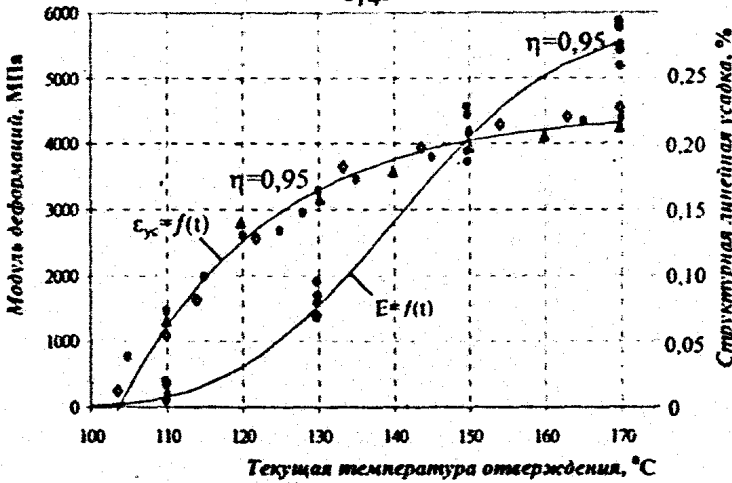


Рис. 5. Изменение модуля деформаций $E=f(t)$ и структурной усадки $\epsilon_{yc}=f(t)$ в процессе термического отверждения фенолита

Особенностями этапа охлаждения отвержденной фенолитовой оболочки, кроме изменения термоупругих характеристик слоев (по зависимостям, определенным в гл. 3) и отсутствия усадки, является формирование памяти на технологическое термомеханическое воздействие. Для учета памяти предлагается использовать вариант механической модели ПКМ, состоящей из набора параллельно соединенных упругих элементов с «температурными тормозами», подключающих или отключающих отдельные элементы таким образом, что совокупность подключенных элементов определяют упругие свойства фенолита при текущей температуре.

Анализ физической картины работы механической модели при теплообменах на примере защемленного фенолитового стержня, находящегося, как и отдельные слои расчетного элемента оболочки, в линейном напряженном состоянии, показал, что в этом случае температурные напряжения в слоях:

при нагреве от температуры T_0 до $t \leq T_x$ $\sigma(t) = \epsilon_{упр}(t) \cdot E(t)$; (6)

при охлаждении от T_x до $t \geq T_0$ $\sigma(t) = \int_{T_x}^t d\sigma(t) = \int_{T_x}^t d(\epsilon_{упр}(t) \cdot E(t))$, (7)

где t , T_0 , T_x — текущая, начальная и конечная температуры слоев полоски.

$\epsilon_{упр}$ находится из выражения $\epsilon_{полн} = \epsilon_{упр} + \epsilon_{темпл} + \epsilon_{х} + \delta \cdot \epsilon_{зд}$ (8)

где $\epsilon_{упр}$, $\epsilon_{темпл}$, $\epsilon_{х}$, $\epsilon_{зд}$ — соответственно упругая, температурная, усадочная и вынужденно-эластическая ("замороженная") составляющие полной $\epsilon_{полн}$ относительной деформации слоев расчетного элемента оболочки;

δ — символ-функция = $\begin{cases} 1 - \text{при нагреве} \\ 0 - \text{при охлаждении} \end{cases}$.

Величина вынужденно-эластической деформации ϵ_{σ} , образовавшейся при охлаждении слоев расчетного элемента от конечной температуры T_k до температуры $t \geq T_0$ может быть записана в виде:

$$\epsilon_{\sigma}(t) = \frac{\sigma(T_k)}{E(T_k)} - \frac{\sigma(t)}{E(t)} + \int_{T_k}^t d\epsilon_{упр}(t), \quad (9)$$

где $d\epsilon_{упр}(t)$ – элементарные упругие деформации, возникающие в слое при его охлаждении на dt ;

Определение на экспериментальной установке (рис. 1) температурных напряжений в фаолитовом стержне при теплосменах (20→170→20→170 °C) показало хорошую сходимость с расчетом по вышеизложенной методике для данной модели материала (погрешность не превышает 6%).

Решая несвязанную задачу термоупругости, применяя на этапе нагрева подходы механики неоднородных наращиваемых тел, и используя на этапе охлаждения экспериментально проверенную модель материала, получим, что технологические напряжения в произвольном j -ом слое стенки конструкции на текущем шаге расчета с температурой t определяются как:

$$\sigma^j(t) = \int_{T_0}^t d\sigma^j(t). \quad (10)$$

Для исследования релаксации остаточных технологических напряжений при домонтажном хранении фаолитовых оболочек также использован шаговый метод расчета (малых по времени шагов). Отдельные слои расчетного элемента оболочки представлены моделями типа Кельвина-Фойгта с известными законами деформирования. Определение напряжений в конструкции к произвольному моменту времени t ; сводится к последовательному решению задач теории упругости с дополнительными деформациями ползучести и «фиктивными» усилиями, возникающими вследствие перераспределения внутренних напряжений, а значения напряжений и деформаций к окончанию текущего шага расчета являются начальным состоянием модели слоя для последующего шага расчета. Параметры трехэлементных моделей отдельных слоев фаолитовых оболочек определены из аппроксимации результатов прямых испытаний образцов на ползучесть при чистом изгибе.

Расчетная оценка остаточных технологических напряжений в фаолитовых оболочках показывает следующее.

Распределение остаточных технологических напряжений по толщине стенки фаолитовой оболочки, отвержденной при температурном градиенте, близко к линейному (с наибольшими растягивающими и сжимающими нормальными напряжениями соответственно на внутренней и наружной поверхностях оболочки) и существенно отличается от распределения остаточных напряжений в фаолитовых оболочках, отвержденных без градиента температуры (см. рис 6). При этом независимо от способа высокотемпера-

турного отверждения наибольшая величина остаточных напряжений в процессе охлаждения оболочек достигает 20% кратковременной прочности фаолита с учетом её температурной зависимости.

В случае отверждения с градиентом температуры структурная усадка позитивно влияет на остаточные напряжения, обеспечивая их снижение в 1,2...2,4 раза, а доэксплуатационное хранение отвержденных оболочек может дополнительно снизить остаточные напряжения на 15% (см. рис. 7).

Результаты расчета экспериментально проверены на 5 опытных фаолитовых оболочках ($D=200$ мм, $h=10$ мм). Установлено, что погрешность расчетов не превышает 6%.

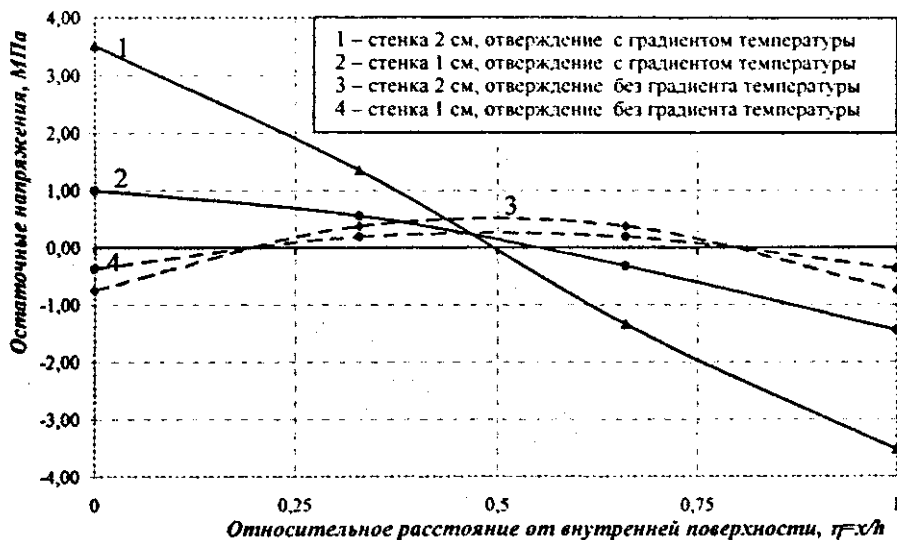


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по толщине стенки фаолитовой оболочки

Оценка термонапряженного состояния фаолитовых оболочек дымовых труб и газоходов при пуске их в эксплуатацию, выполненная с использованием многоэлементной механической модели фаолита и экспериментально проверенной методики расчета температурных напряжений показала:

- при пуске конструкций в эксплуатацию в зимний период максимальные температурные напряжения от воздействия дымовых газов с температурой 200°C могут достигать 50% кратковременной прочности материала.

- отверждение при температурном градиенте создает предварительное напряжение и существенно снижает фактические температурные напряжения в конструкциях (см. рис. 8).

- восстановление "замороженных" деформаций при пуске конструкций в эксплуатацию приводит к снижению температурных напряжений на 15%.

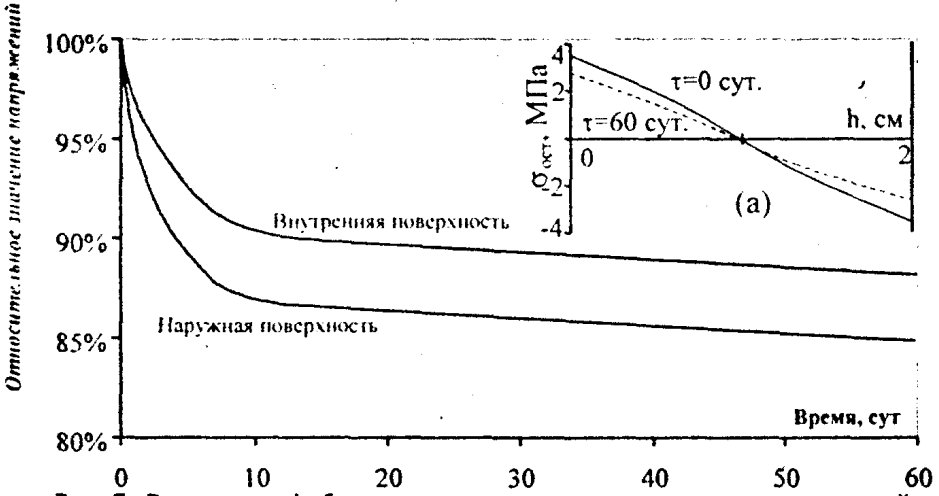


Рис. 7. Релаксация фибровых остаточных технологических напряжений в фаолитовой оболочке ($h=20$ мм), отвержденной с градиентом температуры, при демонтажном хранении в течении 60 суток
 а) распределение напряжений по сечению стенки оболочки

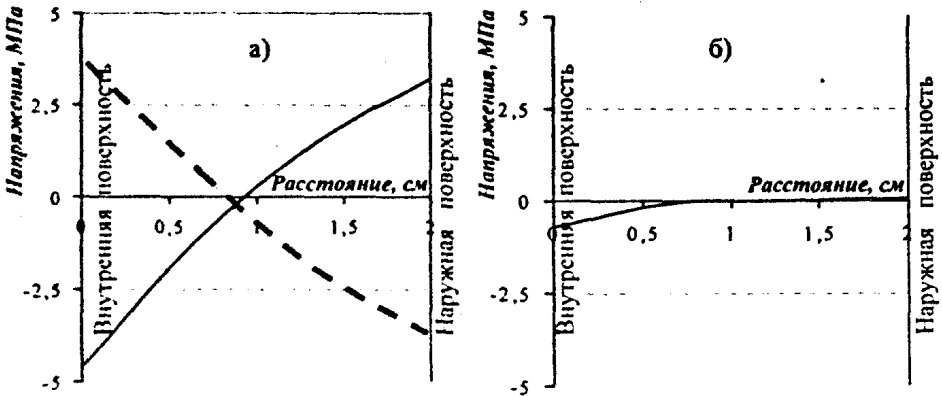


Рис. 8. Влияние остаточных напряжений на термонапряженное состояние стенки фаолитовой оболочки газоотводящего ствола, отвержденной при температурном градиенте, после разогрева газоотводящего тракта с 20 до 175 °С:

- а) напряжения от теплового воздействия газов (сплошная линия), остаточные технологические напряжения (штриховая линия);
- б) общие напряжения в стенке оболочки.

Пятая глава. Технические предложения по реализации способов тепловой обработки, обеспечивающих повышение теплостойкости фаолитовых конструкций

Предложен ряд технических решений по тепловой обработке крупногабаритных фаолитовых оболочек при температурном градиенте по толщине стенки в условиях существующих производств.

Одним из таких решений является проведение тепловой обработки в полимеризационной камере, разделенной теплоизолированной перегородкой с проемами на два отсека (нижний и верхний). Фаолитовые изделия в формах устанавливаются над проемами перегородки, после чего в нижнем отсеке производится нагрев воздуха до 170 °С с заданной скоростью. Температура в верхнем отсеке автоматически регулируется посредством открывающихся окон в теплоизолированной перегородке. На такую полимеризационную камеру получено свидетельство на полезную модель РФ.

Для фаолитовых оболочек диаметром до 3 м предпочтительнее проведение тепловой обработки на разборных цилиндрических металлических формах, обогреваемых изнутри при помощи тепловых вентиляторов. При этом вентиляторы установлены в торцевых крышках форм так, что обеспечивают винтообразное движение воздуха и равномерный прогрев форм.

Для элементов сборных фаолитовых оболочек наиболее эффективным является проведение тепловой обработки в обогреваемых формах, размещаемых внутри существующих полимеризационных камер на теплоизолированных стеллажах. Такой способ позволяет максимально использовать внутренний объем камер и минимизировать потери тепла.

Технико-экономическая оценка экономической эффективности применения фаолита для реконструкции железобетонного ствола дымовой трубы №1 Первоуральской ТЭЦ показывает, что вариант исполнения газоотводящего ствола из фаолита высокой теплостойкости в 1,3..2,5 дешевле, чем из других коррозионностойких материалов.

Практическая реализация результатов настоящей работы в части способов изготовления конструкций из фаолита высокой теплостойкости осуществлена на Асбестовском заводе металлоконструкций и отражена в технических условиях ТУ 2257-001-01394834-01, ТУ 2292-004-01394834-00. Качество строительных конструкций из фаолита высокой теплостойкости подтверждено сертификатом соответствия ТУ. На способ отверждения фаолитовых оболочек при температурном градиенте получено решение о выдаче патента РФ.

Результаты исследований переданы отделу комплексного проектирования специальных высотных сооружений ОАО УРАЛВНИПИЭНЕРГОПРОМ (г. Екатеринбург) и приняты к использованию при разработке проектов газоотводящих стволов дымовых труб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В настоящее время происходит ускоренный износ газоотводящих трактов дымовых труб традиционных конструкций из-за усиления коррозионного воздействия дымовых газов. Признанным способом восстановления эксплуатационной надежности этих сооружений является установка внутреннего подвесного газоотводящего ствола и газоходов из коррозионно-стойких полимерных композиционных материалов, среди которых наиболее освоенным является фаолит обычной теплостойкости (теплостойкость по Мартенсу не ниже 130°C). Для использования фаолитовых конструкций в газоотводящих трактах промышленных печей и котлоагрегатов ТЭС необходимо повышение теплостойкости фаолита.

2. Установлено, что повышение теплостойкости фаолита до 200°C в рамках существующей технологии изготовления конструкций возможно путем увеличения максимальной температуры до 180°C и длительности тепловой обработки до $130...150$ часов. Экспериментально определены основные физико-механические свойства фаолита высокой (200°C) теплостойкости и выявлены зависимости их изменения в интервале температур $20...180^{\circ}\text{C}$ при кратковременном и длительном действии нагрузок.

3. Для конструкций фаолитовых оболочек подвесных стволов и газоходов дымовых труб предложен способ отверждения конструкций при температурном градиенте по толщине стенки, обеспечивающий высокую теплостойкость только внутренних слоев оболочки, непосредственно контактирующих с дымовыми газами. Определены наилучшие технологические параметры этого способа, обеспечивающие минимальную дефектность материала и сокращение продолжительности термообработки до $15...30$ часов:

- максимальная температура отверждения – 170°C ;
- величина градиента температуры – $25...30^{\circ}\text{C}$ на 1 см толщины стенки;
- скорость подъема температуры отверждения – $10...15^{\circ}\text{C}/\text{час}$.

В этом случае внутренние слои стенки фаолитовой оболочки имеют физико-механические свойства фаолита высокой (200°C) теплостойкости, а наружные слои стенки – фаолита обычной (130°C) теплостойкости.

4. Предложен и экспериментально проверен метод расчета внутренних напряжений в фаолитовых оболочках газоотводящих стволов и газоходов дымовых труб при их изготовлении, хранении и пуске в эксплуатацию. Показано, что этот метод с погрешностью не более 6% позволяет оценить остаточные технологические напряжения и проследить проявление эффекта памяти материала о технологическом термомеханическом воздействии.

5. Установлено, что при охлаждении конструкции после высокотемпературной термообработки, независимо от способа ее проведения, наибольшая величина остаточных напряжений не превышает 20% кратковременной прочности фаолита с учетом ее температурной зависимости. При этом в случае отверждения фаолитовых оболочек при температурном градиенте

структурная усадка связующего позитивно влияет на напряженное состояние конструкций, снижая остаточные напряжения в 1,5..2 раза.

6. Расчетным путем и экспериментально (на фаолитовых оболочках малого размера) установлено, что при доэксплуатационном хранении конструкций проявление реологических свойств материала приводит к снижению остаточных технологических напряжений на 15%.

7. Исследована кинетика формирования температурных напряжений по сечению стенки крупногабаритных фаолитовых оболочек подвесных стволов и газоходов при пуске дымовых труб в эксплуатацию. Установлено, что при этом температурные напряжения могут достигать 50% кратковременной прочности фаолита.

8. Отверждение конструкций при температурном градиенте создает эффект предварительного напряжения стенки фаолитовой оболочки остаточными технологическими напряжениями и существенно снижает температурные напряжения при пуске и эксплуатации конструкций, обеспечивая запас прочности.

9. Проявление памяти о технологическом термомеханическом воздействии снижает эксплуатационные температурные напряжения незначительно (до 15%) и, в запас прочности, ~~может~~ не учитываться.

10. Разработаны технические предложения по реализации способа отверждения конструкций при температурном градиенте по толщине стенки. Способ отверждения при температурном градиенте и технические решения по его реализации защищены двумя патентами РФ.

11. Результаты работы отражены в технических условиях ТУ 2257-001-01394834-01, ТУ 2292-004-01394834-00, по которым сертифицированы строительные конструкции из фаолита высокой теплостойкости, изготавливаемые на Асбестовском заводе металлоконструкций. Результаты исследований физико-механических свойств фаолита высокой теплостойкости переданы ОАО «УРАЛВНИПИЭНЕРГОПРОМ» для проектирования газоотводящих стволов и газоходов дымовых труб с температурой дымовых газов до 200 °С.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Применение стеклопластика при реконструкции и новом строительстве газоотводящих труб / В.М. Асташкин, В.А. Пазушан, В.А. Лужков и др. // XVIII Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций, посвященная 75-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Тезисы докладов. – Миасс: МНУЦ, 1999. – С. 38.

2. Эффективность применения стеклопластика в стволах газоотводящих труб / В.М. Асташкин, В.А. Пазушан, В.А. Лужков и др. // Проблемы проектирования неоднородных конструкций. Труды XVIII Российской школы. – Миасс: МНУЦ, 1999. – С. 87–91.

3. Перспективы применения фаолита при новом строительстве и реконструкции дымовых труб / В.М. Асташкин, В.А. Лужков, В.А. Пазушан и др. // Энергетика региона.– №7–8, 2000.– С. 14–16.
4. Субботин Е.В., Лужков В.А. Развитие новых методов обследования и реконструкции дымовых труб ТЭС// Конференция молодых специалистов электроэнергетики–2000. – М.: НЦ ЭНАС, 2000.–С. 75–77.
5. ПМ РФ №16840. Полимеризационная камера / В.А. Лужков, В.М. Асташкин, В.А. Пазушан и др. // Б.И.–2001.– № 5.
6. Лужков В.А. Полимерный конструкционный материал высокой теплостойкости. Физико-механические и реологические характеристики фаолита марки "В" / Инф. лист. № 83-063-01.– Челябинск: ЦНТИ, 2001. – 5 с.
7. Способ изготовления оболочек из армированных полимерных материалов. Патент РФ №2181666 / В.А. Лужков, В.М. Асташкин, В.А. Пазушан и др. // Б.И.– 2002.– №12.
8. Лужков В.А. Тепловая обработка фаолитовых газоотводящих стволов дымовых труб при температурном градиенте // Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2001. – Т.1.– С. 89–91.
9. Лужков В.А. Обзор зарубежного опыта: развитие и перспективные конструктивные решения футеровок бетонных дымовых труб // Электрические станции.– №2, 2002.– С. 68–69.
10. Лужков В.А. Остаточные технологические напряжения в конструкциях фаолитовых газоотводящих стволов дымовых труб// Вестник Южно-Уральского университета.– №5, 2001, Серия "Строительство и архитектура".– Вып. 1.– С. 50–54.

ЛУЖКОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ ФАОЛИТА В КОНСТРУКЦИЯХ
ГАЗООТВОДЯЩИХ СТВОЛОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ
И ГАЗОХОДОВ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ДЫМОВЫХ
ГАЗОВ ДО 200 °С**

**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 21.05.2002. Формат
60*84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,06.
Тираж 100 экз. Заказ 119/212.

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