

МД7716

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
Государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи
УДК 532.24

Червяков Валентин Витальевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
Государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук
профессор Л.В. Шишов

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор В.Н. Елисеев

кандидат технических наук
доцент С.А. Данилов

Ведущая организация: ЦНИИСМ (Хотьково Моск. обл.)

Защита диссертации состоится 18 X 1993 г. в 14 час.
на заседании специализированного У 053.15.08 в Московском
Государственном техническом
адресу: 107005, г. Москва,

Ф-т

С диссертацией можно с

Ваш отзыв на автореферат
просим выслать по адресу:
МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученс
К.053.15.08

Автореферат разослан

Ученый секретарь
специализированного
к.т.н., доцент

М 87716

Подп. к печ 10.02.93 Зака

Типография

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современные композиционные материалы (КМ) успешно заменяют традиционные конструкционные материалы во многих изделиях современной техники, подвергавшихся экстремальным воздействиям в процессе эксплуатации. Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) могут применяться в условиях температур, близких к предельно допустимым для существования твердой фазы обычных конструкционных материалов. Развитие ряда новых перспективных технологий во многом обусловлено возможностью создания материалов, работоспособных при температурах до 2500...3000 К.

В процессе разработки многих изделий для расчета теплового состояния требуется оперативная и достоверная информация о теплофизических свойствах (ТФС) конструкционных материалов. Для УУКМ этот вопрос приобретает особую значимость, так как они являются материалами с регулируемыми, задаваемыми свойствами - путем применения различных схем армирования и локальных усилений. Армирование возможна оптимизация конструкции для работы при заданном распределении тепловых и механических нагрузок.

Таким образом, задача получения информации о ТФС УУКМ в области высоких температур является важной и актуальной задачей для современного уровня развития техники. Разработка методик исследования свойств КМ имеет большое значение и в долгосрочном плане, так как существует устойчивая тенденция увеличения объема применения КМ в изделиях современной техники и непрерывного увеличения количества вновь создаваемых КМ.

Цель работы. Целью настоящей работы является разработка методики определения ТФС углеграфитовых материалов и УУКМ в области высоких температур методом вспышки.

Научная новизна. Разработана математическая модель импульсного теплового нагружения образца со сложной внутренней структурой и впервые проведено численное исследование теплового состояния образца в процессе проведения эксперимента с детальным учетом пространственно-временного распределения энергии импульса лазерного излучения, неоднородности материала, нелинейности ТФС и

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1087716

Червяков В. В. Исследования

граничных условий и учетом контактного термического сопротивления на границе раздела фаз. Модель входит во впервые разработанную экспериментально апробированную методику комплексного определения пары ТФС по данным одного эксперимента с использованием одного пирометра.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные методика и математическая модель могут применяться для определения ТФС как вновь создаваемых, так и существующих пространственно армированных композиционных материалов (ПА КМ), в том числе УУКМ. Численное моделирование теплового состояния позволяет оптимизировать структуру армирования для данных условий нагружения. В отличие от ранее описанных методик и моделей достигается более высокая точность определения ТФС ПА КМ и большая информативность математической модели. Возможно детальное изучение особенностей теплового состояния ПА КМ.

Апробация работы. Основные результаты и положения работы докладывались на III Межотраслевом семинаре по эрозионностойким и жаростойким композиционным материалам (г. Калининград Моск. обл., 1990); VIII Всесоюзной школе - семинаре "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Москва, 1991); Европейской научной метрологической конференции "150 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" (Санкт-Петербург, 1992); Конференции "Теория приближений и задачи вычислительной математики" (Днепропетровск, 1993).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ, они использовались в 4 научных отчетах по госбюджетным темам.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, изложения основных результатов и описки литературы. По объему работа состоит из 102 страниц машинописного текста, 46 рисунков, 9 таблиц, библиография насчитывает 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемого вопроса,

сформулированы задачи исследования и перечислены основные положения работы, выносимые автором на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния методического и экспериментального обеспечения исследований ТФС материалов в условиях высоких температур. Заканчивает главу постановка задачи исследования.

Среди методов исследования ТФС материалов в условиях высоких температур выделяется рядом преимуществ метод вспышки, который в настоящее время наиболее часто по сравнению с другими методами применяется для исследования ТФС различных материалов, в том числе УУКМ, в условиях высоких температур.

В методе вспышки лицевая торцевая поверхность образца, выполненный в виде небольшого диска, подвергается воздействию кратковременного импульса лучистой энергии (рис.1). В процессе эксперимента измеряется и записывается температура перегрева в одной или нескольких точках обратной поверхности образца $\Delta T^*(t, L)$, что служит исходными данными для определения искомых ТФС.

Для обработки результатов эксперимента необходимо разработать математическую модель импульсного теплового нагружения образца. Для моделирования теплового состояния ПА КМ могут применяться следующие варианты математических моделей:

1. Модель эквивалентной гомогенизированной среды, эффективные свойства которой определяются при стационарных условиях нагружения;

2. Модель, в которой каждая фаза гомогенизируется отдельно с учетом взаимодействия на границе раздела фаз через члены, входящие в уравнения для каждой фазы;

3. Модель частичной гомогенизации с заменой реальной структуры на одноосно армированную. Направление эквивалентной армировки совпадает с направлением главного теплового потока, а эквивалентная матрица получается гомогенизацией матрицы и волокон армирования остальных направлений;

4. Модель, детально учитывающая внутреннюю структуру материала образца.

Как показали Ляк, Балажеас, модель вида 1 - 3 может

удовлетворительно описывать тепловое состояние образца из ПА КМ, только если образец "толстый" (то есть в толщину образца укладывается 4 - 5 периодов структуры армирования), что часто недостижимо по технологическим причинам.

В работах группы отечественных исследователей Микова, Гончарова и др. развивается подход к исследованию теплового состояния ПА КМ на основе двухтемпературной теории теплопроводности (модели вида 2 и 3). В рамках этого подхода в материале выделяется представительный элементарный объем, содержащий один армирующий стержень и матрицу. Записываются осредненные уравнения теплопроводности для каждого из компонентов и уравнение Генри, связывающее осредненный тепловой поток между компонентами в их средних температурах. Экспериментальная апробация этой модели показала, что погрешность определения температуры составляет $\pm 12\%$.

Численные методы решения в принципе позволяют подробно описать расчетную область с детальным учетом неоднородностей КМ и сложными нелинейными граничными условиями для применения модели вида 4. Однако в случае использования обычных вариантов метода конечных элементов (МКЭ) или метода конечных разностей для достижения приемлемой точности решения требуется использование очень подробных сеток с огромным количеством узлов - прежде всего из-за больших градиентов температуры в процессе поглощения энергии импульса лазерного излучения. Необходимость согласования шагов пространственной и временной дискретизации ведет к большому времени расчета.

Опубликовано большое количество работ по экспериментальному исследованию ТФС ПА КМ методом вспышки. Для интерпретации полученных результатов использовались модели вида 1 - 3. Помимо определения эффективных ТФС гомогенизированного эквивалентного материала были выполнены и работы по определению эффективных ТФС волокон армирования в условиях включения в КМ.

Экспериментально апробированные методики предполагают необходимость работы с серией образцов различной толщины, а в случае исследования эффективных ТФС волокон армирования в

условиях включения в КМ требуется серия образцов с различным объемным содержанием волокон армировки. Упрощенный учет граничных условий ведет к невысокой точности определения ТФС - порядка 7...12 % и невозможности детального исследования теплового состояния ПА КМ в условиях импульсного теплового нагружения.

На основании изучения и анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день отсутствуют математические модели, детально учитывающие как сложную внутреннюю структуру ПА КМ, так и условия его теплового нагружения.

Таким образом, задачами настоящего исследования являются:

1. Разработка математической модели импульсного теплового нагружения осесимметричного образца с учетом неоднородности материала, неравномерности пространственно-временного распределения энергии импульса, нелинейности ТФХ и нелинейных тепловых потерь на излучение с поверхности образца.

2. Разработка математической модели импульсного теплового нагружения пространственно армированного образца с учетом неоднородности материала, неравномерности пространственно - временного распределения энергии импульса, нелинейности ТФХ, нелинейных тепловых потерь на излучение с поверхности образца и термического контактного сопротивления на границе раздела фаз.

3. Разработка методики комплексного восстановления ТФС по данным одного эксперимента с использованием вышеупомянутых математических моделей.

4. Создание установки для проведения исследований. Система измерения и записи температуры поверхности образца должна обеспечивать достаточное быстродействие и малый диаметр пятна съема для возможности определения температуры на срезе волокна армировки.

Вторая глава содержит описание разработки математической модели импульсного теплового нагружения цилиндрического неоднородного образца. Модель разработана в двух вариантах - для случая осесимметричного образца и для ПА КМ. Проведено численное исследование особенностей теплового состояния осесимметричного

образца и образца ПА КМ, в том числе с учетом термического контактного сопротивления на границе раздела фаз.

Разработана следующая математическая модель:

Рассмотрим дифференциальное уравнение теплопроводности в дивергентной форме для глобальной декартовой системы координат

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} + \operatorname{div} \vec{q} = S, \quad (1)$$

где $\vec{q}$ - вектор плотности теплового потока;

$$\vec{q} = -[\lambda] \operatorname{grad} T. \quad (2)$$

Область определения для (1) является (рис. 1)

$$z \in [0, L], \quad x^2 + y^2 \leq R^2. \quad (3)$$

В общем случае плотность, теплоемкость, теплопроводность и источник являются функциями температуры и координат.

Начальные и граничные условия для (1):

$$T(0, x, y, z) = T_0,$$

$$\begin{aligned} \vec{q}, \vec{n} &= q_{\text{изл}}(T) + q_{\text{лаз}}(\tau, r), & z = 0, \quad x^2 + y^2 \leq R^2, \\ \vec{q}, \vec{n} &= q_{\text{изл}}(T), & z = L, \quad x^2 + y^2 \leq R^2, \\ \vec{q}, \vec{n} &= q_{\text{изл}}(T), & 0 \leq z \leq L, \quad x^2 + y^2 = R^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $q_{\text{изл}}(T) = \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4)$ - плотность потока излучения с поверхности образца;

$$q_{\text{лаз}}(\tau, r) = \begin{cases} q_{\text{лаз}}(\tau, r); & r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad 0 < \tau < \tau_u; \\ 0 & \tau_u < \tau; \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{плотность} \\ \text{теплового} \end{array}$$

потока, вызванного поглощением лазерного излучения, Вт/м².

Пространственно-временное распределения энергии импульса лазерного излучения $q_{\text{лаз}}(\tau, r)$ экспериментально получено Поляковым, Клыгиним (рис. 2).

Для решения задачи (1...4) применялись программные комплексы (ПК) FEM-CV_T и 3DFEM-CV_T, разработанные А.П. Скибиним и В.Л. Юговим.

ПК FEM-CV_T предназначен для для решения двумерного нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности с анизотропными коэффициентами теплопроводности и нестационарными

источниками в декартовой или цилиндрической системах координат. Для пространственной дискретизации расчетной области используются треугольные трехузловые конечные элементы. ПК является программной реализацией конечноэлементного метода контрольного объема (МКЭ-КО). Выбор для решения МКЭ-КО позволяет получить высокую точность на грубых сетках при широком диапазоне величин шагов по времени.

На рис. 3 представлены результаты сравнения расчетной зависимости $\Delta T(\tau, L)$ для центра обратной поверхности образца после воздействия на лицевую поверхность импульса лазерного излучения. Как видно из рисунка, расчет на весьма грубой сетке имеет хорошее соответствие с аналитическим решением для одномерной модели, предложенной Паркером.

ПК ZOFEM-CV_T, является реализацией гибридного метода решения: МКЭ-КО для плоскостей, параллельных x у, и конечноразностный метод контрольного объема (МКР-КО) для направления пространственной координаты z .

На рис. 4 представлены результаты сравнения расчетной зависимости $\Delta T(\tau, L)$ для центра обратной поверхности ортотропного графитового образца после воздействия на лицевую поверхность импульса лазерного излучения. Расчет имеет хорошее соответствие.

Проведено численное исследование особенностей теплового состояния ортотропного осесимметричного образца и образцов из УУКМ, структуры армирования которых представлены на рис. 5 и 6.

На рис. 7 приведено расчетное распределение температуры по обратной поверхности образца. Отчетливо заметна роль продольных волокон армирования, интенсивно перекачивающих энергию импульса по толщине образца; хорошо прослеживается сглаживание неравномерности температурного поля с течением времени.

Помимо расчета двухфазной системы, показанной на рис. 5, было проведено численное исследование влияния термического контактного сопротивления на границе раздела фаз на тепловое состояние образца со структурой армирования 3Д. Для учета термического контактного сопротивления были введены дополнительные конечные элементы из материала, отличающегося по

свойствам от свойств волокна и матрицы, между волокнами армирования и матрицей. Численный эксперимент показал относительно слабое влияние термического контактного сопротивления на тепловое состояние образца.

На рис. 8 и 9 представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных зависимостей $\Delta t(\tau, L)$ для центра обратной поверхности ортотропного графитового образца и образца из УУКМ с армированием 4Д-Л после воздействия на лицевую поверхность импульса лазерного излучения.

Третья глава посвящена разработке методики определения ТФС исследуемого материала по данным эксперимента. Сос. льной частью методики является разработанная математическая модель импульсного теплового нагружения цилиндрического неоднородного образца.

В данном случае искомыми величинами являются параметры теплопереноса материала образца. Для ортотропного образца это теплопроводность вдоль оси образца λ_z и теплопроводность в радиальном направлении λ_r . В случае двухфазной ПАС практический интерес представляет либо эффективные значения параметров теплопереноса материала $\lambda_z^{\text{эф}}$ и $\lambda_r^{\text{эф}}$, либо эффективные значения параметров теплопереноса волокон армирования, исследуемых в условиях включения в КМ, λ_z^0 и λ_r^0 .

Задачу восстановления параметров теплопереноса по доступным теплотехническим измерениям можно свести к задаче оптимизации в пространстве нескольких параметров. В диапазоне температуры перегрева можно принять искомые величины постоянными (рис. 8), и тогда задача восстановления параметров теплопереноса сводится к задаче оптимизации в пространстве двух параметров.

Определение искомого набора (λ_1, λ_2) соответствует минимизации невязки, характеризующей отклонение температуры перегрева в некоторой области обратной поверхности образца $\Delta t(\tau, L)$, рассчитанной для некоторого набора $(\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2)$, от экспериментально полученной для этой же области зависимости $\Delta t^0(\tau, L)$. В качестве точки позиционирования пятна визирования пирометра был выбран центр обратной поверхности образца; при

малых диаметрах пятна визирования пирометра за средненнтегральную температуру в пятне можно принять температуру в его центральной точке.

В качестве меры уклонения - целевой функции выбрано среднеквадратичная невязка

$$F_{\text{ск}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\Delta \tilde{T}(\tau_n, L) - \Delta T^3(\tau_n, L) \right)^2}, \quad (5)$$

где N - количество сравниваемых пар значений $\Delta \tilde{T}(\tau_n, L)$ и $\Delta T^3(\tau_n, L)$, соответствующих одним и тем же $\tau_n \in \{0, \tau_k\}$.

При этом предполагается неуправляемый характер погрешностей определения $\Delta T^3(\tau, L)$ и нестрогое подобие кривых $\Delta T^3(\tau, L)$ и $\Delta \tilde{T}(\tau, L)$.

Для выбора метода решения на сетке значений 9×9 были просчитаны величины целевой функции $F_{\text{ск}}$ (5) и построена поверхность отклика для задачи импульсного теплового нагружения ортотропного образца. При этом величины λ_z и λ_r изменялись от 0.1 до 100; в качестве $\Delta T^3(\tau, L)$ была принята расчетная кривая изменения температуры в центре обратной поверхности образца. Поверхность отклика (рис. 10) имеет ярко выраженный овражный характер с наличием локальных минимумов как на стенках оврага, так и в окрестностях глобального минимума.

Для решения поставленной задачи оптимизации был выбран модифицированный многосеточный метод подбора, программной реализацией которого является ПК ОРТ.

При решении модельной задачи, когда в качестве $\Delta T^3(\tau, L)$ была принята расчетная кривая изменения температуры в центре обратной поверхности образца, точность восстановления λ_z и λ_r для ортотропного графита составила $\pm 0.21\%$ и $\pm 1.18\%$ соответственно.

Исследована устойчивость работы алгоритма восстановления λ_z и λ_r в границах реально ожидаемых величин предельных относительных погрешностей входных данных.

Четвертая глава содержит описание экспериментальной установки, методики проведения эксперимента и обработки опытных

данных.

Общая схема установки приведена на рис. 11. Среда в камере - вакуум; рабочий диапазон температур 1500...1900 К.

Для возможности измерения температуры поверхности среза армировки ПА КМ диаметр пятна визирования пирометра допускает возможность перенастройки в диапазоне 0,3...8 мм.

В главе приводятся также анализ погрешностей измерения.

Пятая глава содержит результаты экспериментального исследования ТФС углеродистых материалов и УУКМ и их анализ.

Для отработки экспериментальной установки и методики определения ТФС углеродных материалов в качестве тестовых были использованы образцы из анизотропного графита МПГ-8. Образцы вырезались из заготовок таким образом, чтобы геометрическая ось цилиндра совпадала с направлением главной оси теплопроводности материала, а в перпендикулярной ей плоскости теплопроводность не зависит от ориентации, так как материал является ортотропным.

Эксперимент проводился в диапазоне температур $t_0 = 1500...1900$ К через каждые 50 К. Пятно визирования пирометра на поверхности образца имело диаметр 0,7 мм и позиционировалось в центре обратной поверхности образца.

Экспериментально полученные зависимости $\Delta t^3(\tau, L)$ в предположении случайного характера погрешностей определения Δt для получения рабочей кривой $\Delta t^3(\tau, L)$ обрабатывались методом наименьших квадратов.

Экспериментально определенные значения λ_x и λ_r для тестовых образцов отличаются от справочных на $\pm 3,21\%$ и $\pm 4,3\%$ соответственно.

При определении ТФС УУКМ типа УУ1 и УУ2 они принимались за однородные ортотропные материалы.

Экспериментально определенные значения λ_x° и λ_r° отличаются от справочных на $\pm 3,21\%$ и $\pm 4,3\%$ для материала УУ1 и $\pm 3,35\%$ и $\pm 4,32\%$ для материала УУ2 соответственно.

Образцы из материала с армированием вида 4Д-Л вырезались из заготовок таким образом, чтобы геометрическая ось цилиндра

совпадала с направлением армирования вдоль оси Z , а в перпендикулярной ей плоскости располагались остальные три направления армирования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые разработана математическая модель для численного исследования теплового состояния осесимметричного цилиндрического образца при импульсном тепловом нагружении с учетом неоднородности материала, неравномерности пространственно-временного распределения энергии импульса, нелинейности ТФХ и нелинейных тепловых потерь с поверхности образца за счет излучения.

2. Впервые разработана математическая модель для численного исследования теплового состояния неоднородного пространственно армированного образца при импульсном тепловом нагружении с учетом неравномерности пространственно-временного распределения энергии импульса, нелинейности ТФХ и нелинейных тепловых потерь с поверхности образца за счет излучения, сложной внутренней структуры образца и термического контактного сопротивления на границе волокно-матрица.

3. Разработана и протестирована методика поиска глобального минимума поверхности отклика сложного рельефа для решения задачи параметрической оптимизации в пространстве двух параметров.

4. Впервые разработана методика комплексного определения пары теплофизических свойств, принятых постоянными в диапазоне температур перегрева образца, по данным одного эксперимента с одного пирометра. Образец может быть осесимметричным либо неоднородным общего вида в т.ч. ПА КМ.

5. Создана, отлажена и протестирована экспериментальная установка для исследования твердых материалов, в том числе пространственно армированных УУКМ, в условиях высоких температур.

6. Методика комплексного определения пары теплофизических свойств апробирована на ортотропных образцах и показала свою работоспособность в условиях высоких температур.

7. Экспериментальные данные по распределению температуры для неоднородного пространственно армированного образца из УУКМ имеют хорошее соответствие с рассчитанными по разработанной математической модели.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Александров А.Е., Гавриленко И.П., Червяков В.В. Определение теплового состояния анизотропного углерод-углеродного композиционного материала // Эрозиянстойкие и жаростойкие композиционные материалы: Тезисы докладов III-го межотраслевого семинара. -Калининград (Моск. обл.), 1990. -С. 26 -27.

2. Гавриленко И.П., Червяков В.В. Исследование теплофизических свойств композиционных материалов при высоких температурах // Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тезисы докладов VIII Всесоюзной школы - семинара. -М. -1991. -С. 31.

3. Shihov E.V., Gavrilenko I.P., Cherviakov V.V. Anisotropic materials high temperature thermophysical properties complex determination method // 150th anniversary of the D.I.Mendeleyev Institute for Metrology: Abstracts of the European Scientific Metrological Conference. -St.Petersburg, 1992. -P. 124-125.

4. Математическое моделирование трехмерных температурных полей в пространственно армированных композиционных материалах / Е.В. Шишов, В.П. Югов, А.П. Скибин, В.В. Червяков // Теория приближений и задачи вычислительной математики: Тезисы докладов конференции. -Днепропетровск, 1993. - С. 31-32.

5. Шишов Е.В., Червяков В.В. Методика определения теплофизических характеристик композиционного материала в условиях высоких температур // Теория приближений и задачи вычислительной математики: Тезисы докладов конференции. -Днепропетровск, 1993. - с. 28-30.

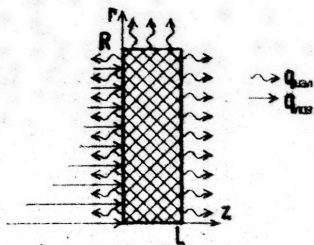


Рис. 1. Схема облучения образца

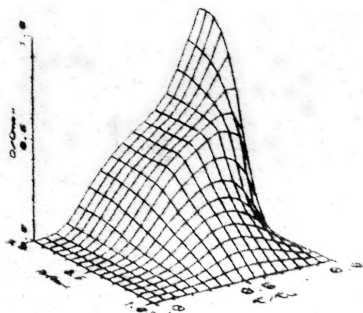


Рис. 2. Распределение энергии лазерного импульса

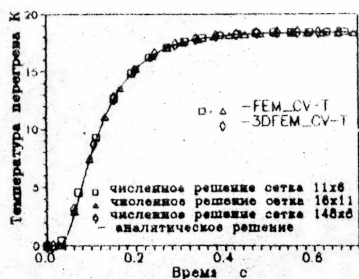


Рис. 3. Решение одномерной тестовой задачи

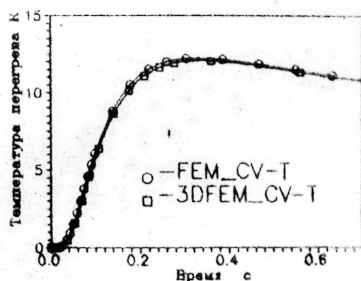


Рис. 4. Решение осесимметричной задачи

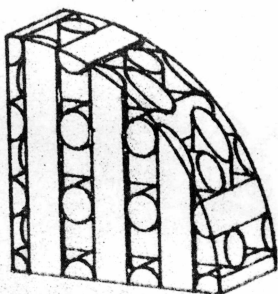


Рис. 5. Структура армирования 3Д

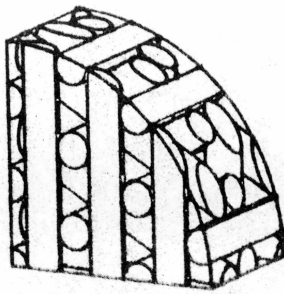


Рис. 6. Структура армирования 4Д-Л

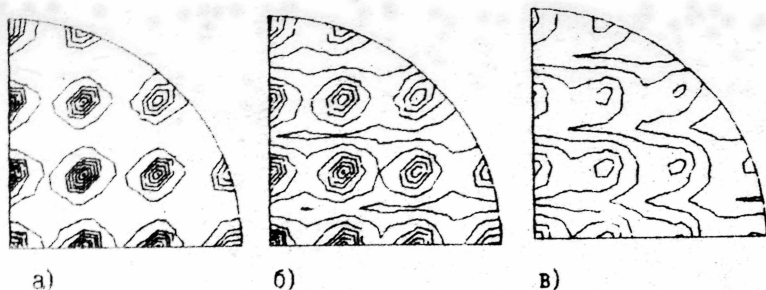


Рис. 7. Тепловое состояние обратной поверхности образца с армированием ЗД для моментов времени $\tau = 0.045$ (а), 0.095 (б), 0.29 (в) сек (расчет)

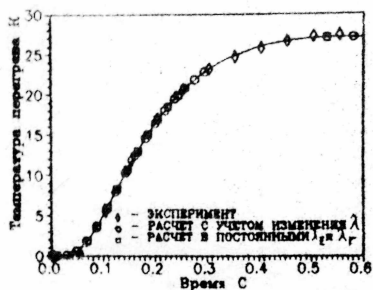


Рис. 8. Тепловое состояние ортотропного образца

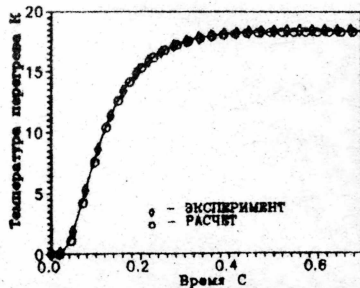


Рис. 9. Тепловое состояние образца из УУКМ с армированием 4Д-Л

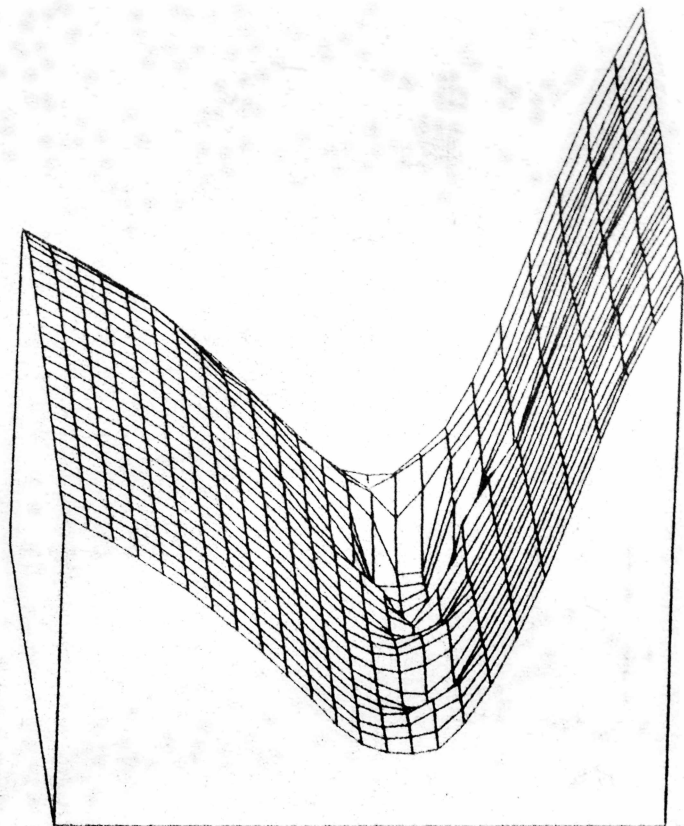


Рис. 10. Общий вид поверхности отклика

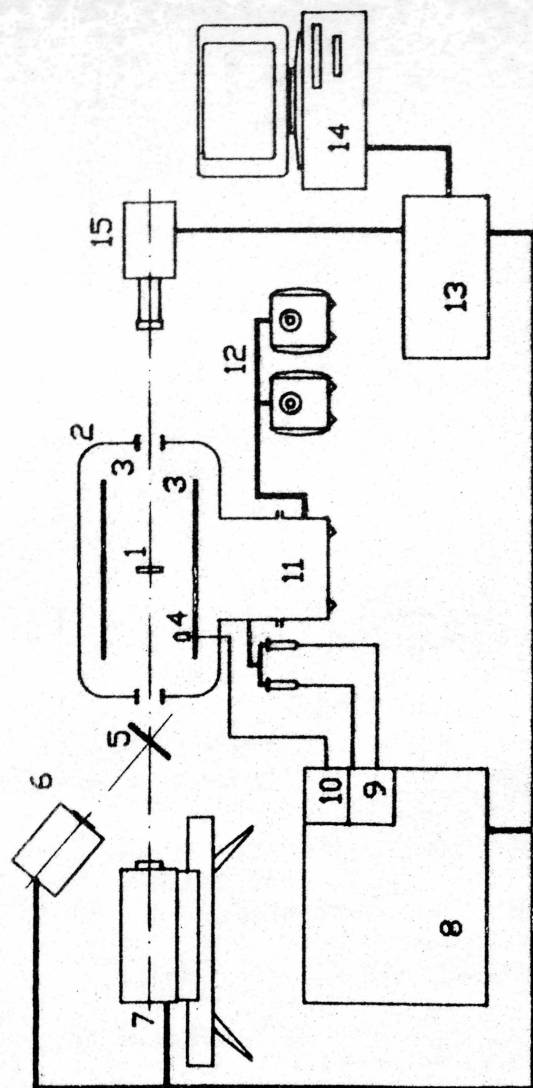


Рис. 11. Схема экспериментальной установки: 1 - образец; 2 - корпус нагревательной камеры; 3 - нагреватель; 4 - термоэлектрический преобразователь; 5 - подотражающее зеркало; 6 - измеритель энергии импульса; 7 - лазер; 8 - система управления режимом нагрева; 9 - система контроля вакуума; 10 - микропроцессорный регулятор ПРОТАР-100; 11 - паромасляный насос; 12 - форвакуумные насосы; 13 - система автоматизации; 14 - компьютер; 15 - пирометр