

НА ДОМ
НЕ ВЫЗЕТО
На правах рукописи

УДК 621.74.04

Морозов Вячеслав Вячеславович

**Исследование и разработка технологических режимов
изготовления отливок по выжигаемым моделям,
полученных методом лазерной стереолитографии**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство



Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2005

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Васильев Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Матвеев Иван Владимирович;
кандидат технических наук, доцент
Ершов Михаил Юрьевич

Ведущая организация - Национальный Институт Авиационных
Технологий (НИАТ)

Защита диссертации состоится « 02 » марта 2005 в — часов на заседании
диссертационного Совета Д.212.141.01 в Московском государственном техни-
ческом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бау-
манская ул., д. 5.

Телефон для справок 267 – 09 - 63

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государст-
венного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « 01 » февраля 2005 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1708718
Морозов В.В. Исследование

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Handwritten signature

В. И. Семенов

Сек. в конус

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Развитие технологии с применением методов быстрого прототипирования (в англоязычной литературе получило название Rapid prototyping, сокращенно RP) неуклонно растет и становится неотъемлемой частью производства. Данные системы проектирования на базе компьютерного моделирования ориентированы на подготовку производства и помощь инженеру по следующим направлениям: отработка отдельных элементов конструкции; исследования (использование моделей для проверки механических напряжений, деформации, газодинамических характеристик изделий, узлов и т.д.); модельно-стержневая оснастка; изготовление отливок; макетирование и дизайн.

На сегодняшний день модели, полученные по технологии RP, находят свое применение в литейном производстве в двух основных направлениях: многоразовом и одnorазовом использовании.

Отечественный и зарубежный опыт многоразового использования RP моделей зарекомендовал себя при литье в песчаные формы (как при ручной формовке, так и на автоматических формовочных линиях), а так же при изготовлении форм и стержней для литья в ХТС.

Одноразовое использование RP моделей нашло большее развитие при изготовлении силиконовых форм (на базе RTV - резин) и тиражирования по ним восковых моделей для технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Так же развивается направление применения выжигаемых моделей, полученных методами RP, в литейном производстве. Использование данного направления обосновано в опытно - экспериментальном производстве, когда геометрическая форма будущей отливки является достаточно сложной. Изготовление силиконовой формы по такой модели достаточно трудоемко или невозможно, а в большинстве случаев экономически невыгодно (при серийности 1-2 шт.).

Изготовление отливок по выжигаемой модели (техпроцесс основан на выжигании модели непосредственно из полости литейной формы в прокалочной печи) позволяет в условиях опытно-экспериментального производства ускорить процесс изготовления «первой» отливки входящей в новый прибор, узел, ~~изде~~ -

лие для выполнения проверки работоспособности, оценки выдаваемых характеристик. В последующем, при запуске в серию, изготовление этого изделия будет выполняться по отработанным технологиям, с применением модельных масс и металлических пресс-форм (например, технология LBM).

Существующие промышленные комплексы быстрого прототипирования достаточно дороги в эксплуатации и изготавливаемые на них модели не могут удовлетворять всему диапазону описанных выше задач. Поэтому встает вопрос о рациональных границах применения таких моделей в литейном производстве, изучении свойств материалов, разработке новых материалов для изготовления 3D – моделей методами RP, учитывающих специфику технологии литейного производства. Комплекс лазерной стереолитографии уже сегодня позволяет получать модели со сложной геометрией - причем пустотелыми, что особенно ценно в процессе выжигания.

Развитие техники ведет к усложнению узлов и агрегатов, что усложняет конструкции литых деталей и требования к ним. Производству необходимы технологии, позволяющие изготавливать сложные изделия, в том числе и по технологии выжигания.

Цели и задачи исследования. Целью данной работы является разработка технологии изготовления отливок повышенной сложности по выжигаемым фотополимерным моделям (ФПМ) непосредственно в полостях литейной формы.

Объектом исследования является отвержденный фотополимерный композиционный материал, используемый в технологии SLA, а также процесс изменения его размеров и термодинамических параметров при нагревании.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Исследовать влияние скорости и времени нагрева на изменение размеров фотополимерных композиционных материалов (ФПКМ);
2. Исследовать факторы, влияющие на процессы деструкции ФПМ при нагревании. Предложить на основе исследований математические модели поведения ФПК при нагревании, позволяющие корректировать режимы выжигания;

3. Разработать методику расчета технологических параметров для изготовления отливок методом выжигания;
4. Повысить выход годного при изготовлении отливок разной сложности из материалов по выжигаемым фотополимерным моделям.

Научная новизна работы:

1. Установлены фазы поведения ФПКМ в форме при нагревании, которые оказывают влияние на формирование качества литейной формы.
2. Научно обоснованы рациональные условия терморазложения фотополимерного композиционного материала в литейной форме.
3. Определен порядок химической реакции разложения фотополимерного материала в условиях термоокислительной деструкции.

Практическая значимость работы:

1. Предложены варианты режимов нагрева литейной формы и влияние термовременных выдержек, приводящих к снижению силового воздействия со стороны фотополимерной модели на литейную форму, с учетом заливаемого сплава.
2. Изготовлен компьютеризированный стенд для определения изменения размеров при нагревании образцов из ФПКМ. Так же компьютеризирована установка для исследования процессов разложения в условиях по термо- и термоокислительной деструкциях (ТД и ТОД)
3. Накоплен и обобщен экспериментальный материал ТД и ТОД, позволивший определить термодинамические параметры процесса разложения: энтальпия, энтропия, энергия Гиббса.
4. Предложен способ принудительной подачи воздушной смеси (окислительной) в реакционную зону терморазложения фотополимерного материала для ускоренного и полного разрушения и удаления пиролизического остатка.
5. Разработана технология изготовления сложных и особо сложных отливок по выжигаемым фотополимерным моделям.

Получены результаты: кинетика теплового расширения ФПКМ, термодинамические параметры терморазложения позволили определить основные этапы разложения и определить технологические режимы выжигания. Это позволило

выполнить работу по изготовлению отливки «Колесо турбины» и тем самым сократить время от разработки чертежа до получения первой отливки до 10 раз.

Применение данной технологии изготовления сложных отливок по выжигаемой ФПМ позволяет: сократить цикл разработки, улучшить дизайн, повысить качество, уменьшить цену продукта, ускорить внесение изменений в конструкцию при изготовлении опытных образцов изделий.

Апробация работы. Основное содержание работы, а также ее отдельные положения докладывались и обсуждались: на научных семинарах кафедры МТ-5 МГТУ им. Н.Э. Баумана 1999 – 2004 г; на научном семинаре кафедры МТ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана 2002 г; на выездной сессии РАН май 2000 г; на выставке «Высокие технологии оборонного комплекса» г. Москва, 2001г, «Экспоцентр»; на семинаре «Баландинские чтения» декабрь 2001г. МГТУ им. Н.Э. Баумана; на 2 -х международных выставках МГТУ им. Н.Э. Баумана; на 7^{ой} конференции по лазерным технологиям ILLA 2001, г. Суздаль 2001 г.

На защиту выносятся:

- физико-математические модели, описывающие поведение изменения размеров, состояния ФПКМ в условиях термо – и термоокислительной деструкций;
- компьютеризированные методики исследований кинетики изменения размеров ФПКМ при нагревании и термодинамического поведения ФПК в условиях ТД и ТОД;
- метод и режимы удаления ФПКМ из литейной формы;
- разработанный технологический процесс изготовления отливок по выжигаемым фотополимерным моделям.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Поведение ФПКМ при нагревании аналогично поведению полимерных композиционных материалов на эпоксидной основе, фенольной и акриловой основах.
2. Для полного разрушения ФПКМ при нагревании необходимо управление режимами подачи газовой атмосферой в процессе выжигания модели в литейной форме.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ: статьи - 3, тезисов - 4, а также участие в 10 хозяйственных работах в качестве соисполнителя.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка использованной литературы из 56 наименований, приложений, содержит 161 страниц машинописного текста, в том числе 68 рисунков и 18 таблиц.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность диссертации.

В **первой главе** представлен обзор современных основных комплексов быстрого прототипирования, способы изготовления 3D моделей на основе компьютерных данных. Выполнен анализ применения моделей изготовленных по технологии RP в литейном производстве. Обоснован выбор базовой технологии - лазерной стереолитографии (в англоязычной литературе - Stereo Lithography Apparatus – SLA). Последовательно рассмотрен механизм изготовления фотополимерной модели от ее создания на ЭВМ, конвертации в STL – файл. Рассмотрены свойства ряда фотополимерных композиционных материалов как импортных (SL 5149, SL 5170, SL 5177), так и отечественных (НИЦТЛ 1, ИПЛИТ 1, ИПЛИТ 2, ЗИЛ), приведен химический состав базовых марок отечественных ФПКМ. Определены основные виды дефектов, возникающие при изготовлении отливок по технологии выжигаемых фотополимерных моделей, такие как: растрескивание керамических литейных форм, большой пиролизический остаток оставшийся от продуктов разложения при сжигании ФПКМ. Это потребовало исследовать процессы поведения фотополимерного материала, ее кинетики и природу образования пиролизического остатка при нагревании. Определение термодинамических параметров (изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) в дальнейшем определило условия разрушения ФПКМ.

Разработка вышеописанной технологии выполнялась в рамках совместных работ НИИ КМ и ТП с привлечением специалистов из института физической химии им. Н.Н. Семенова, ИПЛИТ РАН (г. Шатура), МГТУ им. Н.Э. Баумана (кафедры МТ-1, МТ-5, МТ-12). Совместная работа по разработке данной технологии, цели и задачи каждой из групп представлены в краткой форме.

На основании анализа, обобщения литературных данных, проведенных предварительных экспериментов по изготовлению отливок с применением выжигаемых фотополимерных моделей позволило сформулировать цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию процессов деформации при нагревании фотополимерных композиций разных марок. Приведена схема разработанной и сконструированной компьютеризированной установки по определению теплового расширения. Она позволяет исследовать изменения объемного расширения при разных скоростях нагрева и выполнять термо-временные выдержки при нагреве до 627 К. Описана методика проведения исследований и обработки полученных результатов. Экспериментальные кривые, описывающие расширение и начало разрушения, представлены на рисунке 1. Проведенные исследования показали, что наименьшее значение расширения при нагревании имеют образцы ФПКМ марки «ИПЛИТ – 1». Анализ результатов экспериментов (рис. 1) показывает, что применение моделей, выполненных по технологии Quick Cast (Quick Cast - технология изготовления пустотелых моделей с варьируемой толщиной стенки модели) имеют меньшее значение расширения (от 1 до 1,4%), чем при монолитной структуре образца (от 2,4 до 3,2%). Проведенный литературный анализ по расширению и разрушению оболочек литейных форм показывает, что керамическая оболочка при нагревании не способна расширяться на величину максимального значения расширения ФПКМ, поэтому возникает напряженное состояние между оболочкой и моделью. Выявлен дополнительный фактор, влияющий на появление дефектов в литейной оболочке на начальной стадии нагрева. Комплексное проявление этих факторов приводит к образованию трещин, поломке и отслоений в оболочке литейной формы. Это

требует дополнительных мероприятий, способствующих укреплению оболочки и учитывающих такие факты: первое - сложная фотополимерная модель не может быть выполнена только по технологии Quick Cast, в ней обязательно будут присутствовать цельные области, где расширение может достигать до 2,4%; второе - прочность оболочки выше на сжатие, чем на расширение.

Исследована кинетика поведения ФПКМ при нагревании с использованием термо-временных выдержек и учетом разных скоростей нагрева представлены на рисунке 2 и 3.

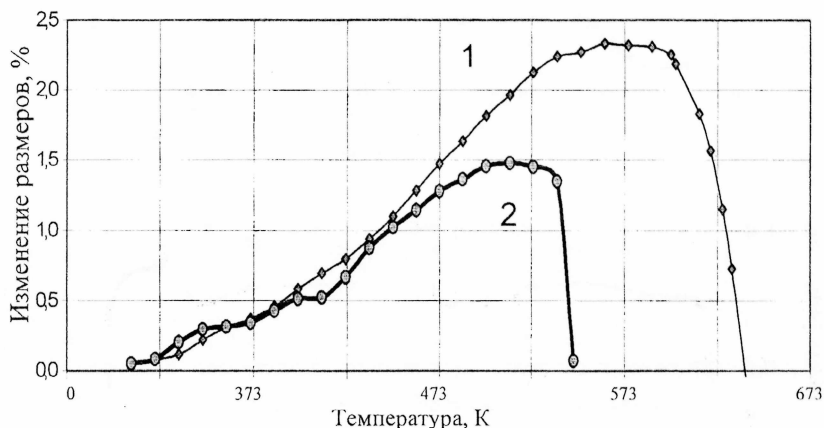
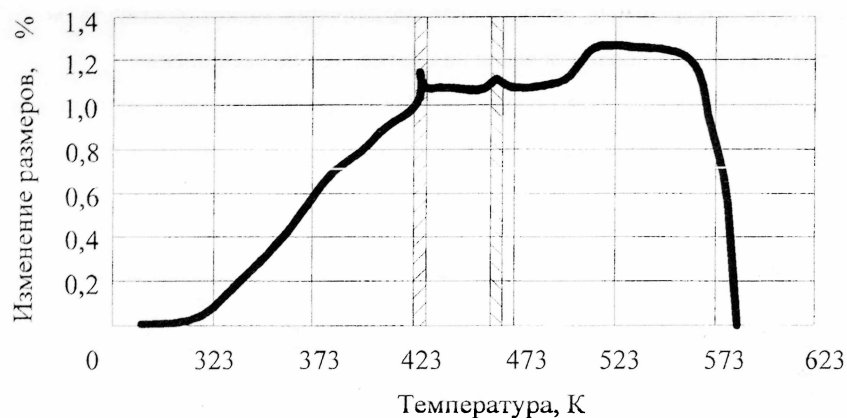


Рис. 1 Типовая деформация ФПК марки ИПЛТИТ-1:

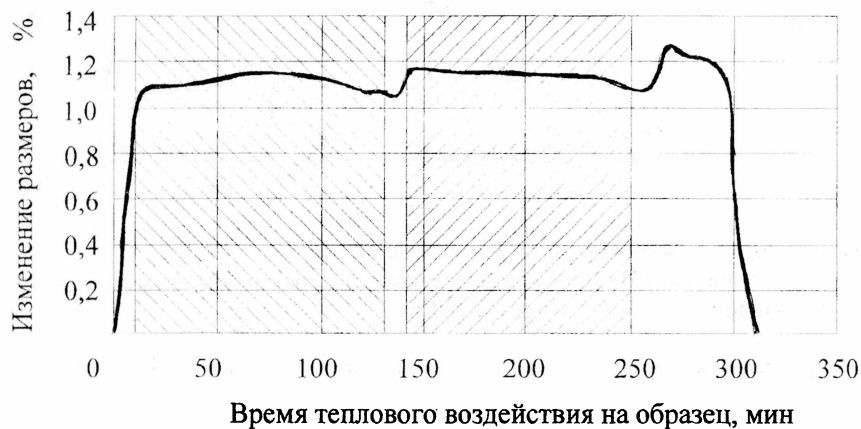
1- деформация ФПК с цельной моделью; 2- характерная деформация ФПК, выполненной по технологии Quick Cast.

Проведенные эксперименты по исследованию изменения ФПКМ в процессе нагревания от комнатной температуры до 973 К позволили сравнить их с поведением полимерных материалов (на эпоксидной, фенольной основе). Данные сопоставления позволили определить общие моменты разрушения полимерных материалов с ФПКМ и принять математическую модель, изложенную Димитриенко А.Ю. для расчета изменения полимерной, пиролизической и газовой фаз в процессе нагрева. Частично результаты расчета, по этой модели, представлены на рисунке 4. В диссертации представлены фотографии по деформации и разрушению ФПК.

расчета, по этой модели, представлены на рисунке 4. В диссертации представлены фотографии по деформации и разрушению ФПК.



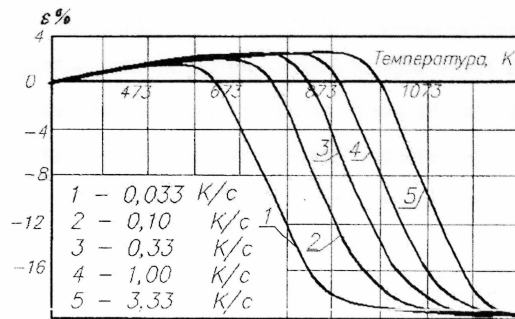
а)



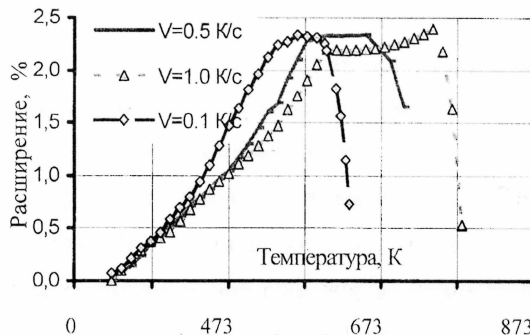
б)

Рис.2 Влияние термо-временных выдержек на конечную деформацию ФПКМ марки «ИПЛИТ - 1»:

а) зависимость деформации от температуры; б) зависимость деформации от времени нагрева и выдержек.



а)



б)

Рис.3 Влияние скорости нагрева на конечную деформацию:

- а) Изменение деформации эпоксидной матрицы [Димитриенко А.Ю.];
б) изменение деформации ФПКМ марки «ИПЛИТ - 1».

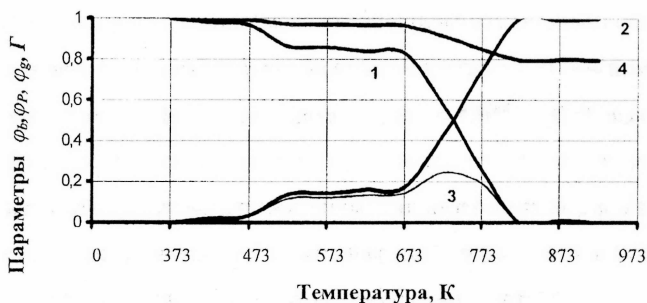


Рис. 4. Изменение состояния ФПК при нагреве:

- 1 ϕ_p - изменение полимерной фазы, 2 ϕ_r - изменение пиролитической фазы, 3 ϕ_g - изменение газовой фазы, 4 Γ - изменение коэффициента газификации ФПК.

при разных температурах.

В данной главе определена деформационная зависимость ФПКМ разных марок, а так же зависимость влияния скорости нагрева и временных выдержек на конечную деформацию. Использованная математическая модель позволила определить динамику разрушения ФПК и сравнить его с результатами эксперимента.

Третья глава посвящена исследованию удаления продуктов термо- и термоокислительных деструкции в условиях литейной формы, определению термодинамических параметров разрушения ФПК как импортных, так и отечественных. Описана экспериментальная установка, методика проведения исследований, а также обработка экспериментальных данных. Данное исследование основано на изменении парциального давления газов, образовавшихся в результате деструкции ФПКМ при нагреве в замкнутой системе. Исследования проводились при разных начальных условиях: при $P_{\text{ост}} \leq 1$ кПа - процесс «чистой» деструкции (соответствующий разложению при отсутствии кислорода) и при остаточном давлении воздуха 30 кПа - процесс термоокислительной деструкции. Второе начальное условие соответствует содержанию газов в литейной форме при нагревании и прокатке (где давление кислорода составляет $P_{\text{ост}} = 6$ кПа.).

В исследовании были выявлены основные схемы разрушения и разложения ФПК. Их можно представить следующими схемами:

- *твердая фаза* $\xrightarrow{\text{нагрев}}$ *газ* + *твердая новая фаза* (термодеструкция);
- *твердая фаза* + O_2 $\xrightarrow{\text{нагрев}}$ *газ* + *твердая новая фаза* (термоокислительная деструкция).

Методика определения термодинамических параметров состояния основана на экспериментальном определении зависимости давления выделяющихся газов от температуры при постоянном объеме, которое описывается уравнением Клаузиуса – Клапейрона:

$$\text{Ln}P = -\Delta H/RT + \Delta S/R, \quad (1)$$

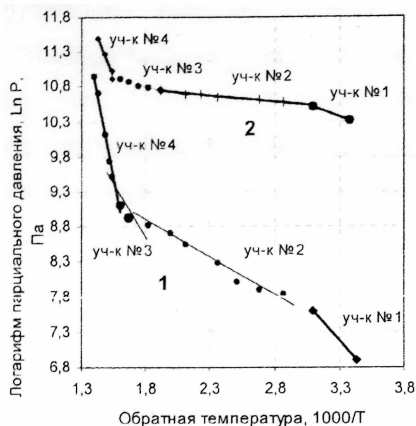
где ΔH – энтальпия, Дж/моль, ΔS – энтропия процесса термодеструкции, Дж/(моль*К), R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К), T – температура, К.

Характерная кривая разложения для всех ФПКМ представлена на рисунке 4а. Согласно методики (описана в диссертации), выполняем обработку экспериментальных данных и выделяем прямолинейные участки (рис. 4б). Это позволяет определить основные этапы разложения, найти фазовые точки перехода исследуемого материала, а также особенности его поведения.

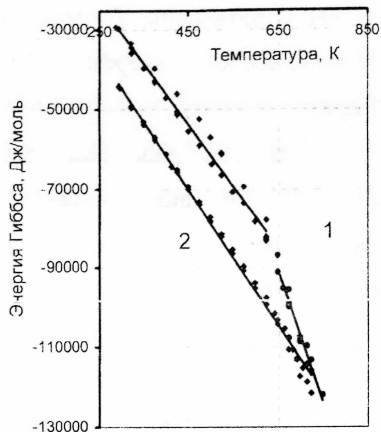
У всех исследованных фотополимерных материалов можно выделить четыре этапа разложения: 1-й от комнатной температуры до 373 К – испарение растворителя, 2-ой от 373 до 593 К – начало разложения (деструкции), 3-й от 393 – 643 К – разложение ФПКМ на макромолекулы с обильным выделением газовой фазы, 4-й от 643 до 973 К – образование пиролитического остатка с разложением на микромолекулы групп $C_3 \dots C_5$.

Анализ результатов исследований процесса разложения ФПК позволяет выбрать режимы выжигания и управлять этими процессами. В зависимости от конфигурации фотополимерной модели, типа ФПК, на этапе конструирования литниково-питающей системы необходимо закладывать конструктивные элементы (выпора, промывники) для эффективного достижения чистоты полости литейной формы после прокалки.

Проведенная работа по определению термодинамических параметров позволила определить наилучшие условия разложения с учетом выявленных этапов разложения. Выявить разницу в разложении при использовании ФПКМ с разной основой при изготовлении отливок по выжигаемым фотополимерным моделям. Подтвердила необходимость создания окислительных условий разложений на этапе выжигания. Полученные расчетные данные являются заделом по определению константы скорости разложения.



а)



б)

Рис. 4 Преобразование экспериментальных данных и определение термодинамических параметров:

а) выделение фазовых переходов; б) изменение энергии Гиббса при нагревании. 1 – ФПК при ТД, 2 – ФПК при ТОД.

Четвертая глава посвящена определению порядка химической реакции (по методике А.И. Горбунова). В диссертации представлены результаты определения порядка химической реакции по экспериментальным данным главы 2. Результатом данных расчета стала зависимость следующего вида:

$$n = \text{Log}_P \left[\left(\frac{\kappa_2 (1 - a_i)}{\frac{da_i}{d\tau_i}} \right) \right], \quad (2)$$

где n – порядок химической реакции; P – давление газов, образующихся при разложении ФПК в условия ТОД, Па; κ_2 – константа процесса (определена в диссертации); a_i – количество вещества (количество образования активных центров при нагревании); τ_i – время образования активных центров, мин.

Анализ полученных результатов показывает, что разложение является сложной функцией скоростей разложения отдельных стадий на каждом участке. Это приводит к получению дробных и даже отрицательных значений кинетических порядков реакций рисунок 5. В итоге найти зависимость выжигания фотополимерного материала на этапах разложения от времени не представляется

возможным. В таких случаях решение проблемы возможно лишь обобщенным рассмотрением полученных результатов и поиском закономерностей (для участка выдержки $T_{\text{выд}} = f(\tau)$; $V_{\text{нагрева}} = f(T; \tau)$).

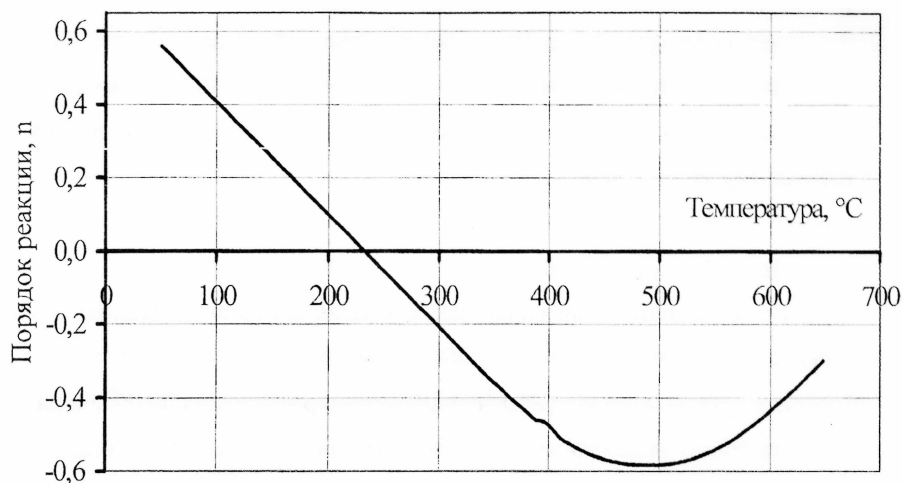


Рис. 5. Изменение порядка химической реакции ФПК при разложении

Пятая глава посвящена обобщенному изучению поведения материала ФПКМ в процессе нагрева. Исходными данными послужили результаты исследований глав 2, 3. Проведенный анализ разрушения фотополимерного материала, с учетом особенностей технологии изготовления SLA – моделей и поведения ФПКМ при нагреве, позволил определить рекомендации по подготовке модели и мерах ее выжигания в условиях литейной формы.

Сформулированы требования к перспективным фотополимерным материалам, которые ориентированны на данную технологию.

В шестой главе описано практическое приложение накопленных знаний в процессе изготовления отливок по выжигаемым фотополимерным моделям и других технологических литейных процессах с применением фотополимерных моделей. На примере полупромышленного изготовления отливки «Колесо тур-

бины» из сплава ВЖЛ12У показана возможность получения отливок из стальных и жаропрочных сплавов. Представлена принципиальная схема конструкции установки с помощью которой была выполнена данная работа. Также рассмотрены варианты изготовления отливок ювелирно-художественного направления в лабораторных условиях. Представлена принципиальная схемы устройства выжигания фотополимерных моделей непосредственно в прокаточных печах, описаны технологические режимы изготовления и подготовки литейных форм под заливку для широкого диапазона сплавов.

Общие выводы по работе

На основании проведенных исследований сделаны следующие основные выводы:

1. Анализ результатов исследования процессов расширения ФПК при нагревании позволяет выделить три зоны прогрессивного объемного расширения: 1- до 453 К, где происходит расширение материала; на 2- участке нагревания скорость расширения значительно увеличивается и в диапазоне от 553 до 603 К, а деформация достигает своего максимального значения расширения. На участке 3 происходит термодеструкция материала, которое завершается резким уменьшением размеров.

По результатам исследований предложена физико-математическая модель изменения размеров ФПКМ при нагревании. Выполнены исследования и расчеты по определению полимерной, пиролитической и газовой фаз при нагревании, а так же изменение плотности материала, коэффициента газификации.

2. Изучено термодинамическое поведение моделей из ФПК, которое показало, что дополнительным фактором на разрушение керамических литейных оболочек оказывает газовая фаза, образующаяся в процессе разложения ФПКМ. Это проявление становится существенным, когда температура нагрева достигает значений от 453 до 493 К.

Скорость нагрева оказывает влияние на прогрев ФПКМ (что характерно для литейной формы). Возникает объемная термодеструкция и при больших скоростях нагрева (свыше 0.1 К/с) формируется максимальное поровое давление в ячейках материала не на поверхности, а внутри полимерного материала. Это обстоятельство усиливает силовое воздействие со стороны фотополимерного материала на оболочку литейной формы и, как следствие, к ее деформации и разрушению.

3. Исследована кинетика нагрева ФПК. Показано влияние скорости нагрева и термо-временных выдержек на конечное значение расширения. Разработаны подходы управления процессом расширения ФПКМ, позволяющие снизить вероятность разрушения литейной формы.
4. Предложена математическая модель определения термодинамических параметров. По экспериментальным данным были определены термодинамические параметры (ΔH , ΔS , ΔG) процесса терморазложения. Проведенные исследования на ФПК позволили выделить четыре основных температурных этапа разложения: 1- от комнатной до 323 К удаление растворителя; 2- от 323 до 593 К начало разложения на макромолекулы; 3- от 593 до 653 К продолжение термодеструкции ФПК до макромолекул групп $C_3 \dots C_5$; 4- от 653 до 973 К диссоциация с выделением пиролизического углерода.
5. Определен порядок реакции разложения ФПКМ в термоокислительных условиях, который носит сложный знакопеременный вид и имеет дробные значения.
6. Предложена установка и режимы продувки для выжигания фотополимерных моделей из литейной формы. Управление окислительной средой в реакционной зоне разложения ФПКМ при нагревании позволяет интенсивно разрушать материал модели и удалять остатки продуктов разложения.
7. Данный метод опробован в лабораторных и полупромышленных условиях, что позволило получить отливки сложной формы из алюминиевых, медных и жаропрочных сплавов.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Использование методов послойного формирования трехмерных объектов в литейном производстве / Васильев В.А., Морозов В.В., Шиганов И.Н. // Вестник машиностроения. - 2001. - № 2. -С. 4 – 11.
2. Получение отливок по моделям из фотополимерного композита для ювелирно-художественных изделий / Васильев В.А., Морозов В.В. Евсеев А.В., Новиков //Литейное производство. –2000. -№8. - С. 46 – 47.
3. В.А. Васильев, В.В. Морозов. Использование SLA –технологии для изготовления ювелирных и художественных изделий // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. XI межд. Научно-технической конференции – Сочи, 2000 – С.61-62.
4. Определение порядка химической реакции в процессе диссоциации фотополимерной композиции при нагревании/ В.А. Васильев, В.В. Морозов. А.И. Горбунов // Производственные технологии – 2001: Материалы отчетной конф. – выставки – М., 2002.-С.169-172.
5. В.А. Васильев, В.В. Морозов. Изготовление художественных и ювелирных изделий по моделям, полученным методом лазерной стереолитографии. // 7я Международная конференция. Лазерные и лазерно – информационные технологии. ILLA 2001 – Суздаль 2001. С.88.
6. В.А. Васильев, В.В. Морозов. Изготовление стальных отливок по фотополимерным моделям путем выжигания их в литейной форме // Современные проблемы металлургического производства: Тез. межд. научно-техническая конференция – Волгоград, 2002.-С. 334-337.
7. Теория и технология изготовления отливок методом RP / В.А. Васильев, В.В. Морозов, Н.М. Максимов // Литейное производство – 2004. - № 4. - С 5-9.