

**А.И. Долматов, С.Е. Маркович**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«ХАИ», Украина*

## **ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Рассмотрены вопросы разработки концепции автоматизированного универсального комплекса, позволяющего формировать детонационно-газовые покрытия с заданным градиентом физико-механических свойств, посредством активного контроля и управления энергетическими параметрами процесса напыления по заданной программе в режиме реального времени.

**газотермические покрытия, поверхностный слой, автоматизированный комплекс, детонационно-газовое напыление**

### **Введение**

Современные технологии детонационно-газового напыления покрытий позволяют решать широкий спектр задач в производстве и ремонте авиационной техники. Использование данных процессов обеспечивает существенное увеличение долговечности и надёжности изделий без существенного изменения их себестоимости, что особенно актуально в условиях возрастающей конкуренции. Обеспечение заданного комплекса эксплуатационных свойств зачастую вызывает большие трудности, поскольку требования зачастую противоречивы, что делает проблему использования специальных защитных покрытий весьма актуальной.

В области детонационно-газового нанесения покрытий, обладающих рядом уникальных характеристик, внедрение автоматизации процессов напыления и контроля, а также элементов нанотехнологий позволяет вывести данную методику защиты и восстановления изделий на качественно новый уровень, обеспечивающий возможность формирования поверхностных слоёв с заданным градиентом физико-механических свойств.

Полная автоматизация управления и наличие механизмов обратной связи позволяет обеспечить стабильность параметров процесса, что даёт

---

возможность решать вопросы априорного прогнозирования эксплуатационных характеристик изделий.

### **1. Постановка задачи и цели исследования**

При разработке параметров технологического процесса и оборудования для детонационно-газового напыления одной из наиболее актуальных задач является обеспечение формирования защитных покрытий с заданным градиентом физико-механических свойств и стабильности эксплуатационных характеристик изделий, что приводит к необходимости разработки концепции создания универсального автоматизированного комплекса, позволяющего реализовать преимущества детонационно-газового метода, посредством активного контроля и управления энергетическими параметрами процесса напыления по заданной программе в режиме реального времени.

### **2. Методики прогнозирования физико-механических характеристик системы покрытие-подложка**

Разработка оптимальных технологических процессов напыления должна выполняться с выбором рационального соотношения между скоростью и температурой напыляемых частиц.

Изменяя состав взрывчатой смеси, глубину загрузки порошка, длину ствола можно изменять энергетические параметры частиц и, таким образом, управлять процессом напыления и свойствами покрытия. Оптимизация процесса детонационного напыления требует детальной информации о динамике поведения продуктов детонации и напыляемых частиц в стволе детонационной установки, что подчёркивает актуальность задач математического моделирования динамики двухфазного потока в стволе детонационной установки.

В теоретических исследованиях многофазных течений наибольшее распространение получил подход, при котором каждая фаза описывается своей системой уравнений сплошной среды. Связь между фазами определяется дополнительными членами, характеризующими изменение массы, количества движения и энергии при межфазном взаимодействии. Такой

---

подход имеет широкую область применимости, обладает достаточной простотой, наглядностью и позволяет использовать известные методы решения, разработанные в гидродинамике гомогенных сред [1, 2]. Этот подход является оптимальным для решения поставленной задачи и позволил разработать методику расчёта параметров продуктов детонации и частиц порошка в зависимости от времени по длине ствола, учитывающую силовое и тепловое взаимодействие частиц порошка с детонационной волной и продуктами детонации. Расчётная модель имеет следующие допущения [2, 3]:

- 1) давление создается только газом, влиянием частиц пренебрегается;
- 2) твердые частицы, являясь сферами одного и того же радиуса, равномерно расположены в стволе и не взаимодействуют между собой и стенками ствола, частицы являются инертными и не вступают в химическую реакцию с продуктами детонации;
- 3) в любом поперечном сечении все параметры постоянны;
- 4) массообмен между газом и порошком отсутствует;
- 5) объемом, занимаемым частицами, можно пренебречь;
- 6) вследствие высокой теплопроводности материала частиц их температура по всему объему постоянна;
- 7) гравитационными и электрическими силами можно пренебречь.

Модель построена на основании законов сохранения газа и псевдогаза частиц и дополняется уравнением состояния смеси с учетом диссоциации молекул [1, 2]. Разработанная методика устанавливает зависимости между технологическими параметрами процесса напыления (состав смеси и расход газов, дистанция напыления, глубина загрузки порошка, длина ствола, физико-механические свойства материала частиц, гранулометрический состав порошка) и энергетическими параметрами (скорость, температура частиц, степень проплавления частиц и т.д.), что позволяет перейти к прогнозированию физико-механических свойств материала покрытия и эксплуатационных свойств композиции покрытие-подложка в целом.

В качестве одной из наиболее актуальных прикладных задач является разработка методики управления напряжённо-деформированным состоянием поверхностного слоя изделия с газотермическим покрытием, в частности - задача разработки методики расчёта величины и распределения остаточных напряжений в системе покрытие-подложка при импульсном

---

процессе напыления с учётом вклада кинетической энергии частиц и начального поля остаточных напряжений. Была разработана и апробирована методика расчёта величины и распределения остаточных напряжений в системе покрытие подложка для поверхностей произвольной конфигурации, позволяющей учитывать влияние следующих факторов [4, 5]:

- 1) физико-механических свойств материалов покрытия и подложки;
- 2) размеров и формы частиц напыляемого материала;
- 3) кинетической энергии частиц напыляемого материала;
- 4) температурного поля системы покрытие-подложка;
- 5) начальных остаточных напряжений, сформированных на этапе предварительной обработки поверхности перед напылением покрытия.

Алгоритм решения данной задачи включает несколько этапов.

1. Экспериментальные исследования, целью которых является выявление прочности, пористости, модулей упругости материала покрытия.

2. Определение начальных остаточных напряжений в поверхностных слоях напыляемой детали, сформировавшихся в процессе предварительной обработки поверхности.

3. Моделирование нестационарного процесса воздействия теплового потока на деталь со стороны единичного пятна покрытия с частотой, соответствующей скорострельности установки и промежутку времени между напылением покрывающих слоёв.

4. Определение параметров процесса ударного взаимодействия частицы и подложки, в результате которого происходит деформация частицы и подложки, формирование исходного поля остаточных напряжений.

5. Определение остаточных напряжений в системе подложка-покрытие при снятии закрепления с учётом поля начальных остаточных напряжений и термических напряжений.

Модель рассматривает процессы первичного нагружения и разгрузки. Напряженное состояние поверхностных слоев определяется по величине остаточной деформации при линейном упрочнении и при степенном упрочнении материала в области пластических деформаций [4, 5]. Методика расчета величины распределения остаточных напряжений в системе покрытие-подложка приведена на рис. 1.

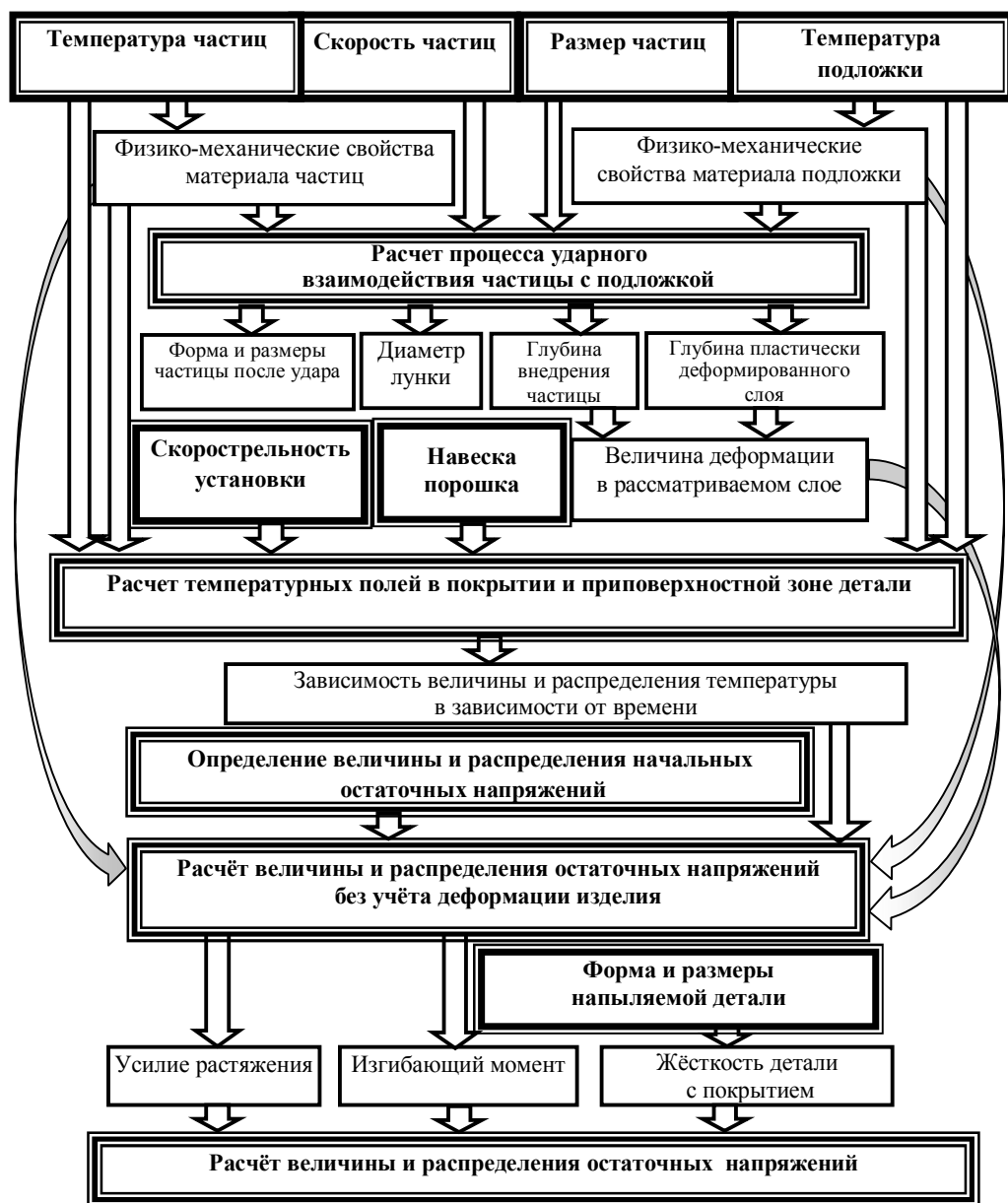


Рис. 1. Методика расчета величины распределения остаточных напряжений в системе покрытие-подложка

Как свидетельствует анализ методики [4 – 5], при одной и той же величине деформации, варьируя температурой деформируемого слоя, можно управлять величиной и знаком остаточных напряжений в системе. Таким образом, для любого слоя может быть определена критическая величина

---

температуры  $T_{кр}$ , при которой происходит формирование растягивающих остаточных напряжений.

Для определения степени влияния температурного поля на процесс формирования растягивающих остаточных напряжений в системе покрытие-подложка, введён температурный критерий:

$$M_T = \frac{T}{T_{кр}}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура напыляемого слоя.

Как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, для формирования сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали с покрытием величина критерия должна быть  $M_T < 1$ . Следует отметить, что с учётом погрешности измерений, рекомендуемая величина критерия составляет  $M_T < 0,95$ .

Использование данной методики позволяет в автоматизированной системе управления детонационным комплексом, путём сравнения входящего сигнала (от прибора активного контроля температуры пятна) с эталонным сигналом, соответствующим критической температуре пятна, предотвращать (посредством управления технологическими параметрами) возникновение в напыляемом слое растягивающих остаточных напряжений вследствие заброса температур.

С.В. Сергеевым была разработана математическая модель, описывающая механизм соударений и пластического деформирования частиц и подложки с учетом наложения в процессе формирования покрытия нестационарных температурно-силовых полей и позволяющая оценить величину адгезионной и когезионной прочности покрытия [6] (рис.2). Данная методика включает расчёт процесса ударного взаимодействия частицы и подложки, в результате которого происходит деформация подложки, сближение атомов частицы и подложки, создание активных центров на поверхности подложки, влияющих на величину контактной температуры и моделирование нестационарного процесса циклического воздействия теплового потока на деталь со стороны единичного пятна покрытия с частотой, соответствующей скорострельности установки, с учетом величины контактной температуры как одного из краевых условий.

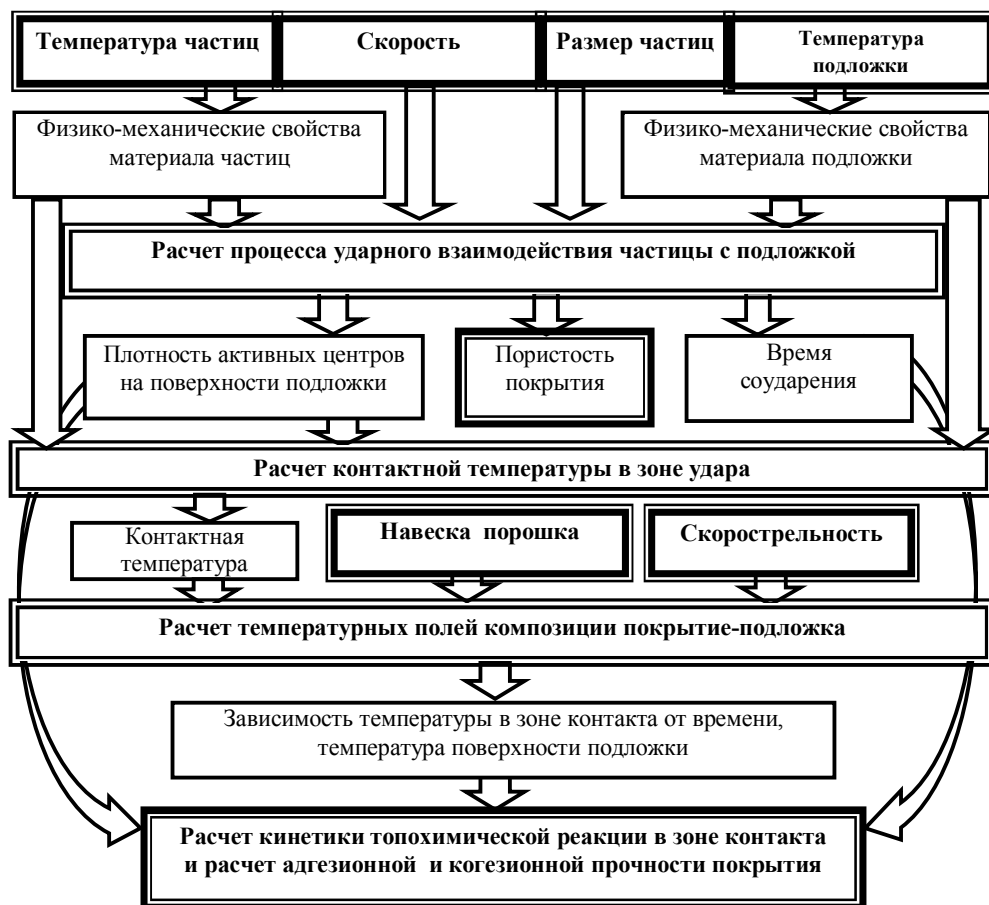


Рис. 2. Методика расчета прочностных свойств детонационных покрытий [6]

Разработанный математический аппарат и созданное на его основе программное обеспечение на языке программирования Delphi позволяет решить задачу априорного прогнозирования физико-механических свойств композиции покрытие-подложка, обеспечить стабильность параметров, реализовать механизмы обратной связи и перейти к построению процесса, управляемого в режиме реального времени.

### 3. Реализация концепции универсального автоматизированного комплекса

Аппаратная реализация концепции универсального автоматизированного комплекса выполнена на базе установки УДК-III. Принципиальная

схема представлена на рис. 3. Экспериментальная установка снабжена водоохлаждаемым стволом 1 постоянного сечения. Внутри ствола соосно расположена охлаждаемая трубка подачи порошка в ствол установки, связанная с дозатором 7.

Управление подводом газов в цикле работы реализуется при помощи блока электроклапанов, управляемых непосредственно от блока управления 3, выполненного на базе персонального компьютера.

Установка имеет электронную систему зажигания, смонтированную в блоке 8, которая управляется через блок управления 3. Поджиг газов осуществляется свечой зажигания.

Узел подачи рабочих газов связан с источниками продувочного и рабочих газов 4.

Блок автоматического управления 3 позволяет устанавливать и изменять параметры процесса напыления в режиме реального времени. Блок управления позволяет в автоматическом режиме в процессе напыления менять состав горючей смеси, глубину загрузки порошка и длину ствола (посредством регулирующего модуля 9) по установленной программе, что обеспечивает получение покрытий с заданным законом изменения свойств по толщине. Для контроля скорости был использован модуль, использующий в качестве чувствительных элементов фоторезисторы (рис. 4).

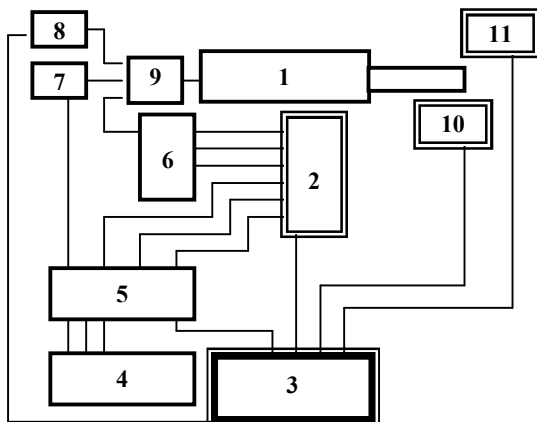


Рис. 3. Схема автоматизированного детонационного комплекса на базе УДК-III

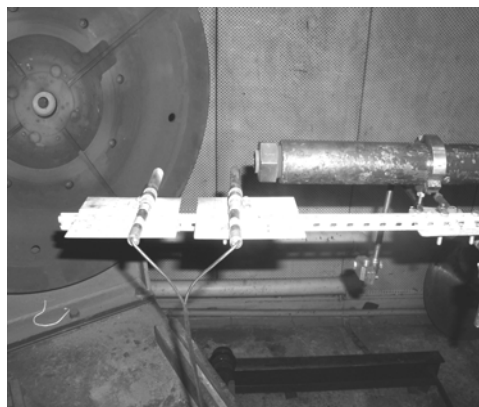


Рис. 4. Устройство для определения скорости частиц



Модуль работает по принципу последовательной регистрации фронта частиц и используется непосредственно при напылении изделий, предоставляя возможность оперативного контроля процесса напыления по параметру «скорость частиц».

Для контроля температуры частиц в процессе напыления покрытий разработан модуль, использующего в качестве чувствительного элемента фоторезистор марки СФЗ-1 и работающего по принципу яркостного пирометра (рис. 5).

Конструкция прибора даёт возможность также использовать его непосредственно при напылении изделий. Приспособления для крепления приборов позволяет регулировать их взаимное расположение, расстояние до оси ствола, угол наклона относительно оси ствола, расстояние до напыляемого изделия.

Для контроля работы системы прибор для измерения скорости частиц и прибор для контроля температуры объединены в единый измерительный комплекс, который предоставляет возможность оперативного контроля процесса напыления по параметрам «скорость частиц» и «температура частиц» (рис. 6).

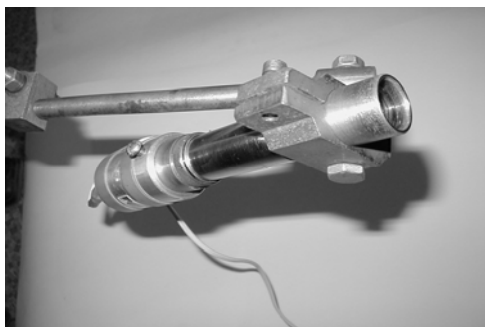


Рис. 5. Прибор для измерения температуры частиц



Рис. 6. Измерительный комплекс на работающей установке

### Заключение

Разработанный математический аппарат и созданное на его основе программное обеспечение позволяет осуществлять связь с представленными элементами контроля энергетических параметров процесса, управлять технологическими параметрами процессов напыления и обработки покры-

тий через исполнительные механизмы детонационного комплекса (или обрабатывающего оборудования) с целью получения заданного комплекса свойств поверхностных слоёв системы покрытие-подложка. Программное обеспечение позволяет при подключении модулей расчёта напряжённо-деформированного состояния поверхностных слоёв после лезвийной или абразивной обработки поверхности, осуществлять по измеряемым энергетическим параметрам процесса напыления корректировку режимов обработки с целью обеспечения заданного комплекса свойств композиции покрытие-подложка.

### Литература

1. Долматов А.И., Симоненко В.А., Прохоров Е.С. Математическое моделирование процесса детонационного напыления покрытий в машинно-ориентируемом производстве / // Тез. докл. 1 Всесоюзного совещания "Алгоритмическое обеспечение машинно-ориентируемого производства". – Х.: ХАИ, 1989. – С. 42.
2. Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнито-абразивной обработкой / Богуслаев В.О., Долматов А.И., Жеманюк П.Д. и др. – Запорожье: Дека, 1996. – 366 с.
3. Нигматулин Р.Н. Динамика многофазных сред. – М: Наука, 1987. – 464 с.
4. Долматов А.И., Маркович С.Е. Методика расчёта остаточных напряжений в детонационных покрытиях из тугоплавких материалов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Х.: НТУ"ХПІ", 2004. – Вип. 44. Технології в машинобудуванні. – С. 37-43.
5. Долматов А.И., Маркович С.Е., Мовшович А.Я. Расчёт значений и распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях изделий с детонационно-газовыми покрытиями // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С.40-45.
6. Сергеев С.В. Разработка технологии и оборудования для нанесения детонационных покрытий на детали авиационных двигателей и технологическую оснастку: Дис. канд. техн. наук: 05.07.04. – Х., 2001. – 209 с.

*Поступила в редакцию 10.06.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП "Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения", Харьков.