



УДК 621.793/.795: 004.942

**Г.И. Трифонов**  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
г. Воронеж, Россия  
E-mail: trifonov\_gi@mail.ru  
Дата поступления 24.10.2020

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

### Аннотация

На сегодняшний день существует ряд задач и проблемных областей, связанных с технологической подготовкой плазменного напыления и проектированием технических систем, решение которых наиболее актуально в производственных сферах. В данной работе проводились исследования последовательности процессов, происходящих при планировании технологии плазменного напыления. Производился анализ факторов плазменного напыления, влияющих на разработку системы автоматизированного проектирования (САПР). В ходе исследований разработаны: структурная схема САПР нанесения покрытий и структурная схема принятия решений при проектировании покрытий. Смоделированы этапы формирования САПР для плазменного напыления.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, система автоматизированного проектирования, покрытие, деталь, схема, этапы.

### Введение

На современных промышленных предприятиях, в частности на машиностроительных и авиастроительных заводах, на сегодняшний день весьма активно используются аддитивные методы восстановления деталей машин. Со стороны экономической целесообразности восстановление деталей обусловлено тем, что около половины механизмов, поступающие на ремонтные работы, могут быть использованы после восстановления при их себестоимости 15...30% цены от новых деталей. При этом стоит отметить, что лишь 5...9% деталей не подлежат восстановлению [1-3].

Одним из перспективных способов восстановления изношенных деталей является плазменное напыление (рисунок 1). Стоит отметить, что данный способ обладает возможностью варьирования материалами состава покрытий при их нанесении. Возможно использование металлов, керметов, керамики [2]. Все другие методы нанесения покрытий резко ограничивают выбор используемых материалов [3].

При контакте плазменной струи с поверхностью детали протекают различные физико-химические и теплофизические процессы. Одним из основополагающих параметров, характеризующих процесс плазменного напыления и качество получаемого покрытия, является температура нагрева поверхности восстанавливаемой детали. При этом необходимо учитывать, что нанесение множества слоев с контролируемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического прогнозирования. Из чего следует, что в областях методологического планирования при использовании плазменных технологий можно вынести конкретные проблемные вопросы, относящиеся к конкретной детали и её функциональному слою [4].

При планировании применения технологии плазменного напыления можно выделить технические проблемы, характеризующие конкретную деталь и её функциональный слой. В частности, появляется необходимость математического моделирования процессов плазменного напыления.

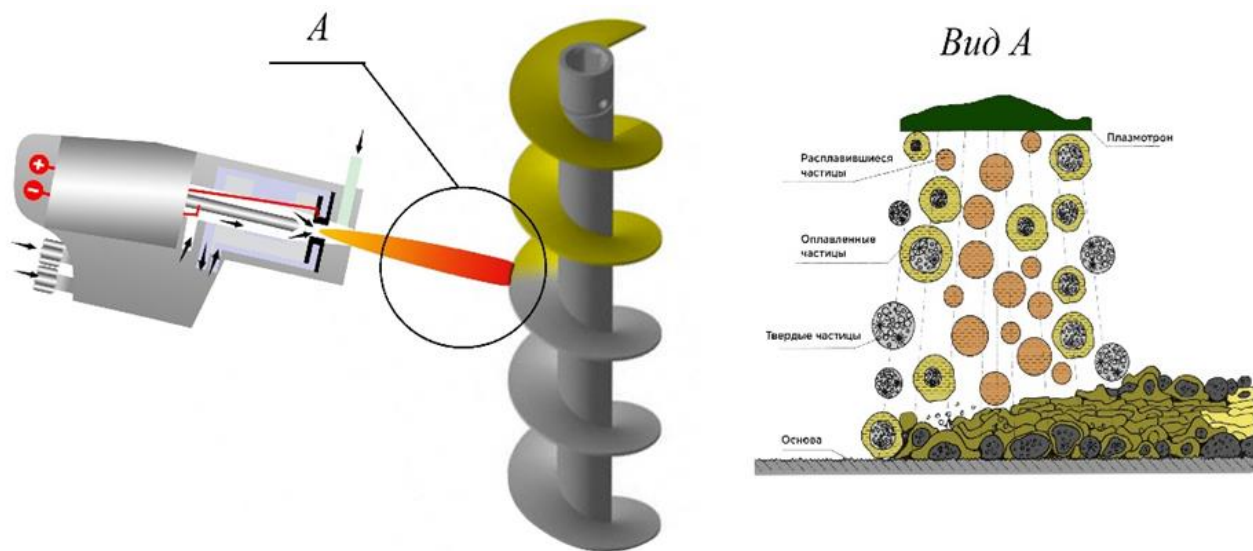


Рисунок 1. Процесс плазменного напыления

Цель данной работы является анализ факторов плазменного напыления, влияющих на создание системы автоматизированного проектирования, а также исследование и разработка основополагающих структурных схем САПР нанесения покрытий.

#### Актуальность

В настоящее время возможности вычислительных комплексов позволяют использовать математическое моделирование в качестве основного методологического подхода при решении технологических задач [5].

Учитывая степень развития области применения технологии плазменного напыления, на сегодняшний день существует ряд задач и проблемных областей, связанных с технологической подготовкой и проектированием технических систем, решение которых наиболее актуально в производственных сферах. Следовательно, подходя к решению проблемы автоматизации технологического процесса в виду совершенствования производственных систем и технологических процессов, необходимо комплексно подойти к планированию создания САПР плазменного напыления.

Однако, при разработке САПР для плазменного напыления, невозможно охватить все критерий и задачи, которые, как правило, входят в набор функциональных возможностей, существующих САПР, поскольку данный газотермический процесс

весьма сложен и обладает множеством факторов и особенностей, которые не представляется возможным в полной мере учесть при автоматизированном проектировании.

#### Исследования

Анализируя особенности процесса плазменного напыления [6], выделим основные факторы, которые напрямую влияют на разработку системы автоматизированного проектирования нанесения функциональных покрытий, и делающие процесс планирования использования САПР в данной отрасли весьма затруднительным:

1) Технологическая карта маршрута технологического процесса, как показывает практика [7], весьма детерминирована. Но при этом технологический процесс, в зависимости от предъявляемых требований к функциональному покрытию, может либо сокращаться, либо расширяться. Например, добавление или сокращение проходов инструмента (плазмотрона), введение дополнительных технологических операций по обработке поверхности детали и т.д.

2) При использовании технологии плазменного напыления, как правило, необходима ювенильная поверхность для обработки детали, и выдержка строго отведенного времени для каждой из основных и дополнительных технологических операций. Вследствие данных требований для каж-

дого отдельного случая необходимо учитывать в САПР специальное межоперационное оборудование для транспортировки деталей (манипуляторы, автоматизированные конвейеры и т.д.).

3) Необходимо учитывать, что при плазменном напылении обрабатываемая поверхность детали в большинстве случаев подвергается предварительной обработке, поскольку специфика процесса напыления требует точную оценку поверхности детали для целесообразности проведения процесса восстановления.

4) Проведение предварительных технологических операций по подготовке детали к напылению, а также постоперационные операции по обработке детали сопряжены с использованием специального оборудования, которое не всегда учитывают при планировании автоматизации процесса. Поэтому актуален вопрос о рациональности объединения оборудования в специальные автоматизированные линии для восстановления деталей машин с помощью плазменного напыления [8]. При этом необходимо скоординировать данную автоматизированную линию с другими службами производства.

5) Напыление множества слоев с контролируемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического прогноза и проектирования на основе кинематических режимов процесса. Следовательно, необходимы различные средства реализации уточненных кинематических режимов плазменного напыления, что в свою очередь увеличит количество задач по технологической подготовке процесса и проектирования систем реализации процесса. Примеры разнородности видов поверхности детали приведены на рисунке 2.

6) Для анализа плазменного напыления и деталей с нанесенным слоем функционального покрытия необходима лаборатория по подготовке материала покрытия (как правило, это порошковый композитный материал), лаборатория анализа нанесенного покрытия (определение когезии, адгезии, остаточных напряжений и т.д.), лаборатория с оборудованием для испытаний покрытия и т.д.

7) Составление баз данных: по возможным материалам покрытия; их всевозможных комбинаций, учитывая температурные диапазоны и химические взаимодействия; по материалам подложки и их взаимодействия с материалами наносимого покрытия; кинематических режимов напыления и т.д.

Учитывая вышеперечисленные факторы и особенности, влияющие на разработку системы автоматизированного проектирования, разработка САПР должна быть направлена на создание комплекса модулей автоматизированных процессов. Данный вывод обусловлен тем, что на современном этапе развития производственных линий необходимо уходить от вредных условий работы, а также повышать качество получаемых покрытий за счет автоматизации процессов обработки детали.

### **Результаты и их обсуждение**

Основная задача САПР в ремонтных и восстановительных цехах производства при планировании технологии плазменного напыления заключается в: повышении производительности; повышении уровня автоматизации всего производства; повышении уровня интеллектуальной деятельности инженеров-технологов и инженеров-конструкторов и т.д. Решение поставленной задачи обеспечивает поиск новых технологических и конструкторских решений, направленных на повышение качества покрытий, а также на уменьшение времени обработки и стоимости всех технологических процессов.

В связи с этим выделяют следующие этапы автоматизированного проектирования технологии производства деталей машин с функциональными покрытиями

- 1) анализ технического задания (ТЗ);
- 2) поиск аналогов и прототипов, а также готовых решений;
- 3) выбор материалов покрытия в зависимости от заявленной стоимости работ и функциональности заявленного покрытия.

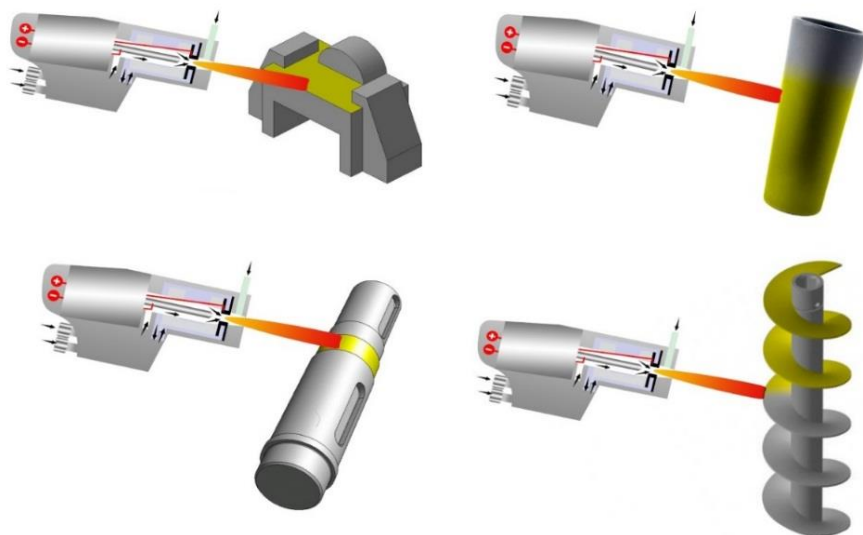


Рисунок 2. Напыление типовых поверхностей деталей машин

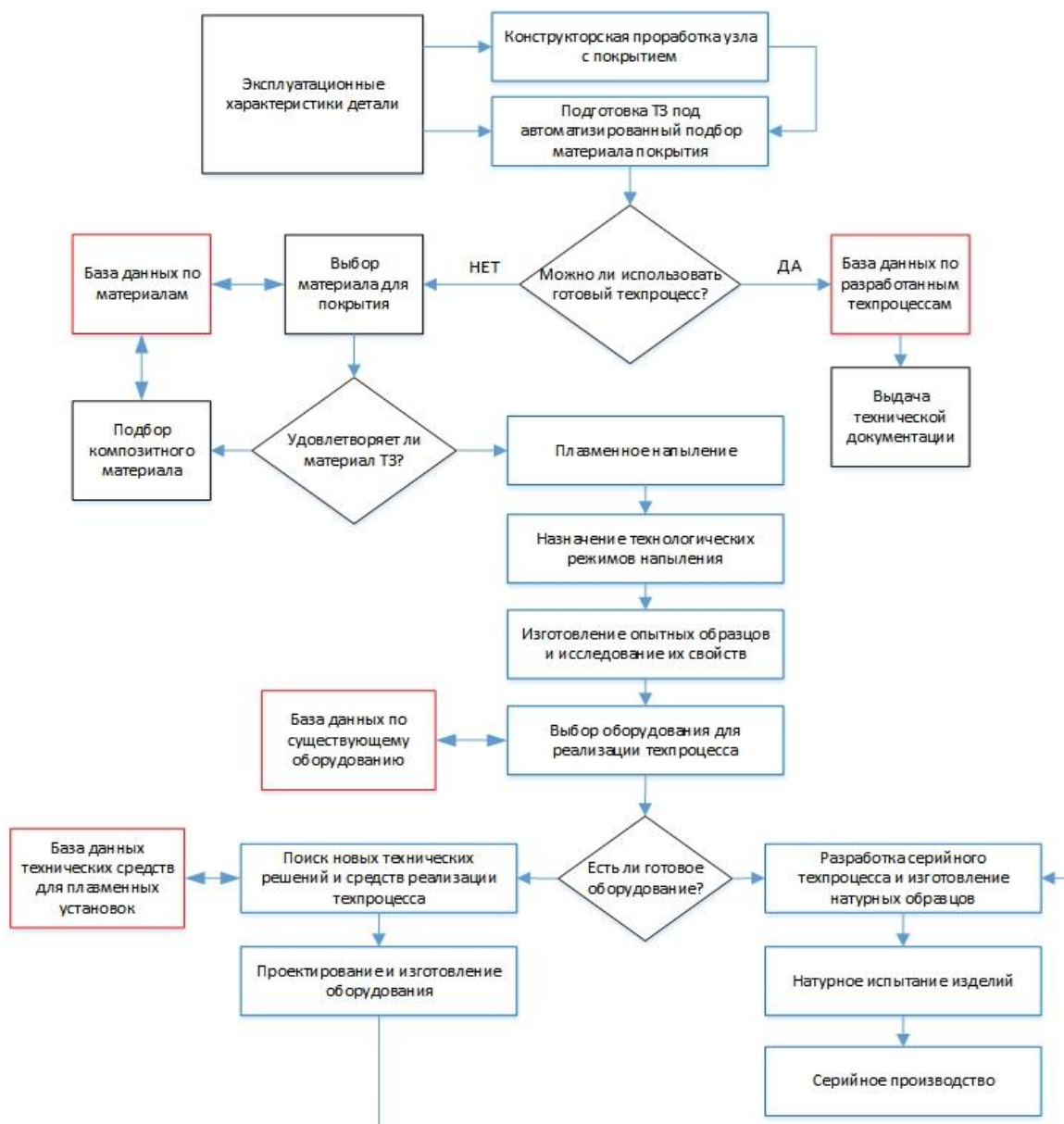


Рисунок 3. Структурная схема САПР для плазменного напыления

На этапе функционального проектирования процесса плазменного напыления производятся следующие работы: подбор материала покрытия (если свойства материала не удовлетворяет заявленным параметрам в ТЗ, то создается новый композитный материал с заданными свойствами) [9], подбор режимов напыления, техническая и технологическая подготовка производства, а также подбор специального оборудования.

Стоит отметить, что при невозможности осуществить необходимый технологический процесс на существующем оборудовании – производится проектирование и разработка новых установок или технологических решений.

Опираясь на проведенный анализ технологии плазменного напыления и факторов, влияющих на её обеспечение, была разработана структурная схема САПР плазменного напыления (рисунок 3).

Стоит отметить, что указанные базы данных, разработанные при проектировании структурной схемы САПР плазменного напыления, находятся под автоматизированным управлением системы управления (рисунок 4).

Беря во внимание разработанную структурную схему САПР для плазменного напыления, в общем виде процесс плазменного напыления (подготовительные операции и проектирование автоматизированных систем) можно разделить на три этапа.

*Первый этап.*

проводятся общие мероприятия по подготовке процесса плазменного напыления;

проводится отбор деталей, для которых будет производиться процесс напыления;

определяются режимы и параметры напыления;

анализируются и назначаются параметры покрытия;

производится оценка технологичности напыления детали;

формируется маршрутная карта (технологический процесс обработки детали), а также проводится оценка загруженности оборудования, которое будет задействовано в данном процессе.

*Второй этап.*

Производится выбор детали-представителя, в которой наиболее близко учтены конструктивно-технологические особенности деталей, заявленных в ТЗ. На данном этапе производится оценка технологичности детали.

*Третий этап.*

Формируется модель гибкой автоматизированной системы (ГАС) и моделирование процесса напыления. Результатом данного этапа является опытный образец ГАС.

Приведенные этапы и рассмотренные задачи в полной мере можно использовать как основу для создания САПР плазменного напыления. Однако на данный момент в современных цехах РФ приведенные задачи, связанные с проектированием деталей с покрытиями созданием полноценной САПР, формализованы не в полной мере [6, 10].



Рисунок 4. Структурная схема управления базами данных

## Выводы

Произведен анализ основных факторов, влияющих на разработку САПР плазменного напыления. Составлены обобщённые структурные схемы САПР нанесения покрытий. Разработаны три этапа по формированию САПР для плазменного напыления.

## Библиографический список

1. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск. Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И., Комар В.И. К.: Тэхника, 1990. 109 с.
3. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Минск: Беларусь. Навука, 2011. 357 с.
4. Трифонов Г.И. Исследование зависимости теплофизических и физико-механических параметров плазменного напыления от скорости перемещения плазматрона // Журнал «Механическое оборудование металлургических заводов». 2019. №1(12). С. 76–81.
5. Оценка физико-механических параметров покрытий плазменного напыления после восстановления детали трения авиационной промышленности / С.Ю.

- Жачкин, Г.И. Трифонов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. Вып. 11. С. 77–84.
6. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпози́тов». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
  7. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования / Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Корнеев В.М. [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2017. 346 с.
  8. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Краснова М.Н. Автоматизация расчетных модулей для оценки параметров плазменного напыления // Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса. Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». 2018. Вып. 19. С. 34–40.
  9. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Трегубчак П.В. Плазменное напыление износостойких покрытий // В мире научных открытий. 2010. № 2–3. С. 100–102.
  10. Притыкин Ф.Н., Шмуленкова Е.А. Основные элементы САПР металлорезающих инструментов при использовании параметрического 3D моделирования // Омский Научный вестник. 2012. № 1 (107). С. 277-283.

---

### *Information about the paper in English*

**G.I. Trifonov**

Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy Military  
Educational and Scientific Center of Air Force  
Voronezh, Russia

E-mail: trifonov\_gi@mail.ru

Received 24.10.2020

---

## DEVELOPMENT OF THE COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM FOR APPLYING FUNCTIONAL COATINGS

### Abstract

There are current objectives and difficulties related to a technological preparation of plasma spraying and design of technical systems to be the most relevant in industrial areas. This paper presents research on the sequence of processes occurred, when planning a plasma spraying process. The author analyzed plasma spraying factors influencing the development of the computer-aided design (CAD) system. The research resulted in developing a structural diagram of the CAD system for applying coatings and a structural diagram of making decisions, when designing coatings. The author simulated the stages of developing the CAD system for plasma spraying.

**Keywords:** plasma spraying, computer-aided design system, coating, part, diagram, stages.

---