

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ НА МАКРООБЪЕКТЫ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

ТИМОФЕЕВ А. В., ДЕРИН О. А.

---

УДК 528.8

*Тимофеев А.В., Дерин О.А. Автоматизация и оптимизация процессов нанесения нанопокровтий на макрообъекты сложной формы.*

**Аннотация.** Рассматриваются задачи и автоматизированная технология нанесения нанопокровтий на изделия сложной формы с помощью адаптивных робототехнических комплексов, обеспечивающих поддержание требуемых параметров факела с целью достижения наперед заданных характеристик на сложных деталях выпуклой или невыпуклой формы. Предлагаемые адаптивные робототехнические системы позволяют наносить нанопокровтия на детали сложной формы без ввода чертежей детали и ее точной юстировки на стенде в условиях помех и при наличии препятствий в рабочей зоне.

**Ключевые слова:** нанотехнологии, нанесение покровтий, робототехника.

*Timofeev A.V., Derin O.A. Method of optimizing the application of nano-coating to macro-objects of complex shape.*

Abstract. There is a description of the problem and automated technology for coating articles of complex shape with the help of adaptive robotic systems that ensure the maintenance of defined parameters in order to reach the plasmotron torch necessary characteristics on the complex details of a convex or nonconvex shape. The proposed adaptive robotic systems can be applied Nanotechnology Surface Sealing on parts of complex shape without having to enter drawings and details of its precise alignment on the stand in terms of interference and the presence of obstacles.

Keywords: nanotechnology, coating, robotics.

---

**1. Введение.** В настоящее время актуальна задача практического применения нанотехнологий для разработки новых конструкционных материалов в различных областях техники. Одной из важнейших областей применения наноматериалов является нанесение нанопокровтий на поверхность различных деталей, имеющих макроразмеры.

Основными способами нанесения нанопокровтий является горячее и холодное напыление с помощью плазмотронов или струйных аппаратов соответственно. Однако требования к технологическому режиму такого напыления крайне осложняются малым размером напыляемых наночастиц, которые не должны слипаться друг с другом при нагреве (теряя при этом свои нанохарактеристики) и в тоже время иметь должную скорость и траекторию полета перед соударением с поверхностью детали-мишени для обеспечения достаточной адгезии.

Математическое моделирование потока наночастиц в газовой среде и проведение практических экспериментов по напылению, прове-

денное ЦНИИ КМ «Прометей», показало не вполне удовлетворительное качество такого традиционного подхода из-за невозможности учета взаимного трения частиц в факеле плазмотрона. Кроме того, практические используемые детали часто имеют сложную выпуклую и невыпуклую форму, выступы и т. п., которые искажают форму факела и ухудшают качество наносимого нанопокрyтия.

**2. Структура и принцип действия адаптивного робототехнического комплекса нанесения нанопокрyтий.** Сегодня представляется актуальным решение поставленной задачи автоматизации и оптимизации нанесения покрyтий на изделия сложной формы с помощью адаптивных робототехнических комплексов, обеспечивающих поддержание требуемых параметров факела с целью достижения наперед заданных нанохарактеристик на поверхностях сложных деталей выпуклой или невыпуклой формы.

Достоинством предлагаемых адаптивных робототехнических систем является тот факт, что они позволяют наносить нанопокрyтия на детали сложной формы без ввода чертежей детали и ее точной юстировки на стенде в условиях реальных помех и при наличии препятствий в рабочей зоне [1, 2].

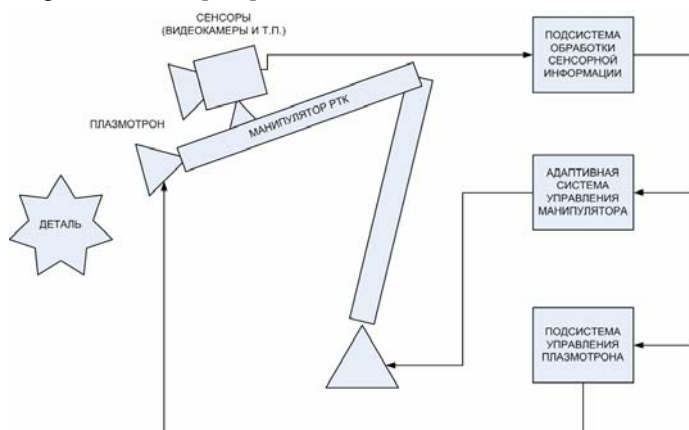


Рис. 1. Адаптивная роботизированная система в режиме микроплазменного нанесения нанопокрyтий.

Архитектура адаптивного робототехнического комплекса для автоматизированной обработки материалов и нанесения нанопокрyтий представлена на рис.1.

Адаптивный робототехнический комплекс состоит из следующих элементов:

- 1) манипулятора с шестью степенями свободы  $\epsilon$  и адаптивной системой управления;
- 2) плазмотрона (или сопла холодного напыления) с локальной подсистемой управления;
- 3) сенсоров (видеокамеры и сенсора ультрафиолетового излучения или портативного болометра для холодного напыления);
- 4) подсистемы обработки сенсорной информации.

По командам адаптивной системы управления манипулятор приближает плазмотрон к детали, после чего факел плазмотрона (или струя сопла) переносит на поверхность детали гранулы с наночастицами. На основании данных о форме и положении детали, параметрах факела и т. п., получаемых от мультиспектральных сенсоров — видеокамер и ультрафиолетового (УФ) датчика, адаптивная система управления регулирует движения манипулятора и режим работы плазмотрона с целью получения нанопокртытия с наперед заданными (или оптимальными) свойствами [3].

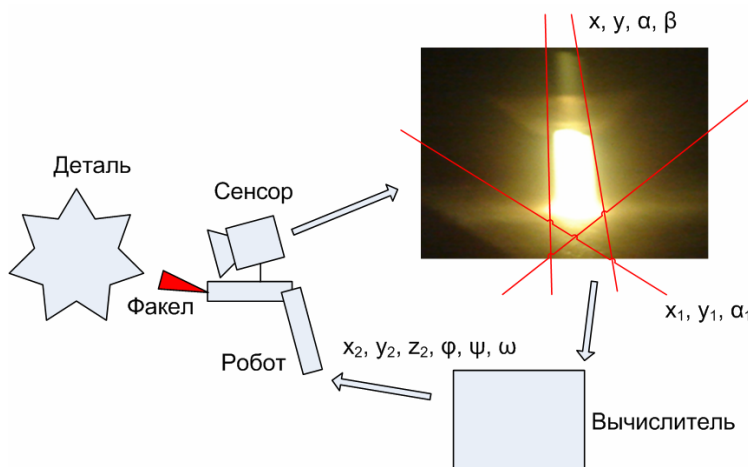


Рис. 2. Изображение факела в инфракрасном диапазоне в робототехнической среде.

При наноплазменном напылении изображение факела в инфракрасном диапазоне, деформированного в результате воздействия мишени (участка детали, куда производится напыление), поступает с видеокамеры в адаптивную систему обработки сенсорной информации и

управления движением манипулятора, которая производит его гистограммное растяжение и градиентную обработку, выделяя границы факела [4]. Выделенные границы факела аппроксимируются двумя парами линий (рис. 2), первая из которых формирует конус истечения факела с параметрами  $x, y$  (координаты основания конуса),  $\alpha$  (угол раствора конуса) и  $\beta$  (угол поворота конуса), а вторая линия задает конус соударения с параметрами  $x_1, y_1, \alpha_1, \beta_1$ , расшифровываемым аналогично. На основании восьми параметров  $(x, y, \alpha, \beta, x_1, y_1, \alpha_1, \beta_1)$  и данных датчика УФ-излучения корректируются шесть пространственных координат схвата манипулятора (положение  $x_2, y_2, z_2$  и углы  $\phi, \psi, \omega$ ), определяющие положение плазмотрона в пространстве, а также корректируется режим работы плазмотрона.

Для вычисления трехмерного рельефа обрабатываемой детали сложной или неизвестной формы используется оригинальная система трехмерного зрения на основе единственной телекамеры. В этой системе стереобазой служит пройденное сенсором робота расстояние, т. е. изменение координат положения схвата манипулятора (положение  $x_2, y_2, z_2$ ) с учетом изменения углов  $\phi, \psi, \omega$ . Поэтому стереобаза является динамической и может изменяться путем коррекции скорости движения телекамеры.

Для обеспечения единообразия сегментации наблюдаемых сенсором сцен (которые могут иметь не один вариант сегментации) целесообразно разделить сегментации последовательных изображений с видеокамеры на опорные, выполняющие сегментацию очередного изображения «с нуля», не опираясь на результаты предыдущих вычислений, и промежуточные сегментации, корректирующие результаты предыдущих вычислений. Сегментация выполняется с помощью двух алгоритмов:

- алгоритма для опорной сегментации (кластеризация по  $K$ -среднему);
- алгоритма конкурентного обучения нейронной сети для промежуточной кластеризации [2, 3].

В момент начала работы алгоритм кластеризации по  $K$ -среднему определяет количество  $K$  и центры кластеров по двумерному изображению опорного кадра. Затем по элементам этих кластеров определяются яркие и цветные характеристики каждого кластера. На ос-

новании полученных характеристик настраиваются параметры иерархической нейросети для промежуточной кластеризации (НСПК) [5–7], оценивающей близость пикселя каждому из кластеров по координате, яркости и цветности.

При обработке следующего (промежуточного) кадра каждый пиксель анализируется НСПК. В результате пиксель считается принадлежащим «победившему» в конкурентной борьбе кластеру. По окончании обработки кадра промежуточной кластеризации происходит коррекция параметров НСПК, а именно: корректируются координаты центра, размеры, яркость и цветность пикселей каждого кластера. При резком изменении этих параметров или после выполнении максимального числа промежуточных сегментаций система переходит к очередной опорной сегментации [6–7].

Удерживая параметры факела в заданных границах, удастся производить напыление наноматериалов на невыпуклые детали с выступами с приемлемым (или наперед заданным) качеством.

**3. Научный задел и практические результаты.** Авторы имеют научный задел и опыт практического проектирования адаптивных робототехнических комплексов на технологической базе ЦНИИ КМ «Прометей». В качестве примера приведем архитектуру адаптивного робототехнического комплекса (РТК) лазерной обработки материалов (плакирование) с совмещенной (встроенной) оптикой (рис. 3).

**4. Заключение.** На основе научного задела и практического опыта разработки адаптивных РТК для лазерной обработки (планирования) конструктивных материалов и для создания деталей из порошков на технологической базе ЦНИИ КМ «Прометей» предложена архитектура адаптивного РТК нанесения наноматериалов и детали сложной формы с помощью плазмотрона.

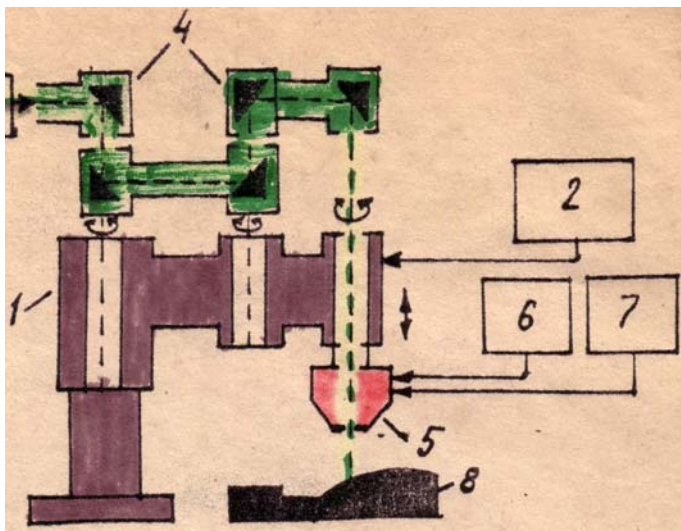


Рис. 3. Адаптивный РТК лазерной обработки (плакирования). конструкционных материалов.

1 — робот типа «Скара», 2 — система адаптивного управления, 3 — лазерный луч, 4 — лучепровод с телескопическими шарнирами, 5 — лазерная головка, 6 и 7 — система подачи порошка, 8 — обрабатываемая деталь.

Разработана мультисенсорная система для этого РТК и исследована информационная технология обработки подвижных изображений регулируемого факела плазмотрона, обеспечивающего нанесение наноматериалов на детали сложной формы с приемлемым или наперед заданным качеством.

### Литература

1. Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы. Л.: Машиностроение, 1988. 332 с.
2. Тимофеев А. В., Дерин О. А. Анализ сложных мультиизображений в режиме реального времени // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. № 10. С. 25–30.
3. Тимофеев А. В., Дерин О. А. Распознавание сложных стерео- и мультиизображений в реальном времени // Intern. Book Series “Information Science & Computing”, N 5. Supplement to the Intern. J. “Information Technologies & Knowledge”. Institute of Information Theories and Applications FOI THEA, Sofia. 2008. Vol. 2. P. 149–152.
4. Timofeev A. V., Andreev V. A., Gulenko I. E., Derin O. A. et al. Design and implementation of multi-agent man-machine interface on the base of virtual reality models // Proc. of 9th intern. Conf. “Speech and Computer”, September, 20–22, 2004. St. Petersburg, Russia. P. 670–675.

Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 10. ISBN 2078-9181 (печ.), ISSN 2078-9599 (онлайн)  
SPIIRAS Proceedings. 2009. Issue 10. ISBN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)

5. Тимофеев А.В., Дерин О.А. Трехмерный сенсор на основе стереозрения и лазерного дальномера // Гироскопия и навигация. 2008. № 63. С. 98.
6. Timofeev A. V. Parallel Structures and Self-Organization of Heterogeneous Polynomial Neural Networks for Pattern Recognition and Diagnostics of States // Pattern Recognition and Image Analysis. 2007. Vol. 17, N 1. P. 163–169.

**Тимофеев Адиль Васильевич** — д-р техн. наук, проф., Заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией информационных технологий в управлении и робототехнике Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: теория оптимального, робастного, адаптивного, интеллектуального и нейронного управления роботами, мехатронными и аэрокосмическими системами; модели виртуальной реальности и оптимизация баз знаний; теория полиномиальных и гетерогенных нейронных сетей с самоорганизующейся архитектурой; методы синтеза многозначных решающих правил минимальной сложности для распознавания образов; модели генетического кода и генно-нейронных сетей; мультиагентные системы и технологии навигации, управления и интеллектуального анализа потоков информации в робототехнических, компьютерных, телекоммуникационных и GRID-сетях. Число научных публикаций — 540. [tav@iias.spb.su](mailto:tav@iias.spb.su), <http://www.spiiras.nw.ru/files/litur/index.html>; СПИИРАН, 14-я линия, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0421, факс +7(812)328-4450.

**Timofeev Adil Vasilievich** — Dr.Sc., Prof., Honor Scientist of RF, the Head of the Laboratory for Information Technologies in Control and Robotics of Institution of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS (SPIIRAS). Research interests: theory of optimal, robust, adaptive, intelligent and neural control for robots, mechatronic and aerospace systems; virtual reality models and knowledge base optimization; theory for polynomial and heterogeneous neural networks with self-organizing architecture; methods for synthesis of multi-value decision rules of minimal complexity for pattern recognition; models of genetic code and gene-neural networks; multi-agent systems and technologies for navigation, control and intelligent analysis for information flows in robotic, computer, telecommunication and GRID-networks. The number of publications — 570. [tav@iias.spb.su](mailto:tav@iias.spb.su) <http://www.spiiras.nw.ru/files/litur/index.html>; SPIIRAS, 39, 14th Line V.O., Saint-Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0421, fax +7(812)328-4450.

**Дерин Олег Александрович** — научный сотрудник лаборатории информационных технологий в управлении и робототехнике Учреждения Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Область научных интересов: нейросетевые технологии обработки сигналов и изображений, сенсорика и адаптация. Число научных публикаций — 12. [derinoa@mail.ru](mailto:derinoa@mail.ru); СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0421, факс +7(812)328-4450.

**Derin Oleg Alexandrovich** — researcher, Laboratory for Information Technologies in Control and Robotics of, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: artificial neuronet technology of image recognition. The number of publications — 12. [derinoa@mail.ru](mailto:derinoa@mail.ru); SPIIRAS, 39, 14th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0421, fax +7(812)328-4450.

**Поддержка исследований.** Работы по данной тематике выполнялись в рамках серии НИР:

1. НИР-841/201-87. «Разработка и исследование алгоритмического обеспечения для адаптивных РТК лазерной обработки». Гос. рег. № 841/201-87.

2. НИР-935/599-89. «Разработка и исследование средств очувствления, адаптации, программирования и управления РТК лазерной обработки». Гос.рег. № 935/599-89.

3. Работа выполнена при частичной поддержке Программы № 1 Президиума РАН и грантов РФФИ № 08-08-12183-офи и № 09-08-00767-а.

Рекомендовано СПИИРАН, директор Р.М. Юсупов, чл.-корр РАН.

Статья поступила в редакцию 14.12.2009.



## РЕФЕРАТ

*Тимофеев А.В., Дерин О.А.* **Автоматизация и оптимизация процессов нанесения нанопокровтий на макрообъекты сложной формы.**

Для автоматического нанесения нанопокровтий на поверхность различных деталей сложной формы с помощью адаптивных робототехнических комплексов рассматривается задача построения системы управления манипулятором, обеспечивающая поддержание требуемых оптимальных параметров факела. Для вычисления трехмерного рельефа обрабатываемой детали используется оригинальная система трехмерного зрения на основе единственной телекамеры, в которой стереобазой является пройденное манипулятором расстояние, а сегментации последовательных изображений телекамеры разделены на опорные, выполняющие сегментацию очередного изображения «с нуля», без учета результатов предыдущих вычислений, и промежуточные, в которых корректируются результаты предыдущих вычислений. Такие системы управления позволяют наносить нанопокровтия на детали сложной формы без ввода чертежей детали и ее точной юстировки на стенде в условиях помех и при наличии препятствий в рабочей зоне.

## SUMMARY

*Timofeev A.V., Derin O.A.* **Method of optimizing the application of nano-coating to macro-objects of complex shape.**

Research the problem of constructing the manipulator control system for automatic coating articles of complex shape by using of adaptive robotic systems, ensuring the maintenance of the required optimal parameters of a torch. To calculate the three-dimensional relief of the workpiece using an original system of three-dimensional view based on a single camera, in which the stereo-base is the distance traveled by the manipulator, and the segmentation of the successive camera images are divided into basing, performing segmentation of the next image from scratch, without relying on the results of previous calculations, and intermediating, calculate the differences to previous segmentation. The proposed adaptive robotic systems can be applied Nanotechnology Surface Sealing on parts of complex shape without having to enter drawings and details of its precise alignment on the stand in terms of interference and the presence of obstacles.