

УДК 621.01

## СИНТЕЗ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Ольга Евгеньевна Митряева<sup>1</sup>, Марина Анатольевна Печейкина<sup>1</sup>,  
Дмитрий Леонидович Раков<sup>2</sup>, Рафаэль Юрьевич Сухоруков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

[rdl@mail.ru](mailto:rdl@mail.ru)

**Аннотация.** В работе рассматривается методика синтеза технологических процессов для микродугового оксидирования - нанесения износостойких покрытий на вентильные металлы и сплавы. Для синтеза технологических решений используется морфологический подход. Основной целью применения подхода является расширение множества вариантов, кластеризация и эффективный выбор для синтеза решений с целью увеличения уровня обоснованности.

**Ключевые слова:** инновационные технологические процессы, микродуговое оксидирование, силовая электроника, морфологический подход.

## SYNTHESIS OF INNOVATIVE TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MICROARC OXIDATION

O.E. Mitryaeva<sup>1</sup>, M.A. Pecheikina<sup>1</sup>, D.L. Rakov<sup>2</sup>, R.Yu. Sukhorukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National research University "MEI", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

[rdl@mail.ru](mailto:rdl@mail.ru)

**Abstract.** The paper considers the method of synthesis of technological processes for microarc oxidation-the application of wear-resistant coatings on valve metals and alloys. The morphological approach is used for the synthesis of technological solutions. The main goal of the approach is to expand the set of variants, clusterization and effective choice for the synthesis of solutions in order to increase the level of validity.

**Keywords:** innovative technological processes, microarc oxidation, power electronics, morphological approach.

**Введение.** При заданных ресурсах эффективность создаваемых технологических систем (ТС) определяется прогрессивностью нововведений, которые закладываются на стадии синтеза технологических решений (ТР).

Синтез и обоснование параметров ТС в основном осуществляется на этапах технического предложения и эскизного проекта. Согласно [1], в перечень работ выполненных на стадии технического предложения, в том числе, входят:

- выявление вариантов возможных ТР и их проработка. Глубина такой проработки должна быть достаточной для сравнительной оценки рассматриваемых ТР;
- проверка вариантов на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформление заявок на изобретения;
- сравнительная оценка рассматриваемых вариантов. Сравнение проводится по показателям качества изделия.

Общепринятых правил по описанию ТС не существует, они являются следствием общей модели исследования. Предметом поиска является достижение некоторых компромиссных уровней для ряда противоречивых критериев. Последовательность вычислительных операций для нахождения оптимума в алгоритме проектного расчета отображается целевой функцией. Эта функция не соответствует основным требованиям теоретических методов оптимизации, так как она разрывна; не всегда может быть определена; существует в операторной записи; не базируется на аналитических выражениях; не дифференцируема; не унимодальная; не сепарабельна и не аддитивна. Особенностью является также то, что невозможно аналитически моделировать гиперповерхность целевых функций и прогнозировать их изменение на шаге приращения переменных [2].

**Морфологический подход для синтеза технологических решений.** Для синтеза и оценки ТР может быть эффективно использован морфологический подход [3-7], который заключается в построении морфологической таблицы, заполнении ее возможными альтернативными вариантами и в выборе из всего множества комбинаций наилучших решений. Необходимо генерировать морфологическое множество решений - описание потенциально возможных решений данной задачи

Морфологический подход, идея которого возникла еще в средние века, базируется на комбинаторном принципе поиска решений. Специальная процедура систематического комбинирования понятий (терминов) была введена Р.Луллием (1234-1315). "Логическая машина" Луллия позволяла получать путем комбинирования исходных понятий более сложные понятия и суждения. Датой рождения современного морфологического подхода можно считать 1942 г. Это дата выхода в свет первой работы швейцарского астрофизика Ф.Цвикки по морфологическому анализу реактивных двигателей с описанием его метода "морфологического ящика" и построению морфологических матриц (ММ) [8].

В настоящее время наиболее широко применяется морфологический подход в Германии. Общество немецких инженеров разработало два набора правил для инженеров VDI 2221 "Методы создания и конструирования ТС и продуктов" и VDI 2222 «Методы конструирования: методическое развитие технических принципов», в которых рекомендуется использование морфологических подходов для поиска новых ТР [9,10].

**Использование морфологического подхода для синтеза технологий микродугового оксидирования.** Суть метода микродугового оксидирования (МДО) заключается в формировании на поверхности детали в условиях воздействия микродуговых разрядов высокопрочного износостойкого покрытия, состоящего преимущественно из  $Al_2O_3$  и других окислов алюминия [11,12]. Сложность протекающих физико-химических процессов обуславливает рассмотрение различных вариантов реализации установок и технологических процессов МДО. Для выбора ТР необходимо решить задачу структурного синтеза. В объекте

выделяются основные признаки, характеризующие его работоспособность. Для каждого признака выбирают альтернативы, т. е. возможные варианты его исполнения или реализации. После декомпозиции и анализа исследуемых ТС формируется ММ и задается морфологическое множество решений. Для признаков технических решений содержащихся в ММ составляются таблицы критериев и определяются коэффициенты относительной важности критериев. Каждой из альтернатив сопоставляются оценки по всему спектру критериев. В дальнейшем проводят отбор вариантов с последующей их кластеризацией. Область исследования далее сужается к нескольким кластерам, которые в дальнейшем исследуются.

Для уменьшения размерности ММ вводились критерии, по которым проводилась оценка. Каждый критерий получал весовую оценку [13,14]. В ММ были также занесены двенадцать опорных вариантов ТР. В дальнейшем каждой альтернативе проставлялись балльные оценки по каждому критерию. Были сгенерированы 1648 вариантов и отобрано 256 для дальнейшей кластеризации (рис. 1). Все варианты были рассчитаны на меру сходства.



**Рис.1.** Генерация и отбор вариантов (экранный формат)

Из 256 сгенерированных и отобранных вариантов были сформированы 9 кластеров, содержащих сходные технические решения. Специфической особенностью опорных вариантов и большинства вариантов выбранного кластера является управление протекающими технологическими процессами при помощи биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT - Insulated-Gate Bipolar Transistor), что ведет к расширению возможности управления и контроля. Данные варианты отличаются от других опорных вариантов – изобретений более высокими характеристиками (рис.2).

В итоге было выбрано ТР, которое характеризуется широкими возможностями управления процессами в частности, на первоначальном этапе реализуется только анодный режим, который позволяет быстро нарастить керамическое покрытие, в дальнейшем осуществляется анодно-катодный режим нанесения с частотным регулированием при помощи IGBT транзисторов, управляемых микроконтроллером. Устройство позволяет проводить управление технологическими процессами в широких пределах. Для выбранного ТР создана экспериментальная установка МДО (рис.3) с широкими возможностями регулирования процессов. При помощи установки получены износостойкие керамические покрытия.

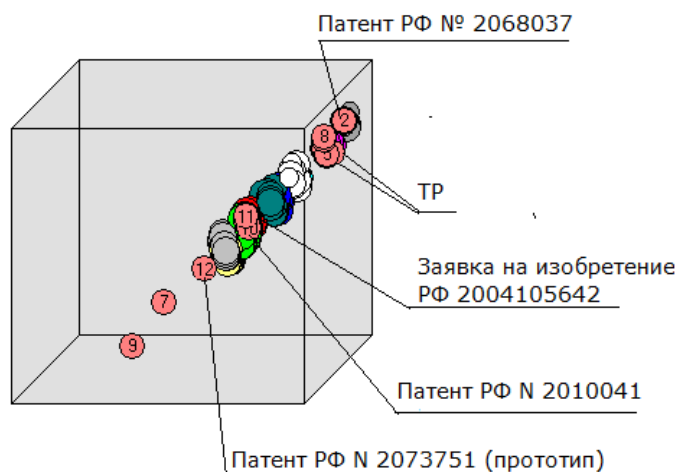


Рис. 2. Расположение опорных ТР в морфологическом поле решений

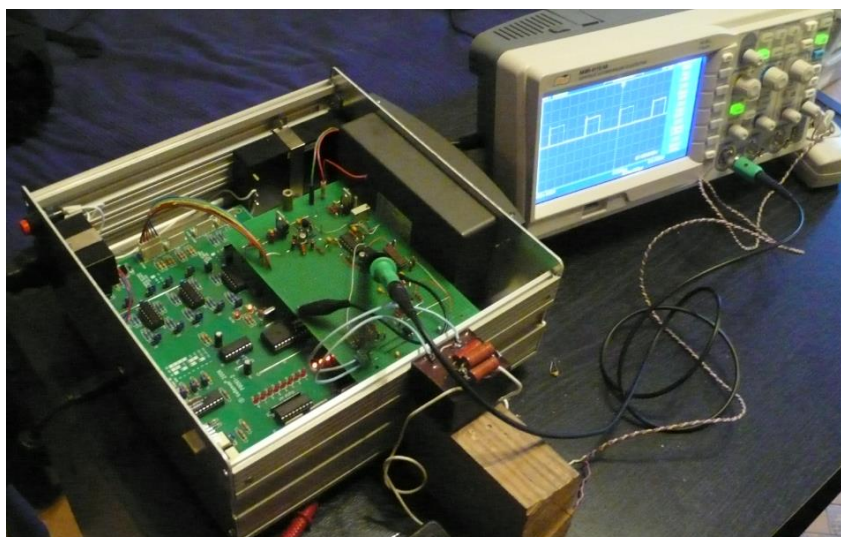


Рис. 3. Экспериментальная установка МДО

Предложенный подход позволяет структурировать задачу, повысить степень обоснованности принимаемого решения и расширить количество вариантов ТР МДО, среди которых производится выбор, что дает в результате возможность повысить качество (технический уровень) разрабатываемых систем. Использование схемного ТР с IGBT-модулями и импульсное регулирование напряжением позволяет существенно сократить количество потребляемого электричества процесса МДО и увеличить надежность системы в целом.

**Выводы.** Основной целью применения подхода является расширение ряда потенциальных вариантов, кластеризация и эффективный выбор для синтеза пространства решений с целью увеличения уровня обоснованности инновационных технологий.

Морфологический подход позволяет структурировать задачу, повысить степень обоснованности принимаемого решения и расширить количество вариантов, среди которых

производится выбор, что дает в результате возможность повысить качество разрабатываемых ТС.

Предлагаемый подход обеспечивает поиск инновационных ТР, генерирует множество рациональных вариантов и осуществляет выбор и оценку ТР для последующего моделирования.

### Список литературы

1. ГОСТ 2.118-73 (1995) ЕСКД. / Техническое предложение. Дата введения 1974-01-01. Утвержден Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 февраля 1973 г. № 500, Переиздание (март 1995 г.) с Изменениями № 1, 2, 3, 4, утвержденными в августе 1981 г., ноябре 1982 г., сентябре 1985 г., в январе 1987 г. (ИУС № 10-81, 2-83, 12-85, 4-87). – 14 с.
2. Осин М. И. Методы автоматизированного проектирования летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1984. - 51 с.
3. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. - М.: ВНИИПИ, 1989. - 309 с.
4. Ritchey T. Problem Structuring using Computer-Aided Morphological Analysis// Journal of the Operational Research Society (JORS). – 2006. - Vol. 57, No. 7.
5. Раков Д.Л., Синёв А.В. Параллельное проектирование на этапах структурного синтеза и параметрической оптимизации при формировании облика новых технических систем// Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2011. - № 4. - С. 99-102.
6. Раков Д.Л. Прямые и обратные задачи структурного синтеза при поиске новых технических решений// Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2007. - № 2. - С. 42-49.
7. Pecheikina M. A., Rakov D. L., Sukhorukov R. Yu. Structural Synthesis and the Search for New Engineering Solutions in the Conceptual Design Phase// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2020. - Vol. 49, No. 8. - P. 61–68.
8. Zwicky F. Morphology of aerial propulsion// Helvetica Physica Acta. – 1948. – Vol. XXI. – Heft 5. – P. 299–340.
9. VDI 2221 (1993). Systematic approach to the development and design of technical systems and products. - Beuth Verlag, 1993.
10. VDI 2222 (1997). Part 1. Methodic development of solution principles. Beuth Verlag, 1997.
11. Суминов И., Белкин П., Эпельфельд А., Людин В., Крит Б., Борисов А., Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов в 2-х томах, Том II. - М: Техносфера, 2011. – 512 с.
12. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowey S.J., Plasma electrolysis for surface engineering, Surface and Coatings Technology, Volume 122, Issues 2–3, 15 December 1999. - P. 73–93.
13. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и выбор технологических процессов и систем управления для эффективного синтеза микродуговых покрытий// Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2017. - № 1. - С. 75-80.

14. Klimenko B., Rakov D. Analysis and syhythesis of innovative enginnering solutions and technologies based on advanced morphological approach// Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2018. - Т. 658. - С. 274-283.
15. Митряева О.Е., Печейкина М.А., Раков Д.Л. Синтез и моделирование технологических процессов и установок микродугового оксидирования. В сборнике: Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации сборник статей VII Международной научно-практической конференции: в 4 частях. - 2017. - С. 119-122.

*Дата поступления: 15 июля 2020 г.*