

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 4 (58)

2016

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Хейфец М.Л. Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии ..... 3

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Дёмин В.А. Научноёмкие технологии обработки давлением на современном этапе развития машиностроения ..... 10

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Смоленцев В.П., Норман А.В., Золотарев В.В. Модификация поверхностного слоя алюминиевых сплавов электроэрозионным нанесением покрытий ..... 14

### ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Безязычный В.Ф. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин на стадии подготовки производства ..... 22

Базров Б.М. Проблема обеспечения технологичности изделия ..... 30

Михайлов А.Н., Петров М.Г., Шейко Е.А., Михайлов Д.А. Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий в машиностроении ..... 35

### ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ С ЧПУ И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ

Петрешин Д.И., Суслов А.Г., Федонин О.Н. Модернизация станков с ЧПУ и автоматизированная система сбора данных их функционирования ..... 42

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней*

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Научноёмкие технологии в машиностроении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

#### Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ  
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г.

#### Председатель редакционного совета

чл.-кор. РАН ПРИХОДЬКО В.М.

#### Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

#### Редакционный совет:

д.ф.-м.н., проф. АМОСОВ А.П. (г. Самара)

д.т.н., проф. АРТЁМОВ И.И. (г. Пенза)

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БЕЛОВ В.Д. (г. Москва)

д.т.н., проф. БОЛДЫРЕВ А.И. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. БОЧКАРЁВ П.Ю. (г. Саратов)

акад. НАН Беларуси

ВИТЯЗЬ П.А. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЕМЕЛЬЯНОВ С.Г. (г. Курск)

д.т.н., проф. ЗУБАРЕВ Ю.М. (г. Санкт-Петербург)

д.т.н., проф. КИРИЧЕК А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. КЛИМЕНКО С.А. (г. Киев, Украина)

чл.-кор. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк, Украина)

д.т.н., проф. МОРОЗОВ В.В. (г. Владимир)

д.т.н., проф. МОТРЕНКО П.Д. (г. Ростов-на-Дону)

д.т.н., проф. ОЛЕЙНИК А.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПОЛЕТАЕВ В.А. (г. Рыбинск)

д.т.н., проф. СИТНИКОВ А.А. (г. Барнаул)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. СХИРТЛАДЗЕ А.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. ФАТЮХИН Д.С. (г. Москва)

д.т.н., проф. ХАНДОЖКО А.В. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ХУДОБИН Л.В. (г. Ульяновск)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

#### Редактор

ДЮБКОВА Н.В.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении индекс по каталогу «Роспечать» 79195.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39

E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)

[www.ntmash.tu-bryansk.ru](http://www.ntmash.tu-bryansk.ru)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации

ПН № ФС77-43337

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 4 (58)

2016

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

## Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia  
d.en.s. SUSLOV A.G.

**Chairman of Editorial Committee**  
m.-corr. RAS PRIHOD'KO V.M.

**Chairman Assistant**  
d.en.s., prof. GRIGOR'YANTS A.G.

## Editorial Committee:

d.p.-m.s., prof. AMOSOV A.P. (Samara)

d.en.s., prof. ARTEMOV I.I. (Penza)

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BELOV V.D. (Moscow)

d.en.s., prof. BOLDYREV A.I. (Voronezh)

d.en.s., prof. BOCHKAREV P.Yu. (Saratov)

Acad. NAS of Belarus

VITYAZ' P.A. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. EMEL'YANOV S.G. (Kursk)

d.en.s., prof. ZUBAREV Yu.M. (St. Petersburg)

d.en.s., prof. KIRICHEK A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. KLIMENKO S.A. (Kiev, Ukraine)

m.-corr. RAS LYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm')

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIHAJLOV A.N. (Doneck, Ukraine)

d.en.s., prof. MOROZOV V.V. (Vladimir)

d.en.s., prof. MOTRENKO P.D. (Rostov-on-Don)

d.en.s., prof. OLEJNIK A.V. (Moscow)

d.en.s., prof. POLETAEV V.A. (Rybinsk)

d.en.s., prof. SITNIKOV A.A. (Barnaul)

d.en.s., prof. SMOLENCEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. SHIRTLADZE A.G. (Moscow)

d.en.s., prof. FATYUKHIN D.C. (Moscow)

d.en.s., prof. HANDOZHKO A.V. (Bryansk)

d.en.s., prof. HEJFETS M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. HUDOBIN L.V. (Ul'yanovsk)

d.en.s., prof. SHAVRIN O.I. (Izhevsk)

## Editor

DJUBKOVA N.V.

DOI:10.12737/issn.2223-4608

Journal is spreaded on a subscription, witch can be issued in any post office (index on the catalogues: «Rospechat» 79195).

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39

E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)

[www.ntmash.tu-bryansk.ru](http://www.ntmash.tu-bryansk.ru)

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications of Russian Federation (ROSKOMNADZOR).

Registration certificate  
ПИ № ФС77-43337

## CONTENTS

### SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

**Kheifets M.L.** Additive synergic techniques of layered synthesis of composite products at power flow influence . . . . . 3

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN BLANK PRODUCTION

**Demin V.A.** Science intensive technologies in shaping at current stage of mechanical engineering development . . . . . 10

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Smolentsev V.P., Norman A.V., Zolotaryov V.V.** Modification of surface layer in aluminum alloys by electroerosion coating . . . . . 14

### FUNCTION-ORIENTED AND MODULAR TECHNOLOGIES

**Bezyazychny V.F.** Technological support of machinery performance attributes . . . . . 22

**Bazrov B.M.** Problem in product manufacturability . . . . . 30

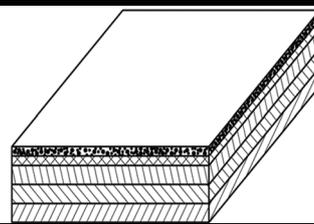
**Mikhailov A.N., Petrov M.G., Sheiko E.A., Mikhailov D.A.** Technological peculiarities in realization of detonation functionally-oriented coatings in mechanical engineering. . . . . 35

### PROCESSING ON NC MACHINE TOOLS AND MACHINING CENTERS

**Petreshin D.I., Suslov A.G., Fedonin O.N.** NC machines upgrade and automated system for data collection NC machines functioning. . . . . 42

Journal is included into the list approved by The State Commission for academic degrees and titles under the Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Reprint is possible only with the reference to the journal  
«Science intensive technologies in mechanical engineering»



УДК 621.01: 536.75  
DOI: 10.12727/18095

**М.Л. Хейфец**, д.т.н.  
(НПО «Центр» НАН Беларуси,  
220018, Беларусь, г. Минск, ул. Шаранговича, 19)  
E-mail: mlk-z@mail.ru

## **Аддитивные синерготехнологии послойного синтеза изделий из композиционных материалов при воздействии потоками энергии**

*Предложен подход, рассматривающий аддитивные методы как синерготехнологии, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений. На основании подхода выбираются источники энергии и материалы для технологий послойного синтеза изделий. Стабилизация толщины формируемых слоев связана с процессами самоорганизации поверхностных явлений и конструктивными особенностями изделий.*

**Ключевые слова:** аддитивные методы; синерготехнологии; послойный синтез; самоорганизация; поверхностные явления.

**M.L. Kheifets**, D.Eng.  
(SPC “Center” NAS Belarus,  
19, Sharangovich Str., Minsk, Belarus, 220018)

## **Additive synergic techniques of layered synthesis of composite products at power flow influence**

*An approach considering additive methods as synergic techniques ensuring self-organization of surface phenomena is offered. On the basis of the approach the energy sources and material for the techniques of layered synthesis of products are chosen. The thickness stabilization of layers formed is connected with the processes of surface phenomena self-organization and design peculiarities of parts.*

**Keywords:** additive methods; synergic techniques; layered synthesis; self-organization; surface phenomena.

Современный технологический уклад реализует новую парадигму дизайна, в том числе и молекулярного, «снизу–вверх» взамен или в дополнение развивающейся веками парадигме «сверху–вниз» [1, 2]. Сущность перспективных аддитивных технологий заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделия по «цифровой модели» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала [3, 4].

Передовые технологии, помимо используемых новых аппаратных и программных

средств, оборудования и оснащения, основываются на *послойном выращивании поверхностей* изделий и *самоорганизации структур* композиционного материала [5, 6]. Так, определяя фундамент наукоёмких нанотехнологий, Ж.И. Алферов выделяет кроме зондовой микроскопии, *эпитаксиальный рост пленок на поверхности* и процессы *самосборки гетероструктур* материала [7].

Поэтому особенно перспективен подход, рассматривающий аддитивные методы как *синерготехнологии*, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений при послойном формировании структур поверхностных слоев различных материалов и управление их

свойствами при разнообразных физических воздействиях [8, 9]. Самоорганизация поверхностных явлений обеспечивает устойчивое образование слоя определенной толщины при значительных изменениях расстояния от источника энергии или подаваемого материала до формируемой поверхности, а также позволяет в результате взаимопроникновения сращивать последовательно наносимые слои [10, 11].

Расстояние до формируемой поверхности – особо чувствительный фактор при «непосредственном осаждении слоя» по технологиям DD-Direct Deposition, а изменение расстояния особенно важно для стабилизации толщины при «предварительном формировании слоя» материала по технологиям BD-Bed Deposition, подразумевающим наличие некоторой платформы, на которой послойно создается материал и изделие [2, 3].

В результате выбор в аддитивной технологии источника энергии или подаваемого материала определяет не только технологическую среду (дискретную или непрерывную), но и

поверхностные явления, обеспечивающие процессы самоорганизации в синерготехнологиях [10, 11].

**Распределение плотности мощности потоков энергии.** Прямое выращивание изделий послойным синтезом материала возможно в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном и в разнообразных высокоэнергетических процессах [5, 8] с объемной, множеством локализованных и единой сфокусированной зоной поглощения [10, 11] в зависимости от плотности мощности потоков энергии (таблица).

1. В процессе индукционной наплавки погружением детали в расплавленный металл объемная зона поглощения энергии распределена по всей наращиваемой поверхности [12]. Толщина формируемого слоя определяется адгезией между расплавом и поверхностью изделия и описывается скоростью подъема детали, напряжением поверхностного натяжения и коэффициентом внутреннего трения. Максимальная толщина слоя при обтекании расплавом поверхности ограничивается усло-

Высокоэнергетические процессы послойного синтеза изделий

Процессы разделения и формирования слоев	Агрегатное состояние наносимого материала	Зоны поглощения и плотность потоков энергии, Вт/см <sup>2</sup>	Толщина разделяемого и формируемого слоя, мм
1. Индукционный нагрев с припеканием и наплавка погружением	твердое (порошок), жидкое (расплав)	объемная, 10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	0,3...3,0 [13]
2. Плазменная резка, напыление и наплавка	твердое (порошок)	объемная, 5·10 <sup>2</sup> ...10 <sup>5</sup>	0,1...10 [14]
3. Электроэрозионная обработка и электромагнитная наплавка	твердое (порошок)	множество локализованных, 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>5</sup>	0,05...0,5 [15]
4. Электронно-лучевая резка, оплавление и поверхностное модифицирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>6</sup>	1,0...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [16]
5. Лазерная резка, оплавление и легирование	жидкое (расплав)	единая сфокусированная, 5·10 <sup>3</sup> ...10 <sup>7</sup>	1,0...10 (при термоэлектрической конвекции 0,01...1,0) [16]
6. Ионная имплантация и осаждение	газообразное	множество локализованных, 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>5</sup>	0,002...0,2 [15]

виями потенциального течения и рассчитывается как толщина пограничного слоя, за пределами которого происходит срыв потока [5].

2. При резке и послойном нанесении металлических порошков в твердом состоянии в плазменных процессах образуется объемная зона поглощения энергии [13]. Толщина формируемого слоя определяется совместным действием кинетического и термодинамического факторов, описываемых скоростью движения частиц порошка и термодинамическим потенциалом плазменного потока, а процесс формирования слоя характеризуется соотношением между кинетической и джоулевой энергией потока.

3. В процессах электроэрозионной обработки поверхности и электромагнитной наплавки порошка образуется множество локализованных зон поглощения энергии. Электромагнитная наплавка позволяет наносить покрытие только до определенной толщины, после чего формируемый слой теряет устойчивость, а на поверхности образуются пики, которые при последующих разрядах превращаются в кратеры [14].

Управлять процессом наплавки позволяют электромагнитные потоки. Так, движения и фиксация частиц ферропорошка задаются индукцией магнитного поля, а интенсивное тепловыделение в местах контакта с формируемой поверхностью и плавление порошка определяются напряженностью электрического поля.

В результате роста сопротивления ферропорошковой среды, и электропроводности наносимого покрытия, стабилизируется толщина наносимого слоя [10]. Процесс электромагнитной наплавки определяется электромагнитными и инерционными силами и описывается магнитным взаимодействием частиц и напряженностью электрического поля в рабочей зоне [11].

4. В процессах электронно-лучевой резки, формирования и модифицирования поверхностного слоя целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии, сканируемую по всей формируемой поверхности [10]. При лучевой обработке в результате конвекционной неустойчивости в узком поверхностном слое расплава определенной толщины формируются состоящие из вихрей диссипативные структуры. При достаточно быстром охлаждении в таком состоянии по фронту кристаллизации образуется ячеистая структура. Толщина измененного слоя

описывается соотношением свойств металла, его коэффициентами поверхностного натяжения и объемного расширения, плотностью в расплавленном состоянии [15].

5. При лазерной резке, оплавлении и легировании поверхностного слоя, целесообразно рассматривать единую сфокусированную зону поглощения энергии. В процессе кристаллизации материала в ванне расплава также образуется ячеистая структура [11]. Процесс формирования диссипативных структур в расплаве определяется проявлением термокапиллярных явлений и связан с подъемной силой плавучести и силой диссипации в расплаве [6].

6. При ионной имплантации и осаждении покрытия из газообразного состояния поток ионов, не фокусируясь, распределяется по поверхности детали, формируя множество локализованных зон поглощения энергии. Толщина наносимого покрытия определяется в основном толщиной слоя, в котором потенциал, прикладываемый к детали, эффективно воздействует на ионы [14]. Этот слой описывается соотношением величины потенциала электрического поля и плотности ионов плазмы с учетом их заряда и массы. Ионы в результате совместного влияния их потенциальной энергии в электрическом поле и тепловой энергии плазменного потока распределяются по экспоненциальному закону, задавая тем самым толщину осаждаемого покрытия [16].

Рассмотренные высокоэнергетические процессы дают возможность послойно наносить материалы с особыми свойствами и создавать поверхности изделий геометрически сложной формы. Они позволяют направленно изменять физико-механические свойства материала в зависимости от требований эксплуатации деталей в машине [10, 16].

**Формирование поверхностного слоя сложного профиля.** Высокоэнергетические процессы аддитивных технологий рассматриваются с системных позиций, как последовательности преобразований вещества, энергии и энтропии в материальных и информационных подсистемах, направленные на изменение точности и качества поверхностей и физико-механических свойств изделия [17].

Для анализа путей интенсификации формирования структур и фаз поверхностных слоев деталей в обрабатывающей системе выделяются нестабильные переменные (температура, давление, сила тока, магнитная индукция и др.), которые подчиняют себе развитие, эволюцию стабильных в данном процессе пара-

метров. Такой подход позволяет рассматривать любую структуру, как самостабилизирующийся энергетической обусловленностью комплекс [10, 17]. При эволюции чередование переходов системы из устойчивого в неустойчивое состояние сопровождается сменой масштабного уровня процесса поглощения энергии и образованием диссипативных структур [11, 16].

Для описания процессов модифицирования поверхностных слоев при воздействиях концентрированными потоками энергии исследуется открытая технологическая система с дополнительными термодинамическими степенями свободы и рассматривается формирование диссипативных структур и фаз, рассеивающих избыток подводимой энергии.

Поверхности раздела структур и градиенты свойств слоев при аддитивных синерготехнологиях, формирующих композиционный материал изделия, определяются технологическими барьерами, которые дают возможность установить граничные условия процессов послойного синтеза [18]. Условия создания слоя в высокоинтенсивных процессах целесообразно связать с особенностями конструирования формируемых оболочек изделия.

Конфигурацию границ позволяет рассмотреть компьютерное поверхностное и твердотельное моделирование, при этом задачи моделирования послойно формируемых оболочек не сводится к простому масштабированию, а учитывают конструктивные особенности и специфические условия технологий, связанные с устойчивостью процессов, взаимопроникновением слоев и другими поверхностными явлениями [5, 8].

При индукционной наплавке погружением происходит затекание внутренних полостей, а заполнение пор зависит от условий смачивания расплава [12]. В процессах плазменного напыления и наплавки происходит скругление кромок [13]. На наиболее выступающих участках при электромагнитной наплавке толщина наносимого слоя снижается [14]. Толщина измененного слоя при электронно-лучевом или лазерном оплавлении вследствие концентрационного расслоения расплава в образующихся вихрях неоднородна и зависит от степени присутствия легирующих элементов [15]. При ионном осаждении покрытий, на выступах с малым радиусом при вершине вследствие увеличения потенциала слой наращивается наиболее интенсивно [16].

В результате условия создания слоя в высокоэнергетических процессах целесообразно

связать с особенностями конструирования формируемых изделий, а для создания слоев стабилизированной толщины в физических полях следует обеспечивать устойчивость технологической системы при индукционной, плазменной, электромагнитной, электронно-лучевой, лазерной наплавке и обработке поверхности.

**Самоорганизация поверхностных явлений в технологической среде.** Особое внимание в технологической системе при обработке следует обращать на технологическую среду, которая в процессах нанесения плоских слоев (по VD-технологиям) и формировании оболочек (по DD-технологиям) создается воздействиями концентрированных потоков энергии.

Из-за рельефа шероховатости на поверхности детали скорость движения потока *непрерывной технологической среды* изменяется. Поэтому существует пограничный слой, находящийся между потенциальным течением и поверхностью детали. Этот пограничный слой, называемый слоем Прандтля, не является безвихревым, так как в нем благодаря вязкости среды действует трение, обусловленное сопротивлением обтеканию в ламинарном течении [19].

Толщина пограничного слоя Прандтля  $t_{Pr}$ , внутри которого относительная скорость  $v$  падает до нуля, зависит от кинематической вязкости  $\nu$  технологической среды, и длины  $l$  обтекаемого тела [20]

$$t_{Pr} = \sqrt{\frac{6lv}{\nu}}$$

В результате, неравномерность толщины покрытия, формируемого в расплаве, определяется пограничным слоем Прандтля, а максимальная толщина покрытия зависит от  $t_{Pr}$ .

Если при ламинарном обтекании критерий Рейнольдса превышает критическое значение, то часть пограничного слоя отрывается. Это приводит к тому, что часть потока становится турбулентной, и значительно возрастает сопротивление обтеканию.

Задаваемое динамической вязкостью  $\eta = \nu\rho$ , сопротивление трения переходит в большее по значению, определяемое плотностью среды  $\rho$  сопротивление давления [19].

В технологической системе ионно-плазменные, электронные и лучевые воздействия *дискретной технологической среды* не полностью поглощаются формируемыми по-

верхностными слоями. При этом рассеяние потоков не всегда связано с образованием диссипативных структур в поверхностных слоях, а часто обусловлено отражением, преломлением или другими явлениями отвода вещества и энергии из рабочей зоны [10, 11].

В ионно-вакуумных процессах большая часть ионов плазмы бомбардирует катод, что приводит к испарению с его поверхности нейтральных и возбужденных атомов, которые в свою очередь ионизируются в вакуумной дуге и снова возвращаются на катод в виде ионов. Осуществляется, так называемый, процесс самогенерации плазмы [16]. Главным в этом процессе является то, что плазма вакуумной дуги, представляет собой эффективный источник ионов материала катода. Чтобы создать направленный поток ионов к подложке, к ней прикладывается отрицательный потенциал. При этом подразумевается, что подложка является электропроводящей.

Однако зачастую покрытие необходимо наносить на диэлектрическую подложку или же наносимое покрытие не обладает электропроводимостью. В этом случае к подложке прикладывается высокочастотный потенциал. В результате высокоподвижные электроны создают отрицательный по отношению к плазме потенциал самосмещения на поверхности диэлектрика, отбирающий ионы из плазмы.

На формирование ионных потоков к подложке оказывают влияние величина прикладываемого потенциала  $\varphi$  и форма самой подложки, что следует из уравнения движения ионов:

$$m_i \frac{d^2 l}{dt^2} = Z_i E_l = -Z \Delta \varphi,$$

где  $m_i$  – масса иона;  $Z_i$  – его заряд;  $E_l$  – напряженность электрического поля.

Величина  $\Delta \varphi$  находится из решения уравнения Пуассона:

$$\Delta \varphi = -\frac{n_i Z_i}{\varepsilon_0},$$

где  $n_i$  – плотность ионов плазмы;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Из этого следует, что если подложка представляет собой бесконечно плоскую поверхность, то только в этом случае поток ионов к ней будет однородным, т.е. концентрация ионов в местах, равноудаленных от поверхности, будет одинаковой. Если же на поверхности подложки имеются выступы и углубления различной формы, то это приводит к искрив-

лению траектории движения ионов и соответственно к тому, что количество ионов, попадающих на подложку в единицу времени, неодинаково в разных ее местах. Как следствие, толщина наносимого покрытия будет разной и, с увеличением потенциала неоднородность плотности ионов в плазме повышается.

Область возникающих неоднородностей ограничивается в основном толщиной примыкающего к ней слоя Дебая, т.е. слоя, в котором потенциал, прилагаемый к подложке, эффективно воздействует на ионы. Толщину слоя Дебая  $t_D$  можно найти, однако уравнение имеет аналитическое решение только для простых случаев. В частности, для бесконечной, идеально гладкой поверхности [5, 16]:

$$t_D = \sqrt{\frac{\varphi \varepsilon_0}{n_i Z_i}}.$$

Потенциальная энергия иона в электрическом поле равна  $Z_i \varphi$ . Согласно формуле Больцмана, ионы в единице объема слоя Дебая распределяются по энергиям следующим образом:

$$n_i = n_{i0} e^{\frac{Z_i \varphi}{k_B T}},$$

где  $n_{i0}$  – плотность ионов вдали от слоя Дебая;  $k_B$  – постоянная Больцмана.

В результате, получаем уравнение:

$$\Delta \varphi = -\frac{Z_i n_i}{\varepsilon_0} e^{\frac{Z_i \varphi}{k_B T}}.$$

Решение уравнения позволяет найти зависимость  $\varphi(l)$  с учетом изменения плотности ионов  $n_i(l)$  в слое Дебая и тем самым определить основные особенности формирования ионных потоков.

При решении конкретных задач необходимо учитывать соотношение величины  $t_D$ , размеры и форму подложки. Если длина и ширина плоского изделия на подложке значительно превышает  $t_D$ , тогда его можно рассматривать как бесконечное, плоское, идеально гладкое тело и краевые эффекты не будут сказываться на толщине и структуре наносимого покрытия. В противном случае краевые эффекты приводят к неоднородности и разнотолщинности наносимого покрытия.

Толщина слоя Дебая  $t_D$  зависит от плотно-

сти ионов  $n_i$ . С увеличением плотности  $n_i$  толщина  $t_D$  уменьшается, а следовательно, уменьшается размер изделий, поверхности которых можно рассматривать как бесконечные.

В случае использования вакуумного электродугового источника ионов плотность повышается с увеличением разрядного тока вакуумной дуги, а также при напуске в вакуумную систему инертных или реакционных газов, которые ионизируются. Это необходимо учитывать при оптимизации технологических параметров процесса нанесения покрытий.

Следовательно, можно сделать вывод, что формирование ионных потоков, идущих к подложке, происходит в основном в слое Дебая, толщина которого зависит от плотности ионов  $n_i$ , их зарядов, масс и энергии. Развитая поверхность подложки, наличие на ней неровностей вызывают разнотолщинность наносимого покрытия, формирование в нем различных структур [5, 11, 16]. Для снижения разнотолщинности покрытий необходимо стремиться к уменьшению толщины слоя Дебая, что достигается уменьшением прикладываемого к подложке потенциала либо увеличением плотности ионов.

### Заключение

Аддитивные процессы прямого выращивания изделий послойным синтезом в соответствии с особенностями конструирования формируемых слоев (по VD-технологиям) и оболочек (по DD-технологиям) раскрывают новые перспективы в ресурсном проектировании деталей машин.

Использование самоорганизации поверхностных явлений позволяет формировать слои определенной толщины по всей сложнопрофильной рабочей поверхности и управлять обеспечением свойств материала потоками энергии.

Наиболее перспективными направлениями развития аддитивных технологий послойного синтеза изделий с управляемым формированием свойств материала являются:

- создание новых функциональных, градиентных материалов, как для каркаса – основы, так и для поверхностных слоев – покрытий;
- проектирование процессов, синтезирующих многослойные, композиционные материалы при послойном формировании изделий потоками энергии или вещества;
- конструирование установок, использующих концентрированные источники энергии или конструкционных материалов для реализации

новых процессов послойного синтеза в автоматическом режиме;

- разработка программного обеспечения, как для моделирования послойных оболочек, так и для управления потоком энергии или материала.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л., Чижик С.А. и др.** Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева. Минск: Беларуская навука, 2011. 283 с.
2. **Головин Ю.И.** Введение в нанотехнологию. М.: Машиностроение, 2003. 112 с.
3. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н.** Аддитивные технологии в машиностроении. СПб: Изд-в. СПбГУ, 2013. 221с.
4. **Логачева А.И., Сентюринна Ж.А., Логачев И.А.** Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) // Перспективные материалы. 2015. № 5. С.5–15.
5. **Хейфец М.Л.** Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Новополоцк: ПГУ, 2001.156 с.
6. **Русецкий А.М., Витязь П.А., Хейфец М.Л. и др.** Теоретические основы проектирования технологических комплексов / под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларуская навука, 2012. 239 с.
7. **Алферов Ж.И.** История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников, 1998. Т. 32. № 3. С. 2–7.
8. **Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л.** Оперативное макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2011. № 2(2). С. 3–8.
9. **Чижик С.А., Хейфец М.Л., Филатов С.А.** Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. №4 (29). С. 68–74.
10. **Хейфец М. Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272с.
11. **Гордиенко А.И., Хейфец М.Л., Чемисов Б.П. и др.** Синергетические аспекты физико-химических методов обработки. Минск: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000. 172 с.
12. **Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В. и др.** Индукционная наплавка твердых сплавов. М.: Машиностроение, 1970.184 с.
13. **Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др.** Теория и практика газопламенного напыления. Минск: Наука и техника, 1993. 296 с.
14. **Хейфец М.Л., Акулович Л.М., Мрочек Ж.А., Зевелева Е.З.** Электрофизические и электрохимические ме-

тоды обработки материалов. Новополоцк: ПГУ, 2012. 292 с.

15. Эйдельман Е.Д. Возбуждение электрической неустойчивости нагреванием // Успехи физических наук. 1995. Т.165, № 11. С.1279–1294.

16. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель: ИММС НАНБ, 1999. 276 с.

17. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.

18. Чижик С.А., Хейфец М.Л., Филатов С.А. Технологические барьеры при высокоинтенсивных воздействиях в процессах послойного синтеза и обработки материалов // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2015. № 3. С. 107–113.

19. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

20. Кнойбуль Ф.К. Пособие для повторения физики. М.: Энергоиздат, 1981. 256 с.

## REFERENCES

1. Vityaz' P.A., Ilyushchenko A.F., Kheifets M.L., Chizhik S.A. et al. *Techniques of Constructional Nano-Structural Materials and Coatings* / under the general editorship of P.A. Vityaz and K.A. Solntsev. Minsk: Belarusian Science, 2011. pp.283.

2. Golovin Yu.P., *Introduction in Nano-techniques*. M.: Mechanical Engineering, 2003. pp.112.

3. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N., *Additive Techniques in Mechanical Engineering*. S-Pb.: Publishing House S-PbSU, 2013. pp.221.

4. Logachyova A.I., Sentyurina Zh.A., Logachyov I.A. Additive Techniques in manufacturing critical parts of metal and alloys (Review) // *Promising Materials*. 2015. № 5. pp.5–15.

5. Kheifets M.L. Material Properties Formation at Layered Synthesis of Parts. Novopolotsk: PSU, 2001. pp. 156.

6. Rusetsky A.M., Vityaz P.A., Kheifets M.L. et al. *Theoretical Fundamentals in Technological Complex Design* / under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belarusian Science, 2012. pp.239.

7. Alfyorov Zh.I. History and future semi-conductor hetero-structures // *Physics and Techniques of Semi-conductors*,

1998. Т. 32. № 3. pp. 2–7.

8. Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Kheifets M.L. Efficient prototyping and production of complex products made of composite materials // *Science intensive technologies in mechanical Engineering*. 2011. № 2(2). pp. 3–8.

9. Chizhik S.A., Kheifets M.L., Filatov S.A. Prospects in development of technological complex of composite material additive synthesis and product shaping // *Mechanics of Machinery, Mechanisms and Materials*. 2014. №4 (29). pp. 68–74.

10. Kheifets M.L. *Combined Processing Designing*. M.: Mechanical Engineering, 2005. pp. 272.

11. Gordienko A.I., Kheifets M.L., Chemisov B.P. et al. *Synergetic Aspects of Physico-Chemical Methods of Processing*. Minsk: FTI; Polotsk: PSU, 2000. pp. 172.

12. Tkachyov V.N., Fistein B.M., Kazintsev N.V. et al. *Induction Hard Surfacing*. M.: Mechanical Engineering, 1970. pp. 184.

13. Vityaz' P.A., Ivashko V.S., Manoilo E.D. et al. *Theory and Practice of Flame Spraying*. Minsk: Science and Technique, 1993. pp. 296.

14. Kheifets M.L., Akulovich L.M., Mrochek Zh.A., Zevleva E.Z. *Electrophysical and Electrochemical Methods of Material Processing*. Novopolotsk: PSU, 2012. pp. 292.

15. Edelman E.D. Excitation of Electric Instability by Heating // *Physical Sciences Successes*. 1995. Vol.165, № 11. pp. 1279–1294.

16. Kheifets M.L., Kozhuro L.M., Mrochek Zh.A. *Self-organization Processes at Surface Formation*. Gomel: IMMS NANB, 1999. pp. 276.

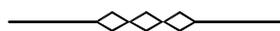
17. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Synergy and Fractals in Material Science*. M.: Science, 1994. pp. 383.

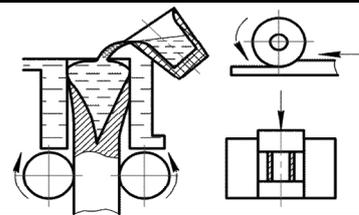
18. Chizhik S.A., Kheifets M.L., Filatov S.A. Technological bars at high intensive effects in processes of layered synthesis and material processing // *Proceedings of NAS of Belarus. Series of Physical Technical Sciences*. 2015. № 3. pp. 107–113.

19. Loitsyansky L.G. *Fluid and Gas Mechanics*. M.: Science, 1987. pp. 840.

20. Knoibyull F.K. *Reference Book for Physics Repetition*. M.: Energoizdat, 1981. pp. 256.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов





УДК 621.7.04  
DOI: 10.12727/18096

**В.А. Демин, д.т.н.,**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1)  
E-mail: va\_demin@bk.ru

## **Научные технологии обработки давлением на современном этапе развития машиностроения**

*Изложены современные подходы к анализу процессов обработки металлов давлением. Предложено использовать методы планирования эксперимента для обработки результатов численного моделирования. Показано, что изменение параметров заготовки существенно влияет на параметры штамповки.*

**Ключевые слова:** машиностроение; обработка металла давлением.

**V.A. Demin, D.Eng.**  
(Bauman State Technical University of Moscow)  
Build. 1, 5, 2-nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

## **Science intensive technologies in shaping at current stage of mechanical engineering development**

*Current approaches to the analysis of metal shaping. It is pointed out that at the current stage it is necessary to design processes ensuring a specified material structure and an essential reserve of plasticity. Particular consideration is given to the problem of manufacturing products of powder and incompact materials. The approaches to the problem solution of metal stamping having anisotropic stress-strain properties are widely covered. It is offered to use methods of experiment planning for processing the results of computational modeling. It is offered to include random characteristics into a solution which could change at new metal lot obtaining. It is shown that changes in geometry, techniques and stress-strain properties can result in the considerable changes of values during metal shaping.*

**Keywords:** mechanical; engineering; metal shaping.

Современное развитие машиностроения требует от исследователей более интенсивного изучения новых инновационных технологий [1]. На современном этапе обработкой давлением необходимо получать не просто детали без трещин, а с заданной структурой и запасом пластичности. Необходимо больше внимания уделять таким прогрессивным технологическим процессам как штамповке с кручением, прессованию с радиальным истечением материала, реверсивному выдавливанию и процессам прессования из порошка.

В листовой штамповке необходимо учитывать анизотропию свойств материала, необходимость изготовления деталей с заданным запасом пластичности.

Проектирование новых инновационных

технологических процессов невозможно без развития науки об обработке металлов давлением [2].

Необходимо учитывать, что формоизменение заготовок при правильно спроектированном технологическом процессе сопровождается изменением исходной структуры заготовок в направлении измельчения зерен, формирования необходимой структуры. Поэтому требуются новые подходы к решению поставленной задачи. Необходимо создавать и обосновывать новые модели уплотнения, консолидации и разрушения при деформации пористых материалов. В работе [3] на основе тензорных представлений об уплотнении создана теория технологической наследственности, связанная с формированием деформационной анизотро-

пии при обработке материалов с необратимой сжимаемостью.

На основе феноменологического подхода созданы теоретические положения консолидации некомпактных материалов, которые подтверждены экспериментальными исследованиями.

Устойчивое протекание технологического процесса листовой штамповки при различных температурно-скоростных режимах и анизотропии механических свойств рассмотрено в работе [4].

Для решения поставленной задачи вводится потенциал скоростей деформации анизотропного тела при кратковременной ползучести в следующем виде:

$$2f(\sigma_{ij}) = H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2N\tau_{xy}^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 = 1, \quad (1)$$

ассоциированный закон пластического течения:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= d\lambda [H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_z)]; \\ d\gamma_{yz} &= d\lambda L \tau_{yz}; \\ d\varepsilon_y &= d\lambda [F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x)]; \\ d\gamma_{zx} &= d\lambda M \tau_{zx}; \\ d\varepsilon_z &= d\lambda [G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y)]; \\ d\gamma_{xy} &= d\lambda N \tau_{xy}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $H, F, G, N, L, M$  – параметры анизотропии при кратковременной ползучести;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $x, y, z$  – главные оси анизотропии.

Принимаются предложенные Р. Хиллом для формоизменения в условиях кратковременной ползучести эквивалентные напряжения  $\sigma_e$ :

$$\sigma_e = \left\{ 3 \left[ R_x R_x (\sigma_x - \sigma_y)^2 + R_x (\sigma_y - \sigma_z)^2 + R_y (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2R_y (R_{xy} \tau_{xy}^2 + R_{yz} \tau_{yz}^2 + R_{zx} \tau_{zx}^2) \right] / [2(R_x + R_x R_y + R_y)] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

и эквивалентные скорости деформаций  $\xi_e$ :

$$\begin{aligned} \xi_e &= \sqrt{2(R_x + R_x R_y + R_y)} \left\{ R_x (R_x \xi_x - R_y \xi_y)^2 + R_x R_y (\xi_x - R_x \xi_z)^2 + R_x^2 (R_y \xi_z - \xi_x)^2 + \left(\frac{R_x^2}{2}\right) (R_x + R_y + 1)^2 \left[ \frac{(\xi_{xy})^2}{R_{xy}} + \frac{(\xi_{yz})^2}{R_{yz}} + \frac{(\xi_{zx})^2}{R_{zx}} \right] \right\}^{1/2} / [\sqrt{3} R_x R_y^{1/2} (R_x + R_y + 1)], \quad (4) \end{aligned}$$

где  $R_x = HG; R_y = HF; R_{xy} = NG; R_{yz} = LG; R_{zx} = MG$ .

Решение системы уравнений, описывающих процесс пластической деформации металла, в которую входят уравнения (1) – (4), связано с существенными математическими трудностями. Поэтому для решения инженерных задач большинство уравнений существенно упрощают, как правило, принимая напряженно-деформированное состояние плоским и т.д. В результате получают решение, которое справедливо в широкой области, но имеет достаточно низкую точность.

Другим направлением решения наукоемких задач обработки металлов давлением, является использование различных численных методов. В большинстве пакетов прикладных программ сегодня возможно моделирование 3D. Данные решения обладают высокой точностью, но прогнозируют поведение металла только в узкой области заданных параметров процесса штамповки. Поэтому, даже при проектировании однотипных процессов необходимо снова моделировать весь процесс штамповки, что приводит к увеличению трудоемкости проектирования.

Для процессов, где сложно или невозможно применение аналитических и численных методов решения задач обработки металлов давлением, достаточно широко используются методы планирования эксперимента. Например, в работе [5] анализируется изменение механических характеристик углеродистых сталей при холодной объемной штамповке. Проведена оценка влияния процентного содержания углерода, наличия отжига заготовки и степени обжатия заготовки при выдавливании на механические характеристики стали. В результате получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость механических характеристик и принятых факторов.

В данной работе использован метод крутого восхождения по поверхности отклика и осуществлена оптимизация процесса выдавливания. Эта методика может эффективно применяться и для оптимизации других задач обработки металлов давлением.

Как правило, алгоритм решения задач обработки металлов давлением включает в себя следующие стадии:

- определение механических и геометрических характеристик заготовки;
- решение поставленной задачи аналитически или с использованием численных методов;

– анализ полученных результатов и подготовка рекомендаций для производства.

Однако большинство авторов не учитывают, что в соответствии с ГОСТ на поставку металла механические характеристики и геометрические размеры заготовок могут изменяться в достаточно больших пределах. Например, сталь 08 по ГОСТ 9045–93 «Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки. Технические условия» толщиной 2 мм может иметь следующие характеристики (табл. 1).

А толщина листа при ширине проката от 1000 до 1500 мм по ГОСТ 19904–90 «Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент» имеет следующие допуски:

- высокая точность, мм  $\pm 0,11$
- повышенная точность, мм  $\pm 0,15$
- нормальная точность, мм  $\pm 0,18$ .

Отсюда можно предположить, что рекомендации, полученные на заготовках из конкретной партии металла, могут существенно отличаться от полученных при поступлении металла из другой партии с другими механическими характеристиками и геометрическими параметрами.

В работе [6] показано, что учет возможного изменения механических, геометрических и технологических параметров может привести к колебаниям искомых параметров до 20 %.

Например, для стали 08 толщиной 2 мм, группы штампуемости СВ и нормальной точности, используя нормальное распределение, примем, что  $\sigma_b$  в диапазоне (250 ... 380 Н/мм<sup>2</sup>) может принимать значения (250,2; 275,1; 326,1; 295,5; 357 Н/мм<sup>2</sup>), толщина  $s$  в диапазоне (1,82...2,18 мм) может принимать значения (1,88; 1,98; 1,84; 2,1; 2,01 мм) и коэффициент трения  $\mu$  может принимать значения (0,093; 0,123; 0,083; 0,074; 0,087).

Применяя методы планирования экспериментов, можно использовать численные решения для получения аналитических зависимостей для заданного диапазона изменения варьируемых факторов.

Если используется матрица полного

факторного эксперимента, то необходимо пятикратное повторение каждого опыта. Если проводится численный эксперимент, то например, первую строку матрицы планирования повторяем пять раз последовательно, меняя значения  $\sigma_b$ ,  $s$ ,  $\mu$ . Для следующей строки получаем новый набор случайных значений  $\sigma_b$ ,  $s$ ,  $\mu$  и так далее. Отсюда для получения необходимого решения для трех факторов необходимо провести 40 экспериментов.

Поэтому, часто используют дробную матрицу факторного плана. Это позволяет сократить в два раза количество экспериментов.

Интересно применение планов планирования эксперимента Бокса – Вильсона. Такой план был применен в работе [6]. По данным планам эксперименты повторяют только в центральной точке, что позволяет сократить их количество до 13.

Применение данной методики расчета позволяет по результатам численного анализа получить уравнения регрессии, описывающие исследуемый процесс, оценить достоверность полученной модели и, кроме этого, получить следующие сведения:

- среднеквадратическую ошибку для коэффициента регрессии;
- нижнюю границу доверительного интервала коэффициента регрессии;
- верхнюю границу доверительного интервала коэффициента регрессии;
- коэффициент инфляции дисперсии – меру инфляции коэффициента регрессии, обусловленную мультиколлинеарностью;
- текстовую статистику с распределением Стьюдента для проверки значимости коэффициента регрессии;
- $P$ -значение – вероятность отбраковки члена на основе  $t$ -статистики.

Использование данной методики исследования позволяет получить более точные решения для заданной области изменения факторов, влияющих на процесс обработки металла давлением, а самое главное появляется возможность учета влияния изменений в свойствах заготовок при заказе новой партии металла.

### 1. Характеристики стали 08 по ГОСТ 9045-93

Способность к вытяжке	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup> , не более	Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %, не менее
ОСВ	195	250...350	40
СВ	205	250...380	38
ВГ	–	250...390	29

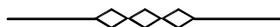
## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демин В.А. Инновационные технологии производства заготовок обработкой давлением // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 8(38). С. 3–5.
2. Дмитриев А.М., Демин В.А. Наука об обработке материалов давлением в комплексе с родственными науками // Научно-технические технологии в машиностроении. 2013. № 4(22). С. 16–19.
3. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 264 с.
4. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Леонова Е.В. Теоретические основы изотермического деформирования анизотропных высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 1. С.110–122.
5. Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В., Толмачев Н.С. Практическое использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке // Вестник МГТУ «Станкин». №4(31). 2014. С. 41–44.
6. Демин В.А., Бадулин Д.Н. Влияние отклонения характеристик заготовок на результаты расчета процессов обработки давлением // Научно-технические технологии в машиностроении. 2015. № 12(54). С. 41–44.

## REFERENCES

1. Demin, V.A. Innovation techniques in billet manufacturing by shaping // *Science intensive techniques in Mechanical Engineering*. 2014. № 8(38). pp. 3–5.
2. Dmitriev, A.M., Demin, V.A., Science of material shaping with cognate sciences // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. 2013. № 4(22). pp. 16.
3. Shestakov, N.A., Subich, V.N., Demin, V.A. *Compaction, Consolidation and Destruction of Porous Materials*. M.: FIZMATLIT, 2011. pp. 264.
4. Yakovlev, S.S., Larin, S.N., Leonova, E.V. Theoretical fundamentals of isotherm deformation of anisotropic high-strength materials in mode of short-time creep // *Proceedings of TULSU. Engineering Sciences*. 2014. Edition. 1. pp.110–122.
5. Dmitriev, A.M., Grechnikov, F.V., Korobova, N.V., Tolmachev, N.S. Practical use of mechanical data of structural and carbon steel at cold die forging // *Bulletin of MSTU "Stankin"*. №4(31). 2014. pp. 41–44.
6. Demin, V.A., Badulin, D.N. Influence of deviation in billet characteristics upon computation results of shaping processes // *Science intensive techniques in Mechanical Engineering*. 2015. № 12(54). pp. 41–44.

Рецензент д.т.н. С.Н. Ларин



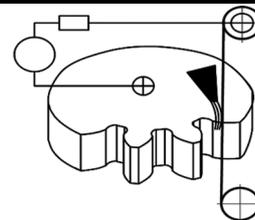
## Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)



УДК 621.9.047  
DOI: 10.12727/18097

**В.П. Смоленцев**, д.т.н.,  
(Воронежский государственный технический университет,  
Воронеж, 394026, Московский пр., д. 14),  
**А.В. Норман**, к.т.н.,  
(ГБПОУ ВО «ВАТ имени В.П.Чкалова»,  
Воронеж, 394004, Ленинградская ул., д. 33),  
**В.В. Золотарев**, заместитель главного инженера,  
(ВМЗ - филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»,  
Воронеж, 394055, Ворошилова ул., д. 22)  
E-mail: vsmolen@inbox.ru

## **Модификация поверхностного слоя алюминиевых сплавов электроэрозионным нанесением покрытий**

*Рассмотрен механизм нанесения на низкоплавкие сплавы (например, алюминиевые) чугуновых покрытий, имеющих высокую температуру плавления. Этим достигается придание легким деталям из алюминиевых сплавов повышенных эксплуатационных свойств, к которым относятся надежная защита деталей с покрытием от действия агрессивных, в том числе химически активных, сред. Кроме того улучшаются антифрикционные свойства деталей, работающих в узлах трения. Разработаны технологические режимы и спроектирован процесс нанесения покрытий. Приведен пример использования предложенного метода.*

**Ключевые слова:** покрытия; алюминиевые сплавы; чугун; режимы обработки; технологический процесс.

**V.P. Smolentsev**, D.Eng.,  
(Voronezh State Technical University,  
14, Moscovsky Avenue, 394026, Voronezh),  
**A.V. Norman**, Can.Eng.,  
(SBPEI HE "VAT of Chkalov",  
33, Leningradskaya Str., 394004, Voronezh),  
**V.V. Zolotaryov**, Deputy Chief Engineer  
(VMP –Branch FSP "GKNPC of Khrunichev",  
22, Voroshilov Str., 394055, Voronezh)

## **Modification of surface layer in aluminum alloys by electroerosion coating**

*The mechanism of plating on low-melting alloys (for example, aluminum) cast-iron coatings having a high fusion temperature is considered. By means of this method one achieves in light aluminum alloy parts higher performance attributes to which belong reliable protection of parts with a coating against aggressive influence of chemically active substances. Besides, antifriction properties of parts operating in friction units are improved. The technological modes are developed and a coating process is designed. The example of the method offered is shown.*

**Keywords:** coatings; aluminum alloys; cast iron; working modes; engineering process.

Алюминиевые сплавы обладают существенными технологическими достоинствами, к которым относятся высокая электро- и теплопроводность, невысокая удельная масса, хорошие механические показатели, что позволяет широко использовать такие материалы в авиакосмической отрасли, бытовой технике, а в последние годы – для изготовления автомобилей. Опыт эксплуатации изделий из алюминиевых сплавов выявил ряд ограничений, объясняющихся свойствами самого материала – это, прежде всего, недостаточная износостойкость в узлах трения, низкая твердость, слабые защитные свойства в агрессивных средах, особенно, в щелочах.

Традиционно такие недостатки устраняют путем модификации поверхностного слоя, в том числе покрытиями, наносимыми при малом нагреве, что ограничивает использование для покрытий металлов с повышенной температурой плавления, например, чугуна, имеющего хорошие антикоррозионные и антифрикционные свойства.

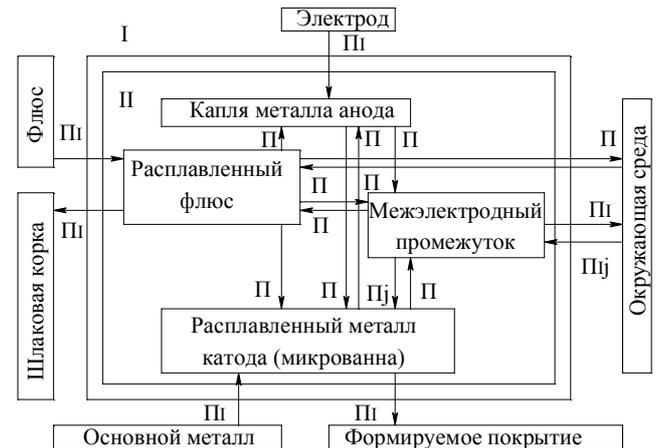
В работе приведен разработанный авторами способ и технология нанесения на поверхность алюминиевых сплавов чугунных покрытий с целью модификации поверхностного слоя для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств изготовленных деталей.

**Механизм нанесения чугуна электроэрозионным методом.** Прошлые попытки получения чугунных покрытий путем электроэрозионного нанесения на сплавы с невысокой температурой плавления оказывались не удачными, так как расплавленные капли чугуна создавали разрушение поверхности под покрытием и вызывали брак деталей. Наибольшие трудности возникали при нанесении таких слоев на алюминиевые сплавы, где снаружи образуется тугоплавкая пленка с низкой теплопроводностью, что способствует увеличению длительности нахождения на ней капли расплавленного покрытия, вызывающего глубокое расплавление металла под пленкой и отсутствие возможности получения качественного покрытия. Попытки механически удалить пленку оказались не эффективными, так как она вновь быстро восстанавливалась.

Решение было найдено за счет использования химически активных веществ, наносимых на поверхность перед созданием покрытия. Способ защищен патентами [1, 2] и раскрыт в работе [3].

На рис. 1 показан механизм нанесения чугунного покрытия на алюминиевый сплав.

В установках для электроэрозионного легирования и получения покрытий используются, в основном, генераторы RC-схемы. Расчет режимов технологического процесса нанесения покрытий на таких генераторах производят на основе требований к качеству покрытия. Одним из таких требований является толщина покрытия, которая обеспечивает требуемые защитные и другие эксплуатационные свойства, а также сплошность сформированного слоя.



**Рис. 1. Механизм образования покрытий на алюминиевых сплавах под слоем флюса:**

1 – 4 – поступление компонентов из внешней среды в зону плавления; 5, 6 – связи структурных составляющих внутри зоны плавления; 7, 8 – векторы удаления компонентов из зоны плавления.

Выбор оптимальной толщины единичного слоя наносимого покрытия осуществляется в зависимости от назначения детали. Результаты исследований характеристик нанесенного покрытия от его толщины и условий формирования показывают, что слои с толщиной 50...150 мкм, сформированные при незначительной энергии импульса, являются наиболее качественными. Из проведенных авторами исследований [3] видно, что увеличение толщины слоя чугунного покрытия вызывает появление трещин, которые по мере утолщения слоя еще больше увеличиваются, образуют сетку, проявляющуюся на поверхности при увеличении энергии импульса. Наличие таких трещин делает покрытие хрупким, дефектным, нарушает его защитные и эксплуатационные свойства.

Толщина покрытия определяется объемом металла электрода, расплавленным под действием энергии единичного импульса  $A_{и}$ , перенесенным на поверхность заготовки и за счет адгезии прочно закрепившимся на ней в виде

капли. Долю энергии импульса, затрачиваемую на образование капли расплавленного металла, без учета потерь на теплопередачу, можно определить из уравнения теплового баланса.

Масса расплавленного металла электрода определяется через объем капли, осажденной на поверхности заготовки. Согласно теории электроэрозионной обработки [4], высота капли после соприкосновения с поверхностью заготовки определяет предельную толщину сформированной части покрытия и составляет около  $1/3$  диаметра капли  $d$ , а получение качественного, сплошного слоя покрытия достигается при перекрытии соседних капель на  $(1/3...1/4) d$ . Объем капли  $V$ , мм<sup>3</sup> и ее масса  $m_k$ , г определяют по формуле [3]

$$V = \frac{31}{24} \pi H^3; \quad (1)$$

$$m_k = \rho V = \frac{31}{24} \pi \rho H^3, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала анода – чугуна, г/мм<sup>3</sup>;  $H$  – толщина одного слоя качественного защитного покрытия, мм.

Определив массу капли (2), рассчитывают количество тепла  $Q_1$ , затрачиваемое на нагрев и плавление металла:

$$Q_1 = \frac{31\pi H^3 c \rho (t_2 - t_1)}{24}. \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{C U_0^2 f \Psi a}{2}, \quad (4)$$

где  $t_1 = 300$  К – температура окружающей среды (температура флюса);  $t_2 = 1600$  К – температура капли (принятая на  $50...100$  К выше температуры плавления материала электрода – чугуна);  $C$  – удельная теплоемкость материала анода, Дж/г·К;  $Q_2$  – количество тепла, полученное электродом в результате действия единичного импульса, кал.;  $a$  – объем металла, расплавленного одним или несколькими импульсами с энергией 1 Дж;  $f$  – частота следования импульсов, вызывающих расплавление металла детали;  $\Psi$  – коэффициент эффективности, где  $\Psi = \frac{f}{f_{ги}}$  ( $f_{ги}$  – частота импульсов, вырабатываемых генератором, Гц).

Потери тепла при разрядах учитываются коэффициентом  $\Psi$ . В первом приближении коэффициент  $\Psi$  адекватен коэффициенту полезного действия электроэрозионного процесса. По [4] коэффициент  $\Psi$  может быть принят равным 0,41.

Принимая  $Q_1 = Q_2$ , находим основной режимный параметр процесса покрытия – емкость конденсаторов RC-генератора:

$$C = \frac{31\pi H^3 c \rho (t_2 - t_1)}{12U_0^2 f \Psi a}. \quad (5)$$

Зная, что приращение температуры электрода определяется в зависимости от энергии импульса, рассчитаем значения этого параметра. По [4] предельная энергия импульса, обеспечивающая получение качественного покрытия составляет  $2...2,5$  Дж. В данном случае расчет энергии импульса  $A_{и}$ , дал значения  $A_{и} = 0,01...0,5$  Дж.

По энергии импульса можно рассчитать и назначить остальные режимы нанесения покрытия и оценить технологические возможности применяемой установки (генератора импульсов).

Согласно рекомендациям [4], напряжение генератора принимают в диапазоне  $U_0 = 80...120$  В, а напряжение пробоя определяют из соотношения  $U_{ср} \approx (0,5...0,75) U_0$ .

Для расчетной энергии импульса и рекомендуемой величины напряжения, диапазон емкостей составил –  $2,5...16,25$  мкФ.

При выборе рабочего диапазона емкостей необходимо учитывать, что повышение емкости свыше 20 мкФ способствует заметному снижению твердости сформированного слоя покрытия [5]. Если проанализировать роль этого параметра с точки зрения обеспечения максимальной толщины слоя, емкость конденсаторов, применяемых для нанесения чугунного покрытия на алюминиевые сплавы при  $A_{и} = 0,1...0,5$  Дж и напряжении пробоя  $U_{ср} = 50$  В, должна изменяться в диапазоне  $5...10$  мкФ.

На следующем этапе, по данным, приведенным в паспорте установки, выбирается сила рабочего тока и тока короткого замыкания, связанных соотношением  $I_{ср} = 0,5 I_{кз}$  [4]. Тогда  $I_{ср} = 0,5...7,8$  А;  $I_{кз} = 1,0...15,6$  А. При повышении значения тока  $I_{ср} > 5,0$  А на поверхности катода формируются более толстые слои ( $100...300$  мкм), но при этом их качественные характеристики (сплошность, равномерность, плотность и т.п.) резко снижаются, появляются растрескивания, прижоги. Поэтому  $I_{ср}$  ограничивают 5,0 А.

Значение сопротивления токоограничивающего резистора  $R$  находится по формуле

$$R = \frac{U_0}{I_{кз}}. \quad (6)$$

Расчетная величина сопротивления резистора составила:  $R_{\min} = 2,13 \text{ Ом}$ ;  $R_{\max} = 12 \text{ Ом}$ . Для условий электроэрозионного нанесения чугунного покрытия на алюминиевую поверхность эффективное значение сопротивления токоограничивающего резистора при  $I_{\text{кз}} = 4 \text{ А}$ ,  $U_0 = 100 \text{ В}$  ( $U_{\text{ср}} = 50 \text{ В}$ ) составляет  $R = 2,5 \text{ Ом}$ .

Частота следования импульсов  $f$  для генераторов с RC-схемой составляет  $f_{\min} = 167 \text{ Гц}$ ;  $f_{\max} = 6,7 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ . Согласно техническим характеристикам установки ЭФУ25 рабочий диапазон частоты следования импульсов  $f = 100 \dots 10\,000 \text{ Гц}$ .

Период повторения импульсов ( $\tau_0$ ) рассчитывается по формуле

$$\tau_0 = \frac{1}{f}. \quad (7)$$

Определив диапазон значений  $\tau_0 = 100 \dots 10\,000 \text{ мкс}$ , можно оценить длительность импульса  $\tau_{\text{и}}$ , приняв во внимание рекомендуемое в [4] соотношение  $\tau_{\text{и}} = (0,5 \dots 0,9)\tau_0$ . Оптимальная длительность импульса для каждого режима назначается по максимальному переносу материала катода. Для мягких режимов, на которых происходит нанесение слоя чугуна на алюминиевую основу, длительность импульса принимается  $\tau_{\text{и}} = 100 \dots 1000 \text{ мкс}$ . При уменьшении длительности импульса уменьшается количество жидкого и размягченного материала на аноде, вступающего во взаимодействие с материалом катода во время контакта электродов. При увеличении  $\tau_{\text{и}}$  наблюдается спад привеса катода за счет перегрева и выброса расплавленного металла анода за пределы зоны взаимодействия электродов [6].

Как правило, расчетные значения режимов нанесения покрытий для RC-генераторов требуют корректировки, которая выполняется в ходе отработки режимов. В качестве ограничивающего фактора при этом выступает возможность появления микротрещин, пор и других дефектов в формируемом слое покрытия и в обрабатываемом материале.

Другим важным показателем качества является сплошность сформированного слоя покрытия. Она обеспечивается сочетанием режимов с правильным выбором скорости перемещения электрода-инструмента. Согласно рекомендациям [3, 5, 6], диапазон скоростей перемещения электрода-инструмента составляет  $v_s = 50 \dots 200 \text{ мм/мин}$ .

Максимальная сплошность покрытия достигается при перекрытии соседних капель осажденного металла на  $(1/3 \dots 1/4) d$ . Приняв

средний диаметр капли  $d_{\text{ср}} = 75 \dots 400 \text{ мкм}$ , по известному значению скорости подачи электрода-инструмента можно рассчитать удельное время (длительность покрытия единицы площади детали) обработки, которое с учетом числа проходов (до  $n = 3$ ) составляет  $T_0 = 0,6 \dots 10,2 \text{ мин/см}^2$ . Этот параметр не только в значительной степени определяет качество сформированного поверхностного слоя, но и является определяющим показателем эффективности протекания процесса электроэрозионного нанесения покрытия (ЭНП).

При определении удельного времени обработки в качестве основного критерия для оценки качества операции была выбрана сплошность формируемого покрытия близкая к 100 %. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что для каждого режима работы установки для электроэрозионного нанесения покрытий существует свое рациональное время обработки (нанесения покрытия). При выборе оптимального значения удельного времени обработки необходимо учитывать, что при применении этого показателя в диапазоне  $3 \dots 7 \text{ мин/см}^2$  толщина слоя (как и его качество) возрастает и достигает максимальной величины [6].

Дальнейшее увеличение удельного времени обработки (до  $12 \text{ мин/см}^2$  и выше) приводит к резкому возрастанию растягивающих напряжений [7], которые обуславливаются несплошностью слоя, высокой шероховатостью, наличием трещин и пустот, что снижает усталостную прочность детали, вызывает ограничение толщины сформированного слоя. При этом перенос материала покрытия сменяется эрозией уже нанесенного слоя. С учетом информации, приведенной в [8], оптимальное значение удельного времени нанесения покрытия на алюминиевую основу составляет  $T_0 = 1,25 \dots 5 \text{ мин/см}^2$ , что вполне согласуется с результатами расчетов и экспериментов. Именно при этих значениях удельной длительности процесса были получены слои, обладающие хорошей плотностью, высокой твердостью и низкой шероховатостью.

**Особенности построения технологического процесса ЭНП на детали из алюминиевых сплавов под слоем флюса.** Проведенные расчеты основных параметров режимов обработки, а также анализ особенностей процесса нанесения покрытия под слоем флюса и рекомендации по подбору материалов для изготовления детали, электрода-инструмента и подготовки флюса, показанные в [3, 6], по-

зволили разработать методику проектирования технологического процесса нанесения чугунового покрытия на алюминиевые сплавы под слоем флюса электроэрозионным методом.

Рассматриваются два основных этапа проектируемого процесса [8]: 1) подготовительный этап; 2) производственный этап, включающий этап нанесения на деталь покрытия, состоящий преимущественно из операций по формированию слоя покрытия электроэрозионным методом.

На *подготовительном этапе* осуществляется:

– выбор места нанесения покрытия на деталь, определение марки материала покрытия;

– отработка технологичности конструкции детали, в процессе которой, необходимо учесть: характер производства, габариты деталей, физико-механические свойства алюминиевых сплавов, особенности их поведения в процессе нанесения покрытия, уточнить технические требования к покрытиям. Применение деталей с защитой от коррозии нанесением поверхностных слоев из чугуна наиболее эффективно для электродов при электрохимической обработке в щелочных средах и в средах содержащих хлористые соединения, в которых алюминиевые сплавы быстро разрушаются, хотя они весьма технологичны по другим показателям;

– отработка геометрии детали с учетом дальнейшей обработки. Рассчитывают припуск на последующую обработку и толщину качественного слоя, исходя из которых уточняют размеры поверхности, намеченной к нанесению покрытия;

– выбор и подготовка средств технологического оснащения. Как правило, все устройства, применяемые в процессе изготовления детали, могут быть отобраны из числа используемых в условиях серийного производства. При этом при небольших размерах деталей не требуется подбора подъемно-транспортных устройств, что значительно упрощает состав оборудования и уменьшает стоимость его изготовления;

– выбор электрода-инструмента. Для нанесения покрытия рекомендуется использовать стержневой электрод из чугуна. Эксплуатационные свойства таких покрытий, помимо физических, механических и химических характеристик применяемого материала электрода, зависят от обоснованности выбора режимов и совершенства технологического процесса. При этом, кроме структуры, свойств и хими-

ческого состава материала полученного покрытия важными критериями являются сплошность и равномерность покрытия, его толщина, глубина диффузионного слоя, обеспечивающая прочное сцепление покрытия с основой и др.;

– выбор рабочей среды, определение ее состава. Совместимость материала электрода и рабочей среды является важным фактором, определяющим не только эффективность процесса, но и возможность его проведения. Во многих работах была отмечена зависимость характера нанесения материала анода на катод от химического взаимодействия материала электрода с элементами межэлектродной среды. Авторами статьи предложено при нанесении покрытий на алюминиевые сплавы электроэрозионным методом в качестве рабочей среды использовать флюс марки ФС-71 [3], обладающий активирующими свойствами. Флюс вступает в реакцию с поверхностной оксидной пленкой  $Al_2O_3$ , разрушает ее, частично растворяет и удаляет в виде взвеси, очищая, таким образом, поверхность заготовки от пленки, которая не только препятствует стабильному протеканию процесса, но часто является основной причиной термического разрушения поверхности катода;

– установка режимов электроэрозионного нанесения слоя покрытия [4, 8]. Определяют минимальное количество слоев, необходимое для формирования покрытия требуемого качества. При этом рекомендовано наносить до 3-х слоев. Следует учесть, что нанесение уже второго слоя вызывает рост шероховатости, хотя повышает жаростойкость и сплошность сформированного покрытия;

– далее выполняется построение технологического процесса и изготовление по нему (второй этап проектирования) детали из алюминиевого сплава с покрытием из чугуна.

На базе маршрута, приведенного выше, создана методика, учитывающая особенности проектирования технологического процесса, которая включает:

– контроль деталей в целом и поверхностей, подлежащих обработке. Устанавливается возможность обработки, определяется значение размера поверхности после покрытия, проверяется расхождение получаемого размера с покрытием относительно заданного в чертеже, определяется обоснованность применения рассматриваемого покрытия;

– в случае положительного результата осуществляется подготовка поверхности заготовки под нанесение покрытия. При подготовке по-

верхности большое внимание необходимо уделить ее очистке от загрязнений, краски, жиров и масел, которую проводят с помощью обезжиривания и травления. Очистке подлежит и участок, примыкающий к обрабатываемой поверхности, шириной 25...30 мм. При этом использование для очистки абразивных инструментов не допускается, так как выкрошившиеся абразивные частицы, внедряясь в поверхность, могут образовывать различные включения, которые отрицательно сказываются на качестве сформированного покрытия.

Кроме того, применение для очистки механических методов обработки приводит к возникновению наклепа, характеризующегося повышенным напряженным состоянием поверхностных слоев заготовки, который не только снижает эффективность процесса электроэрозионного нанесения покрытий, но и снижает твердость и адгезию сформированного покрытия.

Обезжиривание проводится органическими растворителями: бензином, ацетоном. Обезжиренные детали промывают в теплой воде (температура не ниже 298 К) и протирают жесткой волосяной щеткой. Травление проводят в 15 %-ном водном растворе азотной кислоты при температуре 333...338 К в течение 2...5 мин или в 30 %-ном водном растворе азотной кислоты при температуре 293...298 К в течение 1...2 мин для нейтрализации остатков щелочи, после чего детали промывают в теплой воде;

– на следующем этапе деталь протирают и сушат при температуре 333 К до окончательного удаления влаги. Здесь же производят визуальный контроль отсутствия грязи и масла и, в случае обнаружения дефектов, обезжиривание и промывка выполняются повторно;

– приготовление флюса и его нанесение на обрабатываемую поверхность. Состав флюса должен соответствовать следующим значениям: порошок флюса ФС-71 – 50 % масс.; этиловый спирт  $C_2H_5OH$  – 50 % масс. Нанесение приготовленного флюса на обрабатываемую поверхность осуществляется покрытием равномерным сплошным слоем толщиной 0,2...0,3 мм.

– при контроле опытного образца оценивают характеристики покрытия и эффективности процесса. На основании результатов, полученных при отладке процесса, производится корректировка режимов и выносится решение о запуске процесса в серийное производство;

– режимы обработки при электроэрозионном нанесении чугунного покрытия зависят от

марки сплавов и условий эксплуатации деталей с покрытием. Для наиболее употребляемого покрытия из чугуна СЧ-20 при нанесении на алюминиевый сплав Д16 рекомендуются режимы:  $A_{и} = 0,1...0,5$  Дж;  $U_{ср} = 50...60$  В;  $I_{кз} = 3...5$  А;  $\tau_{и} = 10^2...10^3$  мкс; скорость подачи электрода-инструмента  $v_э = 50...200$  мм/мин; количество слоев до  $n = 3$ ; время, необходимое для формирования покрытия требуемой толщины, 3...5 мин/см<sup>2</sup>.

– для удаления остатков флюса и шлаков требуется промывка детали. Флюсы следует устранять непосредственно после завершения процесса нанесения покрытия (не позднее чем через 1 ч путем промывания поверхности с покрытием и примыкающего к ней основного металла проточной горячей водой 333...353 К с помощью волосяной щетки. После этого деталь промывают 2 %-ным водным раствором хромового ангидрида той же температуры 333... 353 К, а затем вновь горячей проточной водой. Промытые детали сушат при температуре 387...453 К или горячим воздухом при 333...383 К до полного удаления влаги;

– контроль качества промывки выполняют с применением 2 %-ного раствора азотнокислого серебра. При попадании капель этого раствора на недостаточно очищенную от флюса поверхность образуется хорошо видимый белый осадок. В этом случае промывку следует повторить. При многослойном нанесении покрытий необходимо проводить промывку каждого слоя покрытий в горячей воде с последующей тщательной просушкой и окончательной промывкой в водном растворе хромового ангидрида;

– контроль качества покрытия выполняется визуальным осмотром для выявления загрязнений, внешних видимых дефектов – трещин, прижогов и др., инструментальными приемами – контроль качества поверхностного слоя, толщины и сплошности покрытия. Критериями годности обычно принимается сплошность не ниже 75...95 %, толщина слоя более 20 мкм;

– для устранения внутренних напряжений с целью повышения прочности, коррозионной стойкости, улучшения адгезионных свойств покрытий, полученных электроэрозионным методом, может выполняться термическая обработка, которая полностью или частично снимает остаточные напряжения, возникающие в результате действия импульсного термического разряда, а также повышает механические свойства материала путем улучшения структуры металла покрытия и прилегающей

к нему зоны. Например остаточные напряжения силуминов снимают отжигом при температуре 573...623 К с выдержкой в печи в течение 2...5 ч. Термическая обработка алюминиевых деталей рекомендуется, если она не вызывает чрезмерных деформаций и коробления.

– после внешнего осмотра покрытия измеряют глубину неровностей на покрытии и для такого припуска назначают механическую обработку. Покрытие может формироваться в виде отбеленного чугуна, обладающего высокой твердостью. В этом случае окончательная обработка выполняется шлифованием, в остальных случаях может использоваться более производительный лезвийный твердосплавный инструмент или электроабразивная обработка; – при наличии несплошности покрытия, площадь которой превышает 5...25 % поверхности, целесообразно восстанавливать качество изделий из немагнитных материалов путем нанесения композиции с наполнителем. Отличительная особенность описанного способа заключается в том, что в качестве наполнителя используют мелкодисперсный магнитный порошок и композицию, которые выдерживают в магнитном поле до заполнения местных дефектов. Таким образом, в результате заполнения различных дефектов, пор, трещин (в случае их возникновения), впадин и углублений обеспечивается не только достижение сплошности покрытия, но и происходит полезное выравнивание поверхностного слоя.

В отличие от таких способов восстановления сплошности как герметизация, нанесение лаков, клеев, эпоксидных компаундов, содержащих в качестве наполнителя различные порошки, предложенный способ обеспечивает высокую надежность и работоспособность поверхностных слоев в условиях знакопеременных нагрузок, вибраций и при высоких давлениях рабочих сред, что особенно важно учитывать при проектировании и изготовлении средств технологического оснащения для электрохимической обработки, работающих в условиях кавитационного течения рабочей жидкости.

Кроме того, предлагаемый способ обеспечивает более эффективное заполнение глубоких пор, трещин, дефектов, что позволяет гарантировать их сплошность, исключить отслаивание и повысить качество рабочих поверхностей. Глубокое проникновение композиции в узкие щели и другие дефекты обеспечивает сочетание высокой текучести компози-

ции из герметика с плотным заполнением углублений мелкодисперсным магнитным порошком под воздействием магнитного поля.

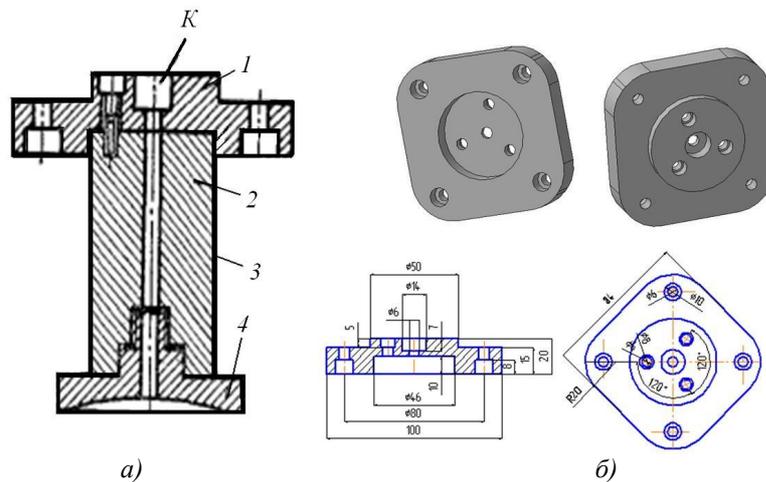
Процесс восстановления сплошности осуществляется по следующей технологии: поверхность заготовки (деталь с покрытием, нанесенным электроэрозионным методом) обезжиривают ацетоном с последующей сушкой. Наносят на поверхность заготовки полимерную композицию, состоящую из анаэробного герметика и наполнителя, при следующем соотношении компонентов: герметик – 50 %, мелкодисперсный магнитный порошок – 50 %. Создают магнитное поле в зоне обработки и композицию выдерживают в магнитном поле до заполнения ею дефектов. Снимают поле, удаляют избытки композиции с поверхности, после чего сушат на воздухе при температуре 288...308 К в течение 24 ч. После сушки удаляют неотвержденную композицию ацетоном с последующей сушкой при температуре 323...333 К в течение 4 ч.

На рис. 2 приведены чугунный электрод-инструмент и алюминиевая деталь, предназначенная для использования в электрохимических станках при работе в среде защелоченного электролита. При этом с электролитом контактирует только кольцевая поверхность вокруг выступа. Деталь на рис. 2 из материала ВД17 проходит перед покрытием механическую обработку, контроль точности геометрических размеров и взаимного расположения поверхностей, после чего выполняют нанесение на поверхность со стороны выступа двух слоев чугунного покрытия из СЧ20 с общей толщиной 0,4±0,1 мм. После этого покрытие шлифуется с удалением припуска 0,2...0,22 мм и устанавливается в станке.

Использование алюминиевых деталей с покрытием позволяет (по сравнению с нержавеющими) более чем в 2 раза увеличить количество подводимого в зону обработки технологического тока, снизить потери подводимой для обработки энергии и за счет повышения плотности тока улучшить качество поверхностного слоя.

### Заключение

Результаты апробации разработанного технологического процесса изготовления детали из алюминиевого сплава с чугунным покрытием, наносимым электроэрозионным методом, показали, что удастся достичь сплошности слоя покрытия до 100 %. Это доказывает эффективность применения таких покрытий в инструментальном и серийном производстве.



**Рис. 2. Сборный электрод-инструмент и заготовка алюминиевой детали с покрытием чугуном:**

*а* – конструкция электрода-инструмента: 1 – фланец для крепления электрода-инструмента, осуществления токоподвода и подачи электролита; 2 – переходник; 3 – диэлектрическое покрытие; 4 – рабочая часть (К – накопительная камера для электролита); *б* – внешний вид и основные размеры детали фланца

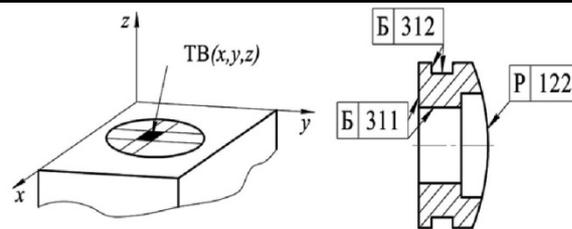
## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2405662 РФ, В23Н. Способ нанесения чугуно-го покрытия на алюминиевые сплавы / Смоленцев В.П., Гребенщиков А.В., Перова А.В., Омигов Б.И. № 2009116031; заявл. 27.04.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34.
2. Пат. 2318637 РФ, В23Н. Способ электроэрозионно-го восстановления чугунных деталей / Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Дульцев С.В., Щипанов М.В. № 2006113860; заявл. 24.04.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7.
3. Перова А.В., Смоленцев В.П. Механизм нанесения покрытий на алюминиевые сплавы электроэрозионным методом // Известия ОрелГТУ. 2008. №4-4/272(550). С. 8–12.
4. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
5. Электроискровое легирование деталей, работающих в условиях термоциклического нагружения / В.И. Андреев, В.Н. Морозенко, Н.И. Беда и др. // Электронная обработка материалов. 1973. № 2. С. 23–25.
6. Формирование покрытий на алюминиевых сплавах методом электроэрозионного легирования / А.В. Перова, В.П. Смоленцев, А.С. Грибанов // Авиакосмические технологии «АКТ–2008»: тр. IX Всерос. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов, Воронеж: ВГТУ, 2008.
7. Исследование износостойкости электроискровых покрытий на основе твердых сплавов / В.Ю. Ширияев, Ю.С. Шатунов, С.Н. Коробейников, П.А. Петренко // Современная электротехнология в промышленности центра России: сб. тр. Тула: ТулГУ, 2004. С.183–189.
8. Смоленцев В.П. Электроэрозионная обработка. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-3 / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2000. 840 с.

## REFERENCES

1. Pat. 2405662 RF, B23H. Method for Cast Iron Coating on Aluminum Alloys / Smolentsev V.P., Grebenshchikov A.V., Perova A.V., Omigov B.I. № 2009116031; declared 27.04.2009; published 10.12.2010, Bulletin № 34.
2. Pat. 2318637 RF, B23H. Method for electroerosion restoration of cast iron parts / Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Dultsev S.V., Shchipanov M.V. № 2006113860; declared 24.04.2006; published 10.03.2008, Bulletin № 7.
3. Perova A.V., Smolentsev V.P. Mechanism for aluminum alloy coating by electroerosion method // *Proceedings of OrelSTU*. 2008. №4-4/272(550). pp. 8–12.
4. Smolentsev E.V. *Designing electric and combined methods of processing*. M.: Mechanical Engineering, 2005. pp. 511.
5. Spark alloying of parts operating under conditions of thermo-cyclic loading / V.I. Andreyev, V.N. Morozenko, N.I. Beda et al. // *Material Electronic Processing*. 1973. № 2. pp. 23–25.
6. Coating formation on aluminum alloys by method of electroerosion alloying / A.V. Petrova, V.P. Smolentsev, A.S. Griбанov // *Aerospace Techniques “AST–2008”: Proceedings of the IX-th All-Russian Scientific Technical Conf. and School of Young Scientists, Post graduate students and Students, Voronezh: VSTU, 2008*.
7. Investigations of spark coatings durability based on hard metals / V.Yu. Shiryaev, Yu.S. Shatunov, S.N. Korobeynikov, P.A. Petrenko // *Current electro-technology in industry of Central Region of Russia: Proceedings of TulsU*. Tula: 2004. pp.183–189.
8. Smolentsev V.P. *Electroerosion Processing. Mechanical Engineering. Encyclopedia*. Vol. III-3 / under the editorship of A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2000. pp.840.

Рецензент д.т.н. А.И. Болдырев



УДК 621.8  
DOI: 10.12727/18098

**В.Ф. Безъязычный, д.т.н.**  
(Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П. А. Соловьёва, Россия, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53)  
E-mail: root@rsatu.ru

## **Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин на стадии подготовки производства**

*Изложена взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя обработанной поверхности с технологическими условиями обработки, а также расчётное определение эксплуатационных свойств деталей машин: усталостной прочности, износостойкости, прочности прессовых соединений.*

**Ключевые слова:** режимы резания; свойства материалов деталей машин; качество поверхностного слоя; эксплуатационные свойства.

**V.F. Bezyazychny, D.Eng.**  
(Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk,  
53, Pushkin Str., Rybinsk, Russia)

## **Technological support of machinery performance attributes**

*The relation of quality parameters in a surface layer of the surface worked with technological conditions of processing is stated, and also a computation definition of machinery performance attributes: fatigue resistance, durability, strength of press-fit connections are shown.*

**Keywords:** cutting modes; material properties of parts; surface layer quality; performance attributes.

Для управления качеством поверхностного слоя с целью обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин целесообразно иметь расчётные зависимости между параметрами, характеризующими качество поверхностного слоя, и условиями их механической обработки. Наиболее обобщёнными являются теоретические зависимости, полученные на основе учёта одновременного воздействия на поверх-

ностный слой силы и температуры в зоне обработки. В связи с этим установлена функциональная связь между режимами резания, геометрией инструмента и параметрами качества поверхностного слоя и точности обработки с учётом свойств обрабатываемого и инструментального материалов, жесткости технологической системы:

$$(t, S, v, r, \varphi) = f \left( \sigma_{\text{ост}}, h_n, Rz, T_p, \sigma_T, E_d, \tau_p, \mu, \beta_d, \beta_n, \lambda_{\text{ст}}, a, \lambda_d, \lambda_p, \right. \\ \left. c_p, \theta_{\text{пл}}, \gamma, \alpha, \varphi, \rho_1, \rho_1, j_{\text{сист.}}, B_1, H_1, L_p, H, \alpha_1, \alpha_p \right), \quad (1)$$

где  $T_p$  – допуск на обеспечиваемый при обработке размер;  $\beta_d$  и  $\beta_i$  – коэффициенты линейного расширения обрабатываемого и инструментального материалов;  $E_d$  и  $\tau_p$  – модуль упругости и сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, соответственно;  $\lambda_d$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов;  $\theta_{пл}$  – температура плавления обрабатываемого материала;  $\alpha$  и  $\gamma$  – задний и передний углы режущего инструмента;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы режущей части инструмента в плане;  $\rho_1$  – радиус округления режущей кромки резца;  $B_1$  и  $H_1$  – ширина и высота сечения державки резца;  $L_p$  – длина выступающей части резца из суппорта;  $H$  – размер обрабатываемой детали;  $\lambda_{ст}$  – теплопроводность материала державки инструмента;  $\alpha_1$  и  $\alpha_p$  – коэффициенты теплопередачи обрабатываемого материала и материала державки инструмента;  $j_{сист}$  – жесткость технологической системы;  $ср$  – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого материала;  $S$  – подача (скорость перемещения инструмента);  $t$  и  $v$  – глубина и скорость резания;  $r$  – радиус при вершине резца в плане;  $\sigma_{ост}$  – величина остаточных напряжений на заданном уровне от поверхности детали;  $h_n$  – степень наклепа материала поверхностного слоя;  $Rz$  – высота неровностей на поверхности детали;  $\delta$  – высота фаски износа на задней поверхности режущей части инструмента;  $a$  – температуропроводность обрабатываемого материала;  $\sigma_T$  – предел текучести материала обрабатываемой детали.

Таким образом, режимы резания и геометрия инструмента являются функцией характеристик поверхностного слоя обрабатываемой детали, точности обработки, свойств обрабатываемого и инструментального материалов, размеров обрабатываемой детали и режущего инструмента, жесткости технологической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка».

Если в процессе обработки необходимо обеспечить требуемое качество поверхностного слоя, целесообразно определять режимы резания, обеспечивающие в зоне резания оптимальную температуру, работа при которой даёт минимальный относительный размерный износ, а, следовательно, максимальную стойкость режущего инструмента. Скорость резания, соответствующая оптимальной температуре, называется оптимальной и может быть определена расчётом по формуле, полученной

на основе теоретического анализа физических явлений, обусловленных процессом резания [1]:

$$v_0 = \frac{K^2 \lambda_d c p a_1 b_1^2 \left(\frac{a_1}{\rho_1}\right)^{0,2}}{4 \sin^{0,1} \alpha} \left(\frac{\theta}{P_Z}\right)^2 \times \left[ 1 + \frac{2,65 \lambda_p \beta \varepsilon \left(\frac{a_1}{b_1}\right)^{0,3} P_Z}{K^2 a_1 b_1 \lambda_d c p \left(\frac{a_1}{\rho_1}\right)^{0,025} \sin^{0,065} \alpha \cdot \theta} \right], \quad (2)$$

где  $P_Z$  – сила резания;  $\theta$  – температура в зоне резания;  $K$  – коэффициент, зависящий от скорости резания и подачи, а также свойств обрабатываемого материала;  $a_1$  и  $b_1$  – толщина и ширина среза в зоне резания;  $\rho_1$  – радиус округления режущей кромки инструмента;  $\beta$  и  $\varepsilon$  – угол заострения и угол при вершине резца в плане.

Работа при оптимальной скорости резания обеспечивает наиболее благоприятные параметры качества поверхностного слоя. Так, при оптимальной скорости резания наблюдается минимальная высота неровностей обработанной поверхности и максимальное значение контактной жесткости, что соответствует минимуму сближения контактирующих поверхностей под нагрузкой (рис. 1).

При обработке на оптимальных режимах резания наблюдается минимум износа обработанной поверхности. Исследование проводилось при трении качения под нагрузкой 1470 Н (рис. 2). Такая закономерность объясняется тем, что при оптимальной скорости резания обработанная поверхность имеет наиболее равномерное распределение неровностей (рис. 3).

Для управления формированием поверхностного слоя обрабатываемой детали были получены расчётные зависимости для определения остаточных напряжений в поверхностном слое  $\sigma_{ост}$ , степени  $N$  и глубины налёпа  $h_n$ , параметров шероховатости поверхности  $Rz$  и др. Примеры некоторых из них приведены ниже.

Так например, осевые остаточные напряжения в поверхностном слое, обу-

словленные тепловым воздействием  $\sigma_{0,ост}$ , при  $\gamma > \gamma_{ог}$  и  $\sigma_{0,0 \max} < 2\sigma_T$  определяются по формуле

$$\sigma_{0,ост} = -\sigma_T + \left\{ \left( \frac{r_H - r + a_1}{a_1} \right)^{X_2} + \frac{2}{a_1^{X_2} (r_H^2 - r_B^2)} \left\{ \frac{r_H + a_1}{1 + X_2} [a_1^{1+X_2} - (r_H - r_B + a_1)^{1+X_2}] - \frac{1}{2 + X_2} [a_1^{2+X_2} - (r_H - r_B + a_1)^{2+X_2}] \right\} \right\} \frac{\beta_d A_1 E_d}{1 - \mu}$$

где  $r$  – радиус детали от центра, в котором определяются значения остаточных напряжений;  $r_H$  и  $r_B$  – наружный и внутренний радиусы обрабатываемой детали;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала детали;  $A_1$  и  $X_2$  – величины, определяемые технологическими условиями процесса обработки [2].

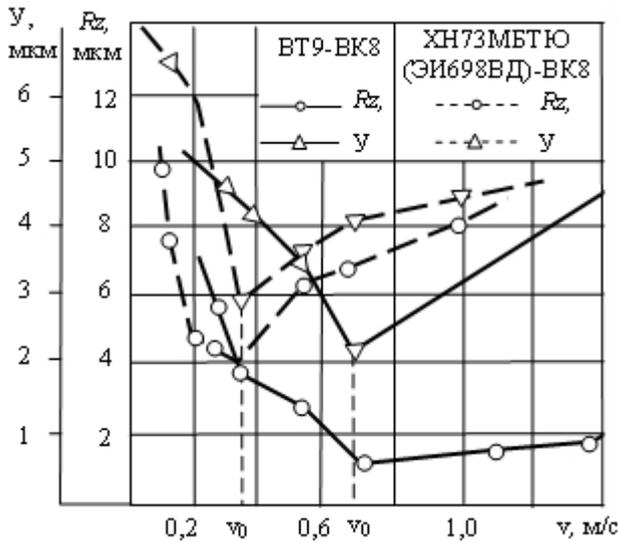


Рис. 1. Зависимость сближения контактирующих поверхностей  $Y$  от скорости резания при их обработке. Усилие загрузки  $P = 1470$  Н. При обработке сплава BT9:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $r = 1$  мм,  $S = 0,2$  мм/об; при обработке сплава XH73MBTЮ те же условия, кроме  $\gamma = 10^\circ$

$$A_1 = C_0 \theta_A (BB)^{X_1} \left( \frac{\rho_1}{a_1} \right)^{X_3 - d} \sin \alpha^{0,05 - 0,042 X_4} \sin \gamma^{-0,021 X_4}$$

где  $B = \frac{va_1}{a}$  – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень влияния на температуру в поверхностном слое режимных условий обработки по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала;

$B = \frac{1}{tg\beta_1}$  – безразмерный комплекс, характеризующий степень пластических деформаций материала снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига;  $C_0, X_1, X_3, X_4$  и  $d$  – величины, зависящие от технологических условий обработки [2].

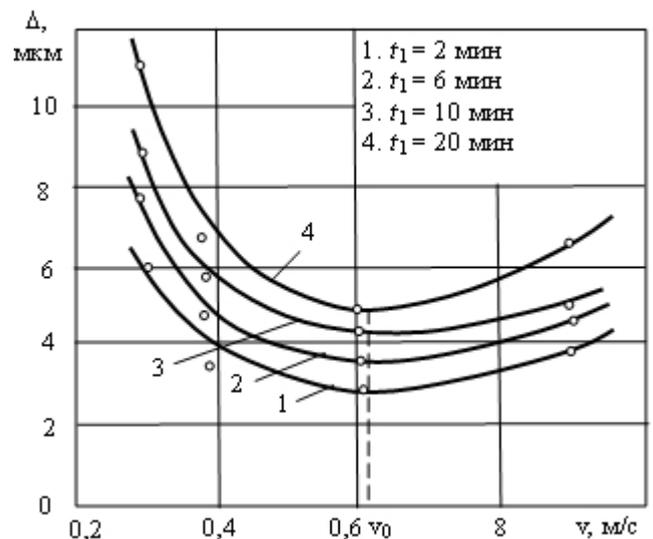


Рис. 2. Зависимость величины износа от скорости резания при точении сплава BT9:  $S = 0,2$  мм/об;  $t = 2$  мм;  $r = 0,5$  мм;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $\rho_1 = 30$  мкм. Резец из BK8.  $\Delta$  – величина износа обработанной поверхности;  $t_1$  – время трения

Глубина наклёпа обработанной поверхности, как доказано рядом исследований [3], определяется глубиной залегания пластических деформаций в поверхностном слое. Следовательно, глубина наклёпа в поверхностном слое определяется из условия равенства

$$\sigma_y + \sigma_H = -\sigma_T,$$

где  $\sigma_y$  – напряжения, обусловленные силовым воздействием на поверхностный слой;  $\sigma_H$  –

напряжения, обусловленные тепловым воздействием на поверхностный слой.

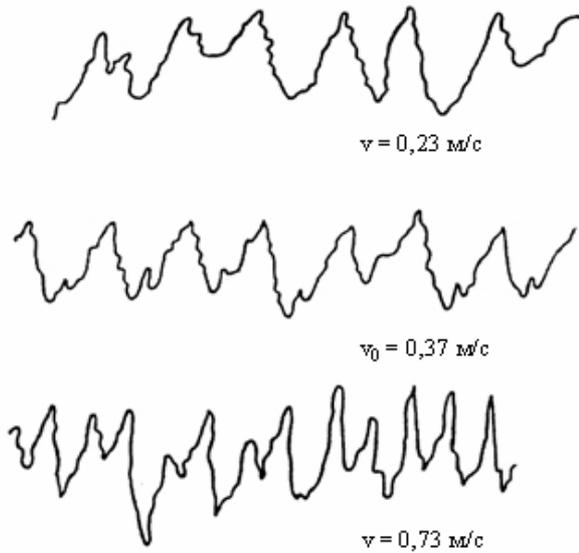


Рис. 3. Профилограммы шероховатости обработанной поверхности при точении сплава ХН77ТЮР резцом из ВК8:  $S = 0,2$  мм/об;  $t = 2$  мм;  $r = 0,5$  мм;  $\rho_1 = 30$  мкм,  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\gamma = \alpha = 10^\circ$ . Увеличение вертикальное – 2000, горизонтальное – 80

$$\sigma_y = \left[ \frac{\tau_p}{2\pi} \cdot \psi \left( B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right) - \frac{\tau_p b}{2\pi b_1 \cos \alpha} E \left( \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1}; \gamma \right) \right] \times \frac{1}{1 - \mu^2};$$

$$\sigma_H = \frac{\beta_d A_1 E_d}{a_1^{X_2} (1 - \mu)} \left\{ - (r_H - r + a_1)^{X_2} + \frac{1}{0,5(r_{OH}^2 - r_B^2)} E_d \right\} \times$$

$$\times \left[ E_d (r_H - r_{OH} + a_1)^{1+X_2} \left( \frac{r_H - r_{OH} + a_1}{2 + X_2} - \frac{r_H + a_1}{1 + X_2} \right) + (r_H - r_B + a_1)^{1+X_2} \times \left( \frac{r_H + a_1}{1 + X_2} - \frac{r_H - r_B + a_1}{2 + X_2} \right) E_d \right] - \frac{0,5 a_1^{X_2} \sigma_T}{\beta_d A_1} (r_H^2 - r_{OH}^2) \Bigg\},$$

где  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу;  $h, \Delta, \Delta_1$  – размеры зоны пластически деформируемого материала в поверхностном слое;  $y$  – глубина рассматриваемого слоя от поверхности;  $r_{OH}$  – радиус, соответствующий границе раздела упругих и пластических деформаций в поверхностном слое при нагревании,  $r_{OH} = r_H - r = y$ .

Степень наклёпа на поверхности детали определяется по формуле

$$N = \frac{h_H}{1,25(\sigma_B / \sigma_{B0})^{0,8}},$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности обрабатываемого материала;  $\sigma_{B0}$  – предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон.

Если скорость резания изменяется от скорости наибольшего наростообразования  $v_{нар}$  до оптимальной  $v_0$ , то при

$$r \left[ 1 - \sqrt{1 - (S/2r)^2} \right] \leq t \leq r(1 - \cos \varphi) \quad \text{высота неровностей, мм:}$$

$$Rz = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{1}{\tau_p \left[ 1 + \frac{1}{B} + \text{tg}(\text{arctg} B - \gamma) \right]} \left[ \frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c \rho \theta \rho_1^{0,1} a^{0,43}}{v \lambda \sin^{0,165} \alpha} \times \left[ 2,85 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \epsilon a_1^{0,57} \rho_1^{0,075} \right] - \left[ -0,5 \tau_p \rho_1 b \left( \frac{\arccos \left( 1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}} \right) + a_2 B^{1-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right) \times \cos \alpha \right] \right\}^2.$$

Названные выше параметры качества поверхностного слоя, определяют эксплуатационные свойства для различных деталей (рис. 4).

С использованием предложенных ранее зависимостей для расчетного определения параметров качества поверхностного слоя получены зависимости для определения показателей эксплуатационных свойств деталей машин. Так, например, предел выносливости материала детали, обработанной лезвийным инструментом, определяется следующим образом:

– при точении  $\sigma_{-1} = m \cdot (\sigma_B / \sigma_{B0})^K \cdot Rz^{-0,05} \cdot h_H^{0,147} \cdot \sigma_{ост}^{-0,09}$ ;

– при фрезеровании  $\sigma_{-1} = n \cdot (\sigma_B / \sigma_{B0})^L \cdot Rz^{-0,067} \cdot h_H^{0,139} \cdot \sigma_{ост}^{-0,063}$ ,

где  $m, n, K, L$  – величины, зависящие от вида обработки [2];  $\sigma_B / \sigma_{B0}$  – отношение предела прочности обрабатываемого материала к пределу прочности электротехнической стали, принятой за эталон.

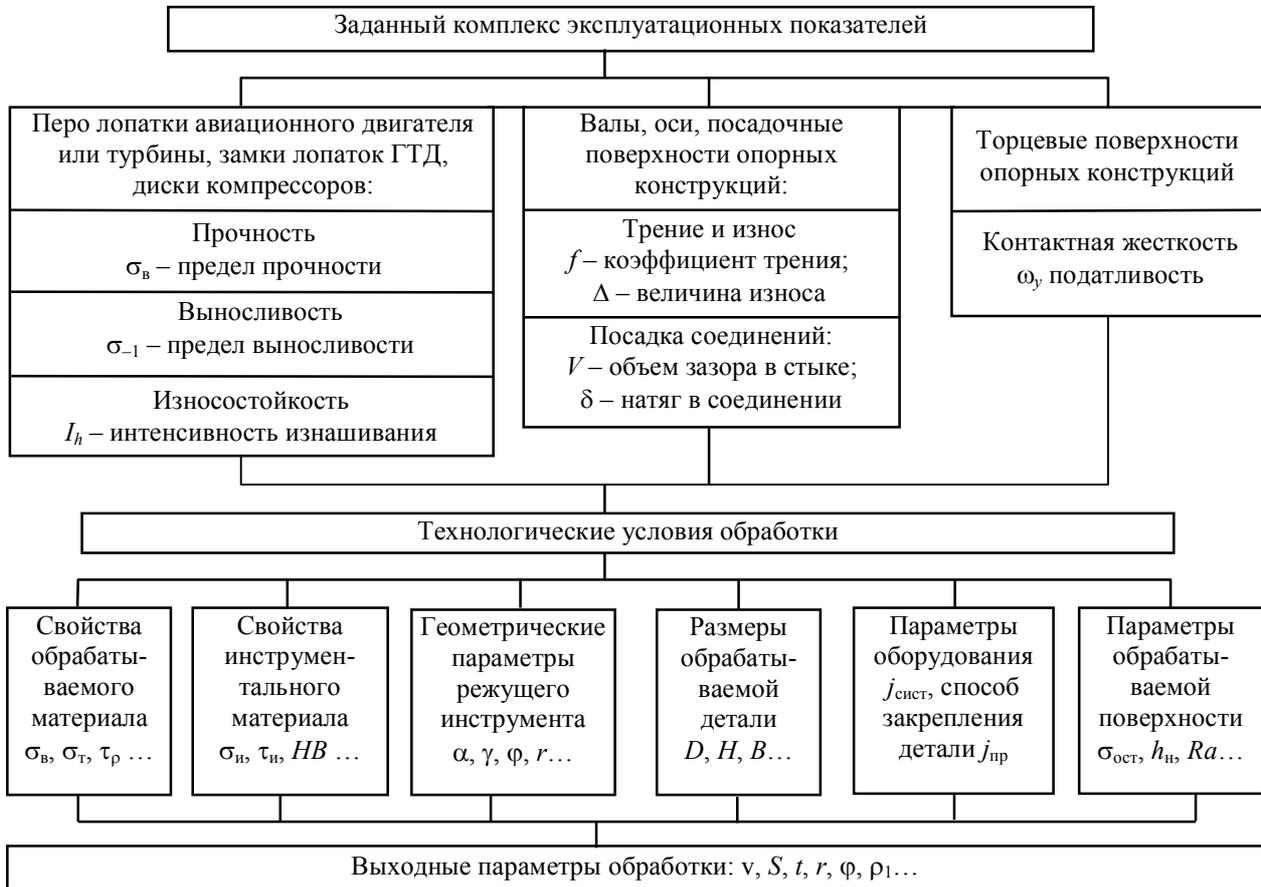


Рис. 4. Схема технологического обеспечения эксплуатационных показателей деталей ГТД

Интенсивность изнашивания обработанной поверхности при обработке с оптимальной скоростью резания:

$$J_h = \frac{0,0316 \cdot 3,7^{v+1} \alpha^{0,5} b Rz^{0,719-0,2(v+1)+5,2t_y}}{(v+1) \left( \frac{34,64\sigma_0}{Kf_m} \right)^{t_y} \left( \frac{N}{A_c} \right)^{0,323(v+1)+0,161-0,16t_y} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,161+0,84t_y-0,323(v+1)}}$$

где  $Rz$  – высота неровностей профиля контактной поверхности, мм;  $v$  и  $b$  – параметры кривой аппроксимации опорной поверхности;  $\sigma_0$  – действующее напряжение в зоне контакта сопрягаемых поверхностей, МПа;  $N$  – действующая нагрузка на контакт, Н;  $A_c$  – номинальная площадь, очерченная размерами соприкасающихся тел, мм<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала детали;  $E$  – модуль упругости материала, который быстрее изнашивается, Па;  $t_y$  – параметр кривой фрикционной усталости [3];  $K$  – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте (для хрупких материалов  $K = 5$ , для высокопластичных материалов  $K = 3$ );  $f_m$  – величина молекулярной составляющей коэффициента трения.

В общем случае:

$$J_h = 0,0316 \cdot 3,7^{v+1} \alpha_2^{0,5} b \times$$

$$\left\{ \frac{1}{8r} \times \left[ \frac{0,6625 a_1^{0,125} c p \theta_0 \times 4,3 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left( \frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075}}{\tau_p a^{-0,43} \sin^{0,05} \alpha v_0 t^{0,25} c_0 m^{0,74-n_0} \times b^{0,04} \rho_1^{n_0-0,1} (1-0,45 \sin \gamma)} \right] \right\}^{0,719-0,2(v+1)+5,2t_y} \times$$

$$\frac{1}{(v+1) \left( \frac{34,64 \sigma_0}{k f_m} \right)^{t_y} \left( \frac{N}{A_c} \right)^{-0,323(v+1)+0,161-0,16t_y} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,161+0,84t_y-0,323(v+1)}}.$$

Таким образом, интенсивность изнашивания поверхности является функцией условий ее обработки, а также свойств материала детали.

При выполнении соединений с натягом значения осевой силы  $P_0$  и крутящего момента  $M_{кр}$ , обеспечивающие прочность таких соединений, определяются по формулам:  
– при изготовлении соединяемых деталей из различных материалов:

$$P_0 = \pi \cdot l \cdot f_{oc} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{2(1+\mu_1) \cdot \left( \frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1} \right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1+\mu_2) \cdot \left( \frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2} \right)^2}},$$

$$M_{кр} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{кр} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{(1+\mu_1) \cdot \left( \frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1} \right)^2} + \frac{C_2 W_2}{(1+\mu_2) \cdot \left( \frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2} \right)^2}};$$

– при изготовлении соединяемых деталей из одного материала:

$$P_0 = \pi \cdot l \cdot f_{oc} \cdot \frac{2(1+\mu) \cdot \sigma_{0,2}^2}{\alpha^2} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}},$$

$$M_{кр} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{кр} \cdot \frac{(1+\mu) \cdot \sigma_{0,2}^2}{\alpha^2} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}},$$

где  $l$  – длина участка контакта сопрягаемых деталей;  $d$  – номинальный диаметр сопряжения;  $f_{oc}$  и  $f_{кр}$  – коэффициенты трения при запрессовке и запрессовке с кручением;  $\delta$  – величина номинального натяга;  $Rz_1$  и  $Rz_2$  – высота неровностей на контактируемых поверхностях;  $N_1$  и  $N_2$  – степени наклёпа на поверхностях сопрягаемых деталей;  $\sigma'_{0,2}$  и  $\sigma''_{0,2}$  – условные пределы текучести материалов сопрягаемых деталей;  $W_1$  и  $W_2$  – значения накопленной энергии в поверхностном слое материалов первой и второй сопрягаемых деталей;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей [2];  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, зависящие от размеров деталей и коэффициентов Пуассона материалов сопрягаемых деталей.

Предложена методика назначения технологических условий обработки, обеспечивающая требуемые эксплуатационные и технико-экономические показатели, структура которой показана на рис. 5 [4].

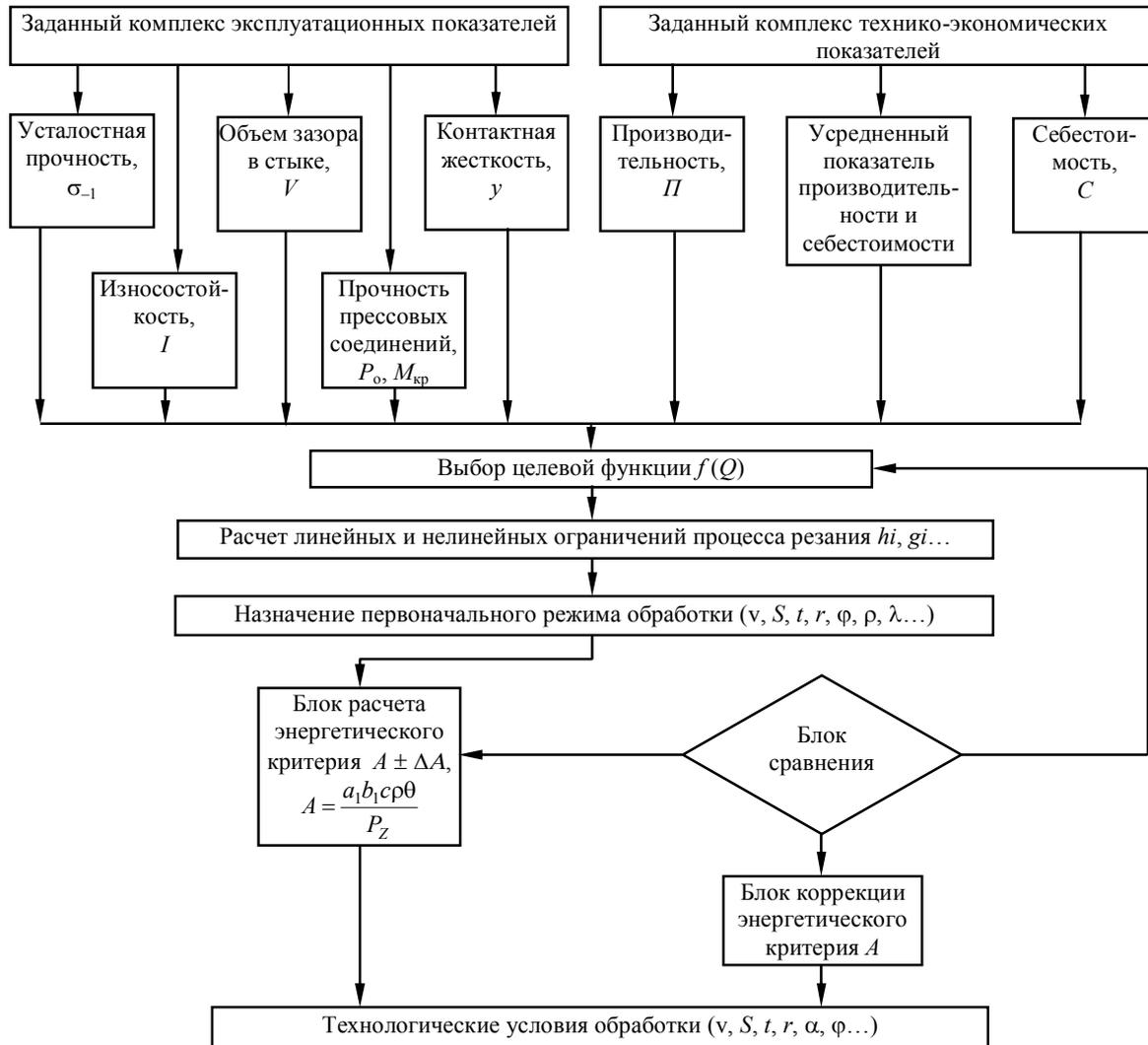


Рис. 5. Структура обобщенной методики назначения технологических условий обработки

Так, например, если необходимо обеспечить комплекс эксплуатационных показателей  $\{\sigma_{-10}, y_0, V_0, P_0, I_0\}$ , то целевая функция примет вид:

$$f(\sigma_{-1}, y, I) = c_1 \cdot \left( \frac{\sigma_{-1} - \sigma_{-10}}{\sigma_{-10}} \right) + c_2 \cdot \left( \frac{y - y_0}{y_0} \right)^2 + c_3 \cdot \left( \frac{I - I_0}{I_0} \right)^2 + c_4 \cdot \left( \frac{V - V_0}{V_0} \right) + c_5 \cdot \left( \frac{P - P_0}{P_0} \right),$$

где  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{-10}$  – текущее и требуемое значения предела выносливости;  $y$  и  $y_0$  – текущее и требуемое значения величины сближения контактируемых поверхностей;  $I$  и  $I_0$  – текущая и требуемая величины интенсивности изнашивания трущихся поверхностей;  $V$  и  $V_0$  – текущее и требуемое значения объема зазора в стыке сопрягаемых деталей;  $P$  и  $P_0$  – текущее и требуемое значения осевой силы, обеспечивающей натяг в сопряжении.

В оптимальном случае величина целевой функции должна равняться нулю.

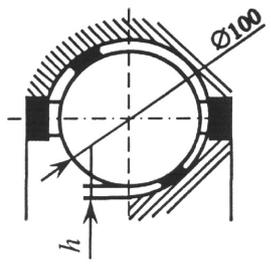
Дальнейший расчёт связан с решением задачи оптимизации выбранной целевой

функции при наличии ряда линейных и нелинейных ограничений, которые обусловлены технологией, физикой и механикой процесса резания (например, ограничения по подаче и скорости резания, исходя из возможностей оборудования), а также выбранным экономическим критерием. Количество и вид ограничений определяется в каждом конкретном случае отдельно.

Наиболее эффективным при решении подобных задач оптимизации является алгоритм, построенный на базе метода штрафных функций, использующий метод деформируемого многогранника и называемый методом нежесткого допуска.

Целью является определение первоначального режима обработки. Затем находится соответствующая величина энергетического критерия  $A$  и назначается допустимый диапазон его изменения. В процессе обработки значение критерия  $A$  удерживается в этом диапазоне путём изменения подачи и скорости резания. Последовательность расчёта технологических условий обработки с обеспечением эксплуатационных показателей деталей ГТД представлена на рис. 5. В качестве примера представлены результаты расчётов, выполненных с использованием данной методики (табл. 1 и 2).

**1. Назначение технологических условий обработки в зависимости от требуемой величины объема зазора в стыке**

		<p align="center"><b>УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ</b>                  сборочный узел – ротор на подшипниках;  <math>D_{ш} = 2,381 \text{ мм}; V = 2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3; h = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м};</math>                  масло МС-20</p>		
<b>Результаты расчета</b>				
Материал обрабатываемой детали	Объем зазора в стыке $V, \text{ мм}^3$	Режим обработки		
		$S, \text{ мм/об}$	$v, \text{ м/с}$	$t, \text{ мм}$
ХН73МБТЮ	1,72	0,25	0,6	0,4
	1,05	0,2	0,7	0,25
	1,86	0,3	0,4	0,25

**2. Результаты расчета режимов обработки в зависимости от требуемого предела выносливости и заданного экономического показателя**

Инструментальный материал – Т15К6 $\varphi = 45^\circ; \varphi_1 = 15^\circ; \alpha = 10^\circ; \gamma = 10^\circ; r = 0,5 \text{ мм}; \rho_1 = 30 \text{ мкм}; \Delta_{изн} = 0 \text{ мкм}$					
Материал обрабатываемой детали	Требуемый предел выносливости $\sigma_{-1}, \text{ МПа}$	Экономический показатель	Режим обработки		
			$S, \text{ мм/об}$	$v, \text{ м/с}$	$t, \text{ мм}$
13Х12НВМФА (ЭИ961Ш)	315	$C_{\min}$	0,18	0,6	0,25
		$P_{\max}$	0,17	0,8	0,27
ХН77ТЮР (ЭИ437БУВД)	390	$C_{\min}$	0,2	0,48	1,0
		$P_{\max}$	0,2	0,71	0,32

Таким образом, представлена методика расчёта режима обработки, обеспечивающего заданные эксплуатационные свойства деталей,

что позволяет контролировать процесс механообработки, тем самым обеспечивая получение надёжной и долговечной продукции, а сам

процесс изготовления делаая научноёмким и рентабельным.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Силин С.С.** Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
2. **Безъязычный В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
3. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1970. 400 с.
4. **Волков С.А.** Технологическое обеспечение заданных эксплуатационных свойств деталей путём оптимизации маршрута и условий обработки / Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Рыбинск, 2003. 215 с.

## REFERENCES

1. Silin, S.S., *Similarity Method at Material Cutting*. M.: Mechanical Engineering, 1979. pp. 152.
2. Bezyazychny, V.F., *Similarity Method in Engineering Techniques*. M: Mechanical Engineering, 2012. pp. 320.
3. Malinin, N.N., *Applied Theory of Plasticity and Creep*. M.: Mechanical Engineering, 1970. pp. 400.
4. Volkov, S.A., Technological support of specified performance attributes of parts through route and processing conditions optimization / *Thesis for the Competition of Can.Eng. Degree*. Rybinsk, 2003. pp. 215.

Рецензент д.т.н. В.П. Фёдоров

УДК 621.9.06.  
DOI: 10.12727/18099

**Б.М. Базров**, д.т.н.  
(ФГБУН ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Россия, 101990,  
Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4)  
E-mail: modul\_lab@mail.ru

## Проблема обеспечения технологичности изделия

*Приводится анализ состояния вопроса технологичности конструкции изделий, показана необходимость разработки теоретических основ обеспечения технологичности изделий и их содержания.*

**Ключевые слова:** технологичность; конструкция; изделие; деталь; метод; трудоемкость; себестоимость.

**B.M. Bazrov**, D.Eng.  
(Blagonravov FSBEISRMASH RAS,  
4, Maly Kharitonievsky Alleyway, 101990, Moscow, Russia.)

## Problem in product manufacturability

*In the paper there is considered a system approach absence in the support of manufacturability of a product structure taking into account all stages of its life (manufacturing, operation and utilization), drawbacks of structure manufacturability assessment. It is established that some factors of manufacturability do not reflect in an explicit form connections between structure characteristics of a product and manufacturability indices. There is shown a necessity in the development of theoretical fundamentals ensuring a product structure manufacturability taking into account all stages of a life cycle. The ties between the indices of manufacturability, structure characteristics and techniques of every stage of a product life cycle are established.*

**Keywords:** manufacturability; design; product; part; method; labour-intensiveness; cost price.

Технологичность изделия оказывает большое влияние на его эффективность на всех этапах жизненного цикла.

Вопросу технологичности изделия посвящены многочисленные работы [1–3] и др., основное количество которых опубликовано в XX веке.

Их анализ показал наличие разных формулировок понятия «технологичность», слабое раскрытие связей между характеристиками конструкции изделия и его технологичностью. Многие коэффициенты технологичности от-

ражают их связь с характеристиками конструкции в неявном виде, приводимые многочисленные рекомендации по повышению технологичности конструкции носят частный характер. Большинство работ посвящено технологичности изделия на этапе его изготовления и очень мало работ, посвященных технологичности изделия на этапах его эксплуатации и утилизации.

Кроме того, перечисленная информация разбросана по множеству источников и не объединена в единую систему. Все это суще-

ственно снижает эффективность использования разработок в обеспечении технологичности изделий.

В связи с изложенным, актуальна задача разработки теоретических основ обеспечения технологичности конструкций изделий.

Теоретические основы должны включать понятийный аппарат, факторы, влияющие на технологичность конструкции изделия, связи между факторами и показателями технологичности, методы оценки технологичности конструкции и методы обеспечения и повышения технологичности и др.

Основным является понятие технологичности изделия. В разных источниках формулировки технологичности существенно отличаются друг от друга

К примеру, в работе [4] «под технологичностью следует понимать конструкцию, состоящую из *простых* сборочных единиц, *удобных* для выполнения работ по их сборке, и деталей, форма которых является наиболее *простой* и позволяющей при изготовлении использовать высокопроизводительные способы получения заготовок и механической обработки».

Недостатками этой формулировки является то, что она учитывает только один этап жизненного цикла изделий, а также включает такие понятия, как простые, удобные, не раскрывающие собственные характеристики конструкции изделия.

В работе [5] «Технологичность – это совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при его производстве, ремонте и утилизации». Эта формулировка более приемлема, так как охватывает весь жизненный цикл изделия.

К замечаниям этой формулировки следует отнести замену этапа эксплуатации, которая включает техническое обслуживание и ремонт, а так же не учитывает такой важный фактор, как возможность изготовления изделия имеющимися технологиями.

В работе [3] приводится следующая формулировка технологичности – «совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ». В этой формулировке отсутствует этап утилизации изделия.

Непонятно, к чему относится показатель качества. Если это относится к характеристике

изделия, то в этом нет необходимости. А если эту характеристику изделия включать, то тогда надо включать и другие его характеристики.

В связи с изложенным, предлагается следующая формулировка понятия технологичности изделия: *технологичность изделия – это показатель качества изделия, характеризующий возможность изготовления его конструкции имеющимися технологиями, и ее приспособленность к достижению оптимальных расходов ресурсов на всех этапах жизненного цикла изделия в заданных условиях.*

Таким образом, понятие технологичности изделия отражает, во-первых, возможность изготовления конструкции и, во-вторых, оптимальные расходы ресурсов на изделия с учетом всех этапов его жизненного цикла при заданных условиях.

Важным вопросом при разработке теоретических основ является определение требований к конструкции изделия, предъявляемых технологичностью.

Здесь надо отметить две стороны технологичности конструкции изделия – комплексность и относительность.

Комплексность технологичности изделия заключается в том, что ее надо учитывать на всех этапах жизненного цикла и находить оптимальное решение.

Относительность технологичности конструкции изделия заключается в том, что она зависит от уровня технологии и условий, в которых изготавливается, эксплуатируется и утилизируется изделие.

Например, если одно и то же изделие изготавливается на разных предприятиях с разным уровнем технологии, то на одном предприятии изделие будет технологичным, а на другом – нетехнологичным.

То же самое будет на одном предприятии при изготовлении изделий в разных объемах. При изготовлении пяти деталей применяется одна технология, а при изготовлении этой же детали в количестве десяти тысяч штук будет другая. Соответственно и технологичность конструкция деталей в первом случае окажется нетехнологичной во втором случае.

Комплексность и относительность технологичности вызывают противоречия между требованиями к конструкции изделия. Эти противоречия возникают не только от этапа к этапу жизненного цикла изделия, когда требования к технологичности конструкции изделия на этапе изготовления могут противоре-

чить требованиям к конструкции на этапе эксплуатации и утилизации, но в пределах одного этапа.

Например, технологичная конструкция детали при получении заготовки может быть нетехнологичной при ее обработке, а технологичность конструкции детали при обработке может оказаться нетехнологичной при сборке.

Важным разделом в теоретических основах является метод оценки технологичности конструкции изделия. Для ее оценки используют многочисленные коэффициенты.

Например, для оценки технологичности конструкции изделия как сборочной единицы используются следующие коэффициенты [3]:

**1. Коэффициент легкосъемности составных частей:**

$$K_{лс} = \sum_i^N t_i / T_{т.о(р)},$$

где  $t_i$  – трудоёмкость  $i$ -й составной части изделия при техническом обслуживании и ремонте;  $N$  – число составных частей изделия, требующих технического обслуживания;  $T_{т.о(р)}$  – общая трудоёмкость изделия в техническом обслуживании.

**2. Коэффициент доступности мест обслуживания:**

$$K_{д} = T_o / (T_o + T_{всп}),$$

где  $T_o$  – трудоёмкость изделия в основных операциях изготовления (технического обслуживания и ремонта);  $T_{всп}$  – трудоёмкость изделия во вспомогательных операциях изготовления (техническое обслуживание и ремонт).

**3. Коэффициент контролепригодности:**

$$K_{к} = T_{о.к} / (T_{о.к} + T_{всп.к}),$$

где  $T_{о.к}$  – трудоёмкость изделия в основных операциях технического контроля;  $T_{всп.к}$  – трудоёмкость изделия во вспомогательных операциях технического контроля.

**4. Коэффициент сборности** представлен в виде отношения сборочных единиц изделия к общему числу его составных частей:

$$K_{сб} = \frac{E}{E + D};$$

где  $E$  – число сборочных единиц в изделии;  $D$  – число деталей в изделии.

**5. Коэффициент разноразмерности элементов при монтаже вне предприятия изготовителя:**

$$K_{рв} = \sum_{i=1}^N m_i / (N m_{max}),$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -й поставляемой составной части (элемента) изделия;  $m_{max}$  – масса наи-

большей составной части элемента изделия;  $N$  – число поставляемых составных частей изделия.

**6. Коэффициент применяемости унифицированных составных частей изделия:**

$$K_{пр}^{с.ч} = \frac{E_y + D_y}{E + D},$$

где  $E_y = E_{y.з} + E_{y.п} + E_{ст}$  – число унифицированных сборочных единиц изделия;  $D_y = D_{y.з} + D_{y.п} + D_{ст}$  – число унифицированных деталей являющихся составными частями изделия и не вошедших в  $E_y$  (стандартные крепежные детали не учитываются);  $E_{y.з}$  и  $D_{y.з}$  – число заимствованных унифицированных сборочных единиц и деталей соответственно;  $E_{y.п}$  и  $D_{y.п}$  – число покупных унифицированных сборочных единиц и деталей соответственно;  $E_{ст}$  и  $D_{ст}$  – число стандартных сборочных единиц и деталей соответственно;  $E = E_y + E_{ор}$  – число сборочных единиц в изделии;  $D = D_y + D_{ор}$  – число деталей являющихся составными частями изделия не вошедших в  $E$ ;  $E_{ор}$  и  $D_{ор}$  – число оригинальных сборочных единиц и деталей соответственно.

**7. Коэффициент применяемости стандартных составных частей изделия:**

$$K_{пр}^{с.ч.ст} = \frac{E_{ст} + D_{ст}}{E + D},$$

где  $E_{ст} = E_{ст.з} + E_{ст.п} + E_{ст.и}$  – число стандартных сборочных единиц в изделии;  $D_{ст} = D_{ст.з} + D_{ст.п} + D_{ст.и}$  – число стандартных деталей, которые являются составными частями изделия и не входят в  $E_{ст}$  (стандартные крепежные детали не учитываются);  $E_{ст.з}$  и  $D_{ст.з}$  – число заимствованных стандартных сборочных единиц и деталей соответственно;  $E_{ст.п}$  и  $D_{ст.п}$  – число стандартных сборочных единиц и деталей соответственно;  $E_{ст.и}$  и  $D_{ст.и}$  – число сборочных единиц и деталей, стандартизация которого осуществлена в процессе разработки изделия.

**8. Коэффициент повторяемости составных частей изделия** равен:

$$K_{пов}^{с.ч} = 1 - Q / (E + D),$$

где  $Q_{с.ч}$  – число наименований составных частей;  $(E+D)$  – общее число составных частей в изделии.

**9. Коэффициент типизации конструктивного исполнения** характеризует преемственность данного исполнения изделия по отношению к множеству его исполнений по составу и структуре и определяется по формуле:

$$K_{тип}^{к.и} = Q_{с.к} / Q_{с.к}^{т.п},$$

где  $Q_{с.к}$  – число структурных компонентов (элементов и связей между ними) в данном исполнении изделия, соответствующих компонентам типового представителя группы исполнений;  $Q_{с.к}^{м.п}$  – общее число компонентов типового представителя группы однотипных исполнений изделия. Для типового представителя группы исполнений  $K_{тип}^{к.н} = 1$ .

**10. Коэффициент конструктивной сложности:**

$$K_{сн} = M / M_a,$$

где  $M$  и  $M_a$  – число составных частей в исполнении разрабатываемого образца и аналога изделия соответственно.

**11. Коэффициент распределения допуска между изготовлением и монтажом:**

$$K_{р.д} = 1 - \delta_n / D_m,$$

где  $\delta_n$  – монтажный допуск;  $\delta_n$  – погрешность изготовления (суммарный допуск на отклонение формы и расположения) поверхностей оборудования. Используется для оценки технологичности оборудования поставляемого частями при ( $\delta_n \geq D_m$ ) показатель считается равным нулю.

**12. Коэффициент применяемости материала в изделии** определяется как отношение суммарной массы данного материала к общей массе конструкции изделия:

$$K_{пр}^м = M_i / M.$$

Каждый коэффициент характеризует технологичность конструкции через соответствующий ее показатель.

В итоге имеем следующий перечень показателей технологичности конструкции изделия: легкосъемность составных частей; доступность мест обслуживания; контролепригодность; сборность изделия; разновесность элементов; применяемость унифицированных составных частей; применяемость стандартных составных частей; повторяемость составных частей; типизация конструктивного исполнения; конструктивная сложность; распределение допусков на изготовление и монтаж; применяемость материала.

Анализ перечисленных показателей технологичности указывает на то, что некоторые из них отражают характеристики конструкции, влияющие на технологичность изделия в неявном виде. К ним относятся, например, легкосъемность, доступность, контролепригодность, сложность конструкции. Они дают оценку технологичности конструкции по ко-

нечному результату – трудоемкости, но не дают ответ на вопрос, какие изменения надо внести в конструкцию изделия, чтобы повысить ее технологичность.

Другой показатель – конструктивная сложность оказывает большое влияние на технологичность конструкции, коэффициент которого приведен далее.

Такая оценка конструктивной сложности имеет следующие недостатки, во-первых, изделие, принимаемое за аналог, не гарантирует, что его конструкция является лучшей, во-вторых, этот коэффициент не отражает структуру конструкции, по которой можно судить о сложности конструкции изделия.

Иными словами, при одном и том же значении коэффициента конструктивной сложности двух изделий, сложность конструкции одного изделия может существенно отличаться от сложности конструкции другого изделия.

Для определения требований к конструкции изделия, обеспечивающих ее технологичность, разработки методов обеспечения ее технологичности, необходимо установить связи между характеристиками конструкции и эффективностью изделия на всем его жизненном цикле.

Если принять за критерий эффективности минимум трудоемкости и себестоимости изготовления изделия, его эксплуатации и утилизации, то для определения уровня технологичности его конструкции нужно установить связи между ними и характеристиками конструкции.

Влияние характеристик конструкции изделия на трудоемкости и себестоимости происходит через технологию на каждом этапе жизненного цикла изделия. Для установления указанных связей сначала надо установить связи между показателями технологичности и характеристиками конструкции изделия.

Здесь надо отметить, что характеристики конструкции изделия делятся на две группы: одни характеризуют количественную сторону конструкции, например, количество деталей или узлов в изделии; другие характеризуют качество конструкции, например, уровень точности, прочности и т.п.

В связи с этим надо установить, с какой характеристикой конструкции связан каждый показатель технологичности. К примеру, показатель технологичности – применяемость унифицированных составных частей, показывает число унифицированных частей, участвующих в конструкции.

Ко второй группе относятся такие характеристики, как структура конструкции, материал элементов, их точность, прочность и др.

Теперь надо установить влияние каждой характеристики конструкции на технологию. Влияние конструкции на технологию происходит по двум направлениям: технологической подготовки и содержанию технологического процесса. Качественная характеристика конструкции сказывается на содержании технологического процесса, а количественная характеристика – на объеме технологической подготовки.

Таким образом, чем выше требования к качеству конструкции, тем выше трудоемкость ее изготовления; чем больше элементов в конструкции, тем больше трудоемкость технологической подготовки. Отсюда вытекают связи между характеристикой конструкции изделия и технологией.

Учитывая изложенное, в основу установления связей между технологичностью конструкции изделия, трудоемкостью и себестоимостью, можно использовать схему, приведенную на рис. 1.

Такую схему связей следует рассматривать на каждом этапе жизненного цикла изделия.

На этапе изготовления изделия технология – это технологическая подготовка производства и технологические процессы его изготовления.

На этапе эксплуатации изделия – это технологическая подготовка, включающая разработку технологических процессов и средств технического обслуживания, и ремонта изделия и их технологические процессы.

На этапе утилизации изделия – это технологическая подготовка, включающая разработку технологических процессов и средств технологического оснащения и технологические процессы утилизации.

Таким образом, трудоемкость и себестоимость изделия на всем жизненном цикле будет функцией трудоемкости и себестоимости всех этапов.

Установив связи между каждым показателем технологичности конструкции изделия и трудоемкостью, себестоимостью изделия, можно сформулировать требования к конструкции изделия, обеспечивающие ее технологичность, учитывая все этапы жизненного цикла изделия.

Далее следует разработать методы оптимизации конструкции изделия.

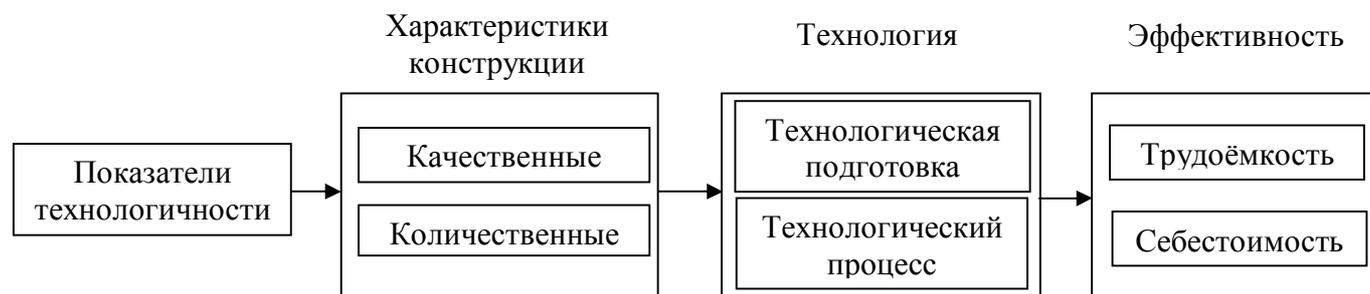


Рис. 1. Схема связей между показателями технологичности и эффективности изделий на этапе жизненного цикла

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амиров Ю.Д. Технологичность конструкций изделий: справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алфёрова, П.Н. Волков. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.
2. Рябов С.А., Глинка А.С. Технологичность конструкций: учеб. пособ. для студентов специальности 151001 «Технология машиностроения». Кемерово: КузГТУ, 2011. 64 с.
3. ГОСТ 14.205–83. ЕСТПП. Технологичность конструкций. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2009. 4 с.
4. Мовчин В.Н., Михайлов Г.М. Технология производства измерительных инструментов и приборов. М.: Машиностроение, 1974. 440 с.
5. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2005. 736 с.

### REFERENCES

1. Amirov, Yu.D., *Manufacturability of Product Design: Reference Book* / Yu.D. Amirov, T.K. Alfyorova, P.N. Volkov. M.: Mechanical Engineering, 1985. pp. 368.
2. Ryabov, S.A., Glinka, A.S. *Manufacturability of Design: Textbook for Students of Specialty 151001 "Engineering Techniques"*. Kemerovo: KuzSTU, 2011. pp. 64.
3. SARS 14.205–83. ESTPP. *Manufacturability of Design. Terms and Definitions*. M.: Standardinform. 2009. pp.4.
4. Movchin, V.N., Mikhailov, G.M., *Production Techniques of Sizing Tools and Devices*. M.: Mechanical Engineering, 1974. pp. 440.
5. Bazrov, B.M., *Techniques Fundamentals in Mechanical Engineering: Textbook for Colleges*. M.: Mechanical Engineering, 2005. pp.736.

Рецензент д.т.н. А.Н. Прокофьев

## Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий в машиностроении

*Выполнен анализ особенностей формирования детонационных функционально-ориентированных покрытий. Показано, что их свойства должны обеспечиваться в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций. Приведена принципиальная схема установки для напыления покрытий. Установлены основные характеристики и технологические особенности реализации функционально-ориентированных покрытий в машиностроении.*

**Ключевые слова:** детонация; функциональная ориентация; покрытия; технологическое обеспечение; эксплуатация.

A.N. Mikhailov, D.Eng., M.G. Petrov, Post graduate student,  
E.A. Sheiko, Can.Eng., D.A. Mikhailov, Post graduate student  
(Donetsk National Technical University)

## Technological peculiarities in realization of detonation functionally-oriented coatings in mechanical engineering

*The paper reports the analysis carried out regarding the peculiarities in the formation of explosion functionally-oriented coatings. It is shown that their properties should be ensured depending on the action peculiarities of operation functions. A schematic diagram of a plant for coating sputtering is shown. Basic characteristics and technological peculiarities for the realization of functionally-oriented coatings in mechanical engineering are established.*

**Keywords:** detonation; functional orientation; coatings; technological support; operation.

В настоящее время для повышения работоспособности деталей машин и обеспечения их нетрадиционных свойств используются детонационные покрытия [1 – 4]. Детонационные покрытия деталей машин позволяют существенно повысить их износостойкость, эрозионную и коррозионную стойкость, обеспечить минимальную пористость покрытий и газопроницаемость, снизить температурные воздействия на основной материал детали.

Особенно эффективно использование детонационных покрытий для деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях, а именно при совместном действии температурных, эрозионно-коррозионных и других воздействий при наличии абразивных, пылевых, щелочных, кислотных и солевых сред.

На основе детонационного метода обеспечивается возможность напыления покрытий из различных материалов, в том числе, черных и цветных металлов и их сплавов, нержавеющей, комплексно-легированных и быстрорежущих сталей, различных твердых сплавов и

керамики, композиционных и композитных материалов или их комбинаций.

Можно отметить, что детонационный метод обеспечивает возможность напыления покрытий, как с минимальной пористостью, так и с заданной пористостью покрытия. Например, покрытия с заданной пористостью обеспечивают значительное снижение влияния температуры на основной материал детали или улучшают смазывающий эффект. Так, специальное пористое покрытие, толщиной всего несколько микрометров, значительно снижает температурные воздействия на основной материал турбины газотурбинного авиационного двигателя (каждый микрометр покрытия поверхности позволяет снизить температуру на основном материале в пределах 1...15 °С).

Это позволяет создавать газотурбинные двигатели следующих поколений, работающие при высоких температурных воздействиях на турбину авиационного двигателя. А также детонационные методы напыления покрытий обеспечивают при формировании по-

крытия условия горячего прессования порошкового материала на поверхности детали, высокую адгезию покрытия к основному материалу детали и в целом создают специальные нетрадиционные свойства деталей машин.

Следует заметить, что при эксплуатации машин, на ряд деталей действуют неравномерные эксплуатационные функции, а именно: неравномерные удельные контактные нагрузки, неравномерные коррозионные воздействия, неравномерные температурные и другие виды воздействий. Эти воздействия вызывают неравномерные разрушения деталей и их элементов: неравномерный износ каждого поверхностного слоя и поверхностных слоев относительно друг друга; коррозионно-эрозионные разрушения каждого поверхностного слоя и поверхностных слоев относительно друг друга; температурные разрушения деталей в целом и их элементов; другие виды разрушений деталей [5]. Это снижает эксплуатационный потенциал деталей.

В таких условиях эксплуатации целесообразно использование специальных покрытий, которые бы позволяли решать вопросы полного использования деталей при неравномерных действиях эксплуатационных функций. В качестве таких покрытий рационально использование функционально-ориентированных покрытий [6]. При этом детонационный метод нанесения функционально-ориентированных покрытий деталей машин является перспективным направлением развития отделочно-упрочняющих методов по повышению их свойств.

Целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств деталей машин, работающих в сложных условиях, при действии переменных эксплуатационных функций на основе применения детонационных функционально-ориентированных покрытий.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи работы: исследовать особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий; выполнить анализ основных характеристик детонационных функционально-ориентированных покрытий; разработать технологическое обеспечение для формирования детонационных функционально-ориентированных покрытий.

**1. Особенности синтеза детонационных функционально-ориентированных покрытий.** Можно отметить, что при эксплуатации детали на ее поверхности действует множество эксплуатационных функций, на каждую

поверхность воздействуют неравномерные нагрузки, каждая зона действия удельных нагрузок имеет определенные топологические параметры, при этом действующие функции имеют определенную структуру.

Поэтому в процессе эксплуатации детали происходят местные разрушения деталей в зонах максимального действия нагрузок, эрозии, коррозии или температур, при отсутствии разрушений в других зонах детали. К подобным деталям, имеющим зоны неравномерного разрушения, можно отнести лопатки компрессора газотурбинного двигателя (перо лопатки), режущие кромки сверл и пазовых фрез, поверхности шарниров различных механизмов, рабочие поверхности зубьев колес и другие детали. В этих деталях происходят неравномерные разрушения элементов и поверхностей.

Для повышения эксплуатационного потенциала деталей в условиях действия неравномерных функций необходимо применение функционально-ориентированных покрытий [5, 6], формируемых детонационным методом. Эти покрытия позволяют решать целый комплекс эксплуатационных проблем, а именно: повышают эксплуатационные свойства детали; обеспечивают заданный, требуемый или предельный эксплуатационный потенциал детали; адаптируют деталь при изготовлении к особенностям ее эксплуатации; повышают ремонтопригодность детали за счет обеспечения ее многократного восстановления (например, на основе принципа единовременного разрушения покрытий на поверхностях и/или функциональных элементах без разрушения основы с повторными многократными напылениями покрытий).

Процесс реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий необходимо рассматривать следующим образом. Для обеспечения функционально-ориентированных свойств деталей необходимо определить соответствия между эксплуатационными функциями  $F$ , технологическими воздействиями  $TB$  (реализации покрытий) и свойствами  $C$  изделия (рис. 1). Процесс напыления покрытий должен базироваться на том, что между эксплуатационными функциями  $F$ , технологическими воздействиями  $TB$  и свойствами  $C$  изделия действуют определенные связи [5, 6], а именно: подобия, соответствия, идентичности, аналогии, эквивалентности и адекватности.

На рис. 1. представлена модель взаимосвязей  $\varphi_i^j$  объектов системы: эксплуатационные

функции  $F$ , технологические воздействия  $TB$  и свойства  $C$  детали. На базе этих связей реализуются функционально-ориентированные свойства [6]. Здесь можно отметить, что структура связей между элементами модели имеет замкнутую форму, которая позволяет определять параметры технологических воздействий и свойств детали в зависимости от особенностей действия эксплуатационных функций на элементы детали. Петли модели  $\varphi_i^i$  обозначают внутренние процессы в  $i$ -м объекте системы.

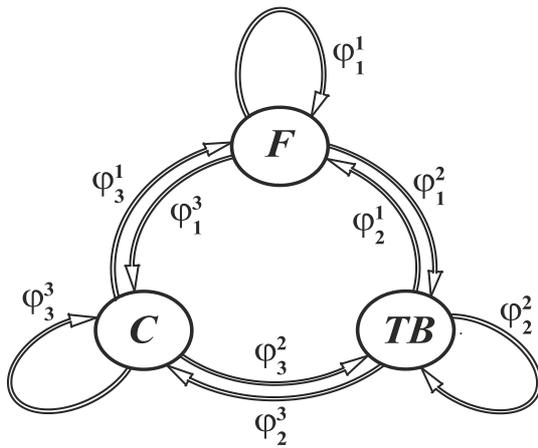


Рис. 1. Модель взаимосвязей  $\varphi_i^j$  объектов системы: эксплуатационные функции  $F$ , технологические воздействия  $TB$  и свойства  $C$  покрытия

Эти параметры определяются на базе группы особых принципов ориентации свойств и технологических воздействий (покрытий) [5]:

1. Функционального соответствия особенностей действия эксплуатационных функций, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств.

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента детали, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зоны реализации технологических воздействий на деталь и геометрических параметров зонного обеспечения необходимых свойств.

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах детали.

4. Адекватной зависимости пространственных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, технологических воздействий и эксплуатационных свойств в пространстве каждого функционального элемента детали.

5. Адекватной зависимости временных особенностей действия элементарной функции при эксплуатации, временных или пространственных особенностей реализации технологических воздействий и временных эксплуатационных свойств в каждом функциональном элементе детали.

6. Структурного соответствия действия элементарных функций, реализации технологических воздействий и выполнения свойств в функциональных элементах детали из условия обеспечения заданных, требуемых или предельных свойств всей детали.

7. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в пространстве и во времени каждого функционального элемента заданному или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

8. Адекватного структурно-функционального соответствия свойств в окрестностях каждого функционального элемента в пространстве и во времени заданному, требуемому или предельному потенциалу общих свойств всей детали в целом.

Функционально-ориентированные покрытия формируются на базе этой группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств деталей в зависимости от особенности их эксплуатации в машине.

Для реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий необходима специальная детонационная установка, способная обеспечивать реализацию приведенных выше принципов. На рис. 2 приведена принципиальная схема установки для напыления функционально-ориентированных покрытий: 1 – верхняя часть детонационного ствола; 2 – нижняя часть детонационного ствола; 3 – рамное основание; 4 – блок подачи газов; 5 – воспламенитель (свеча); 6 – блок воспламенителя; 7 – питатели для порошковых материалов; 8 – управляемые дозаторы напыляемого порошкового материала; 9 – подложка (напыляемая деталь); 10 – стол (манипулятор) для закрепления подложки;  $П_1, П_2, П_3$  – возвратно-поступательное движение относительно оси  $x, y, z$ , соответственно;  $l_0$  – расстояние от среза ствола до напыляемой поверхности детали. Стрелками показано поступление га-

зов:  $N_2$  – азот,  $C_2H_2$  – горючий газ (ацетилен),  $O_2$  – кислород,  $CO_2$  – углекислый газ.

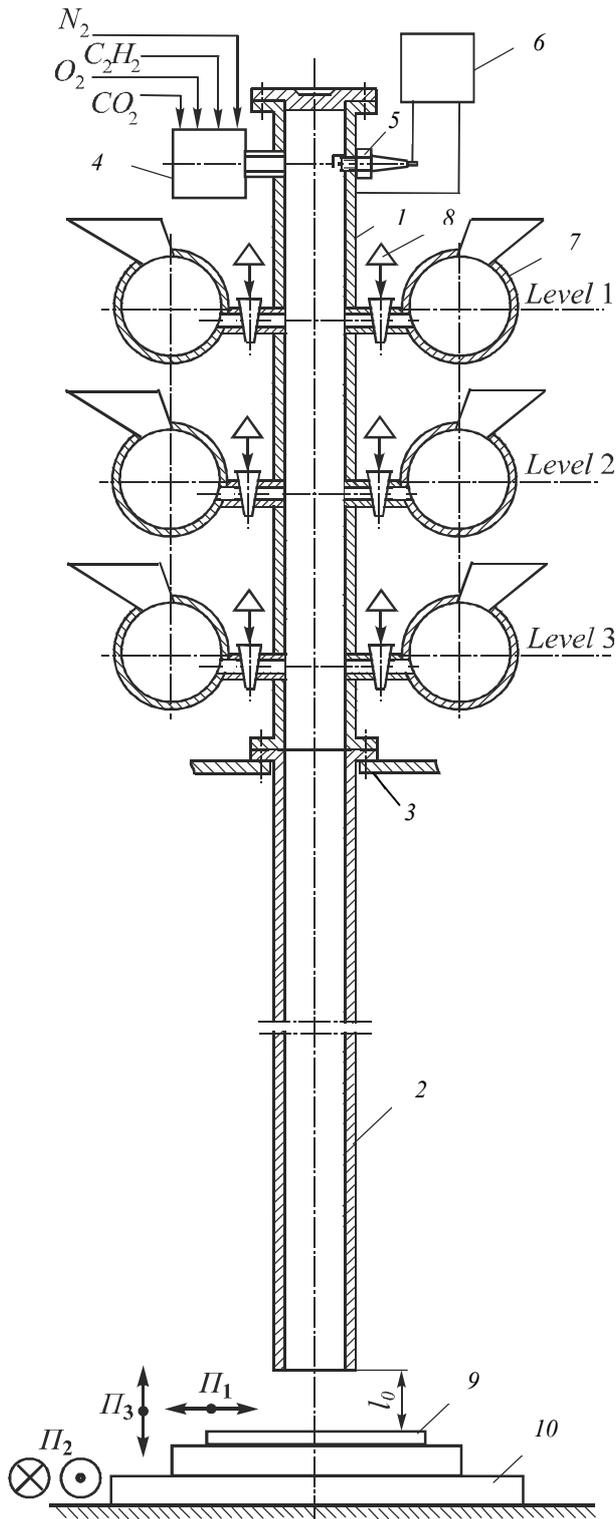


Рис. 2. Принципиальная схема установки для напыления детонационных функционально-ориентированных покрытий

Основной особенностью этой установки (см. рис. 2) является наличие нескольких питателей и управляемых дозаторов, располагающихся на нескольких уровнях верхней

части детонационного ствола. С помощью их обеспечивается следующее: возможность последовательной подачи в ствол установки различных порошковых материалов и напыления их в заданных зонах детали; возможность параллельной подачи различных порошковых материалов и управления их составом; способность к изменению пропорции порошковых материалов при напылении; возможность формировать комбинации приведенных методов.

С помощью этих особенностей выполняется реализация детонационных функционально-ориентированных покрытий. Наличие манипулятора на установке позволяет реализовать заданную кинематику движения детали относительно потока напыляемого материала покрытия.

**2. Основные характеристики детонационных функционально-ориентированных покрытий.** На рис. 3 приведены основные характеристики детонационных функционально-ориентированных покрытий. К ним можно отнести следующие: количество слоев покрытий; топография покрытий; толщина каждого слоя; пространственная структура поверхностей детали; особенности физико-механических свойств покрытий; особенности состава материалов и текстуры покрытия; назначение покрытий.

По количеству слоев детонационные функционально-ориентированные покрытия могут формироваться однослойными и многослойными. Многослойные покрытия могут реализовываться как для выполнения функционального назначения, так и для комплексного решения вопросов функционального назначения и выполнения связей между подложкой и слоями покрытий. При этом по топографии эти покрытия могут подразделяться на зональные, пятнистые, со специальной функциональной формой и другие варианты. По толщине каждого слоя данные покрытия могут формироваться постоянной или переменной толщиной, а также образовываться ступенчато в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций.

Можно отметить, что каждая деталь обычно имеет множество различных поверхностей, которые структурированы по детали. При этом на эти поверхности может действовать множество различных эксплуатационных функций, которые также структурируются в общую функцию. Для обеспечения заданных эксплуатационных свойств детали необходимо также структурировать покрытия по их по



Рис. 3. Основные характеристики функционально-ориентированных покрытий

верхностям. Поэтому здесь, функционально-ориентированные покрытия формируются по пространственной структуре детали и подразделяются следующим образом: по количеству покрытий в структуре детали, по составу покрытий, связям между элементами структуры, по вариантам структуры покрытий на поверхностях детали.

Главными особенностями детонационных функционально-ориентированных покрытий является то, что параметры физико-механических свойств и состав материалов может быть: не изменяющийся; изменяющийся по времени; изменяющийся в пространстве; комбинированные (не изменяющиеся и изменяющиеся); функционально-, топологически-, структурно-зависимые от особенностей их эксплуатации в машине.

По назначению функционально-ориентированные покрытия подразделяются на покрытия:

- для обеспечения предельного эксплуатационного потенциала детали;
- для адаптации детали при изготовлении к особенностям эксплуатации ее в машине;
- для обеспечения одновременного полного износа покрытий по всей детали при действии неравномерных эксплуатационных функций (повышение ремонтпригодности детали и числа ее восстановлений);

**3. Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий.** Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий приведены на рис. 4. Эти особенности можно структурировать следующим образом: основные этапы технологического процесса; технологическое обеспечение; параметры процессов; особенности применяемых сред и газов; структура и параметры порошковых материалов; технологические особенности напыления

покрытий.

Можно отметить, что технологические процессы по реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий обычно формируются на трех этапах: 1-й этап – подготовка детали к нанесению покрытий (механическая обработка, отделочно-упрочняющая обработка, очистка поверхностей от загрязнений и удаление различных пленок); 2-й этап – напыление детонационных функционально-ориентированных покрытий; 3-й этап – окончательное формообразование и отделочно-упрочняющая обработка.

Основной особенностью технологического обеспечения для напыления детонационных функционально-ориентированных покрытий является наличие гибкой структуры системы, управляемых систем и элементов структуры установки. Такое структурирование технологической системы для напыления обусловлено

необходимостью варьирования видами материалов и их структуры, составами материалов и зернистостью напыляемого порошка. При этом эти изменения могут быть плавными, функционально-зависимыми, ступенчатыми и других видов.

Для повышения эффективности процессов напыления детонационных функционально-ориентированных покрытий и расширения технологических возможностей могут применяться различные виды структур детонационных установок (рис. 5): 1, 2, 3 – детонационные стволы; 4 – напыляемая деталь; 5 – прогреватель детали (покрытия);  $B_1$  – вращательное движение детали;  $П_2$  – прямолинейно перемещение;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы между стволами;  $l_1$  и  $l_2$  – расстояние между стволами. Приведенные структурные варианты детонационных технологических систем позволяют реализовывать функционально-ориентирован-

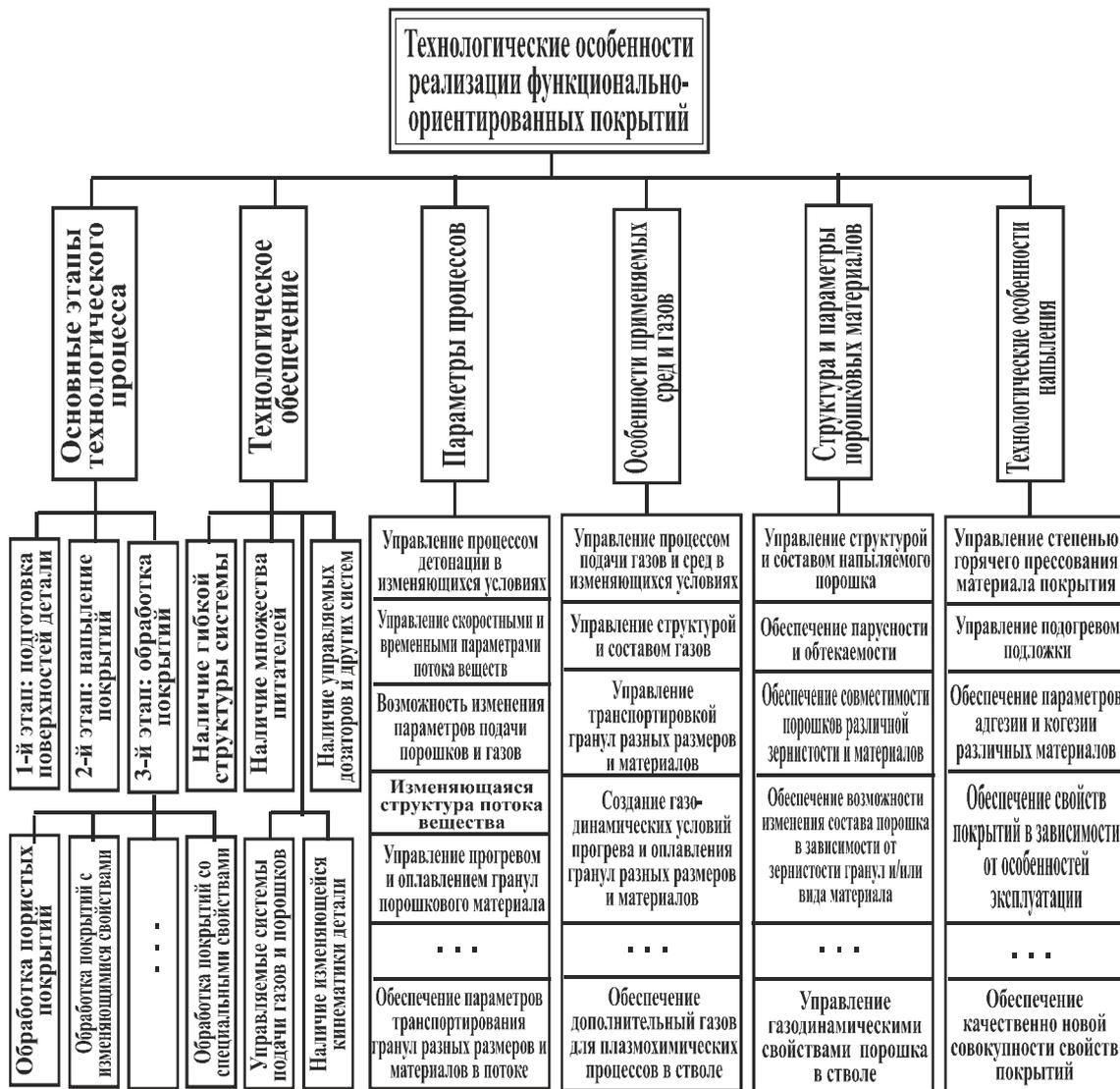
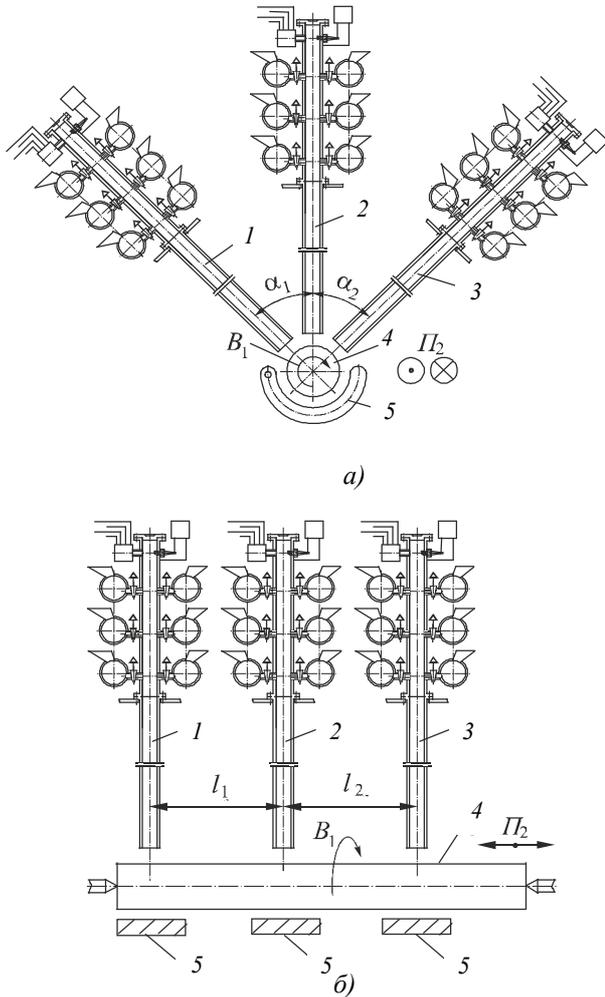


Рис. 4. Технологические особенности реализации детонационных функционально-ориентированных покрытий

ные покрытия деталей. Причем в сочетании с определенной структурой движений эти системы могут реализовывать функции 3D-принтеров.



**Рис. 5. Структурные варианты детонационных технологических систем для напыления функционально-ориентированных покрытий:**  
 а – радиальное расположение детонационных стволов;  
 б – осевое расположение детонационных стволов

Следует также отметить, что параметры процесса в детонационном стволе (см. рис. 4) при напылении функционально-ориентированных покрытий также должны иметь возможность управления всеми параметрами, а именно основными параметрами процесса в детонационном стволе, подачей газов, сред и напыляемого порошкового материала. При этом порошковый материал [7] должен подаваться в детонационный ствол с заданными параметрами, а именно с возможностью управления свойствами, составом и структурой.

Приведенная наукоемкая технология по-

зволяет повысить эксплуатационные свойства деталей машин, работающих в сложных условиях действия переменных эксплуатационных функций.

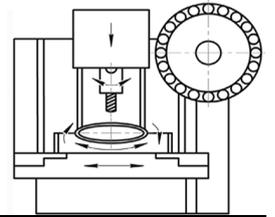
### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григоров А.И., Тананов А.И., Федько Ю.П. Некоторые особенности строения и свойств покрытий, полученных детонационным напылением // *Машиноведение*. 1976. № 3. С. 82–86.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978. 224 с.
3. Зверев А.И., Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю. Детонационные покрытия в судостроении. М.: Судостроение, 1979. 232 с.
4. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. Донецк: ДонНТУ, 2009. 346 с.
6. Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Грубка Р.М., Петров М.Г., Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий // *Научные технологии в машиностроении*. 2015. №7 (49). С. 30–39.
7. Цыркин А.Т., Михайлов А.Н., Петров М.Г., Головатинская В.В. Формирование структуры и свойств порошковых материалов. Донецк: ДонНТУ, 2013. 162 с.

### REFERENCES

1. Grigorov, A.I., Tananov, A.I., Fedko, Yu.P., Some Peculiarities of structure and properties of coatings obtained by detonation spraying // *Engineering Science*. 1976. № 3. pp. 82–86.
2. Shorshorov, M.Kh., Kharlamov, Yu.A. *Physical-Chemical Basis for Detonation-Gas Spraying of Coatings*. M.: Science, 1978. pp. 224.
3. Zverev, A.I., Astakhov, E.A., Sharivker, S.Yu. *Detonation Coatings in Shipbuilding*. M.: Shipbuilding, 1979. pp.232.
4. Bartenev, S.S., Fedko, Yu.P., Grigorov, A.I., *Detonation Coatings in Mechanical Engineering*. L.: *Mechanical Engineering*, 1982. pp.215.
5. Mikhailov, A.N., *Fundamentals of Synthesis of Functionally-Oriented Techniques*. Donetsk: DonNTU, 2009. pp. 346.
6. Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A., Grubka, R.M., Petrov, M.G., Machinery life increase based on functionally-oriented coatings // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. 2015. №7 (49). pp. 30–39.
7. Tsyarkin, A.T., Mikhailov, A.N., Petrov, M.G., Golovyayinskaya, V.V. *Formation of Structure and Properties of Powder Materials*. Donetsk: DonNTU, 2013. pp. 162.

Рецензент д.т.н. А.М. Марков



**Д.И. Петрешин, д.т.н.,  
А.Г. Суслов, д.т.н.,  
О.Н. Федонин, д.т.н.**  
(Брянский государственный технический университет,  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)  
E-mail: unti@tu-bryansk.ru

## **Модернизация станков с ЧПУ и автоматизированная система сбора данных их функционирования**

*Рассмотрены возможности модернизации станков с ЧПУ на базе отечественных систем управления. Приведен алгоритм автоматизированной системы сбора информации функционирования станков с ЧПУ.*

**Ключевые слова:** модернизация; автоматизированная система; станок с ЧПУ; производственная сеть; система управления.

**D.I. Petreshin, D.Eng.,  
A.G. Suslov, D.Eng.,  
O.N. Fedonin, D.Eng.**  
(Bryansk State Technical University,  
7, 50-th October Anniversary Avenue, Bryansk, 241035)

## **NC machines upgrade and automated system for data collection NC machines functioning**

*The possibilities of NC machines upgrade based on domestic systems of control are considered. The algorithm for an automated system of information collection of NC machines functioning is shown.*

**Keywords:** upgrade; automated system; NC machine; factory area network; control system.

Развитие отечественного машиностроения осложняется, прежде всего, тем, что физический и моральный износ основных средств производства достиг в настоящее время критического уровня и составляет от 65 до 75 % и более [1]. В существующей экономической ситуации одним из способов обновления основных средств производства предприятий, в том числе и металлорежущих станков с ЧПУ, является их модернизация.

В зависимости от текущего состояния элементов металлорежущего станка с ЧПУ модернизация может затронуть систему управления и электроавтоматику станка или механическую, гидравлическую и другие части станка.

В данной статье на примере выполненных

работ по модернизации систем управления и электроавтоматики станков рассматриваются те возможности, которые в результате может приобрести предприятие от эксплуатации, казалось бы, устаревшего оборудования.

При модернизации системы управления и электроавтоматики станка выполнялись следующие виды работы: разработка проекта модернизации металлорежущего станка; замена всей существующей системы управления металлорежущего станка; замена электроприводов станка; замена измерительной системы станка; замена элементов электроавтоматики станка; разработка и отладка программы логики станка; проверка на точность станка после модернизации.

При выборе новой системы управления ме-

таллорежущего станка предпочтение было отдано отечественному производителю устройств ЧПУ (УЧПУ). Данные УЧПУ построены на базе промышленного компьютера. Поэтому в УЧПУ имеется возможность ввода управляющих программ с использованием Flash-носителей и сетевых технологий.

Эффективность современных машиностроительных производств во многом определяется уровнем управления и организации производственных и технологических процессов (ТП), возможностью снижения издержек временных и материальных ресурсов с целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Для эффективного решения обозначенных задач современному руководителю требуется активно использовать средства автоматизации управленческих процессов, которые являются одним из самых важных факторов конкурентоспособности на рынке.

Для получения актуальной информации о работе технологического оборудования может быть использована система сбора данных о работе станка. Встречаются две аббревиатуры подобной системы: MDA (Machine Data Acquisition) [2] и MDC (Machine Data Collection) [3]. MDC-система – система мониторинга, обеспечивающая получение информации необходимого объема и подробности для наблюдаемости состояний оборудования, позволяющая принимать управленческие решения и производить управляющие воздействия с целью обеспечить необходимый запас устойчивости объекта мониторинга и качество его функционирования. Система MDC входит составным модулем в функциональную группу «Производство» автоматизированной системы управления производственными процессами (MES - Manufacturing Execution System) [2, 3].

Система MDC представляет собой аппаратно-программный комплекс [4], встраиваемый в технологическое оборудование. Для этого целесообразнее использовать металлорежущий станок, оснащенный УЧПУ, так как в этом случае информация о состоянии станка может быть извлечена из УЧПУ. Возможности современных УЧПУ, построенных на базе промышленных компьютеров, позволяют получить достаточно подробную информацию о состоянии станка, УЧПУ, причинах простоя, количестве обработанных деталей, программе, выполняемой в данный момент на оборудовании, и т.п.

Предлагаемый вариант структуры автома-

тизированной системы сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ (рис. 1) включает в себя персональный компьютер (ПК), сетевой концентратор (Hub), кабели для промышленных сетей. В том случае, когда в УЧПУ отсутствует последовательный интерфейс Ethernet, а имеется либо последовательный интерфейс RS232, либо только параллельный дискретный выход УЧПУ, между сетевым концентратором Hub и УЧПУ необходимо подключить устройство сопряжения (на рис. 1 не показано). Функция устройства сопряжения – преобразовать последовательный интерфейс RS232 или параллельный код в формат последовательного интерфейса Ethernet.

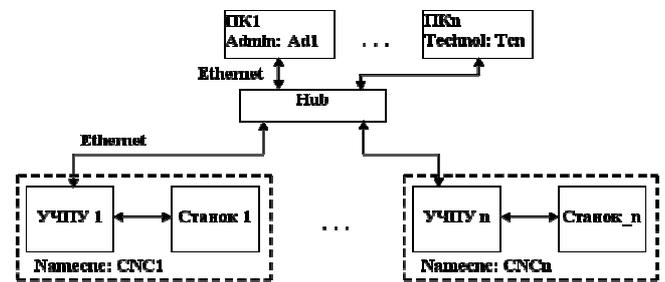


Рис. 1. Структура автоматизированной системы сбора и анализа данных с металлорежущих станков с ЧПУ: Hub – сетевой концентратор; Ethernet – последовательный интерфейс; CNC1, CNCn – сетевые имена УЧПУ; Ad1 – имя администратора в сети; Tcn – имя технолога в сети

Автоматизированная система сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ позволяет осуществлять мониторинг работы оборудования в реальном времени. Данная система выполняет анализ и классификацию причин простоя оборудования, информировать соответствующие службы предприятия о простое оборудования, выполнять администрирование технологических программ на станках с ЧПУ, вести журнал технического обслуживания (ТО), который предназначен для напоминания о необходимости ТО, создавать отчеты о его работе и причинах простоя. Таким образом, использование автоматизированной системы должно обеспечивать повышение эффективности организации планирования производства и функционирования станков с ЧПУ.

Автоматизированная система сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ включает в себя аппаратное и программное обеспечения (см. рис.1) [4]. Аппаратное обеспечение включает следу-

ющее: устройство сопряжения (УС), сетевой коммутатор, персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ), кабели соединительные.

Программное обеспечение (ПО) включает: ПО, осуществляющее прием и анализ информации о состоянии станков с ЧПУ, ПО для аппаратной части (для УС), программный модуль для станка с ЧПУ (рис. 2).

Одним из основных элементов автоматизированной системы сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ является устройство сопряжения (УС).

УС получает информацию о состоянии станков (работа по программе, простой и пр.), производит ее первичную обработку и по каналу Ethernet через сетевой коммутатор передает ее на ПЭВМ, где с помощью специального программного обеспечения происходит дальнейшая обработка и предоставление в форме удобной для пользователя: графиков, диаграмм и таблиц. Затем обработанная информация при необходимости может быть передана по локальной сети предприятия. Помимо этого за счет подключенных к УС дополнительных устройств осуществляется следующее: учет потребленной электроэнергии оборудованием, фиксации времени начала и окончания работ сотрудников, контроль и диагностирование режущего инструмента.

УС предназначено для передачи информации (состояние станка, состояние инструмента, коды ошибок, количество выполненных деталей и т.д.) от УЧПУ в ПЭВМ. УС подключается к дискретным выходам УЧПУ. Используя программу логики станка, актуальная информация о состоянии оборудования, инструмента и т.д. через дискретные выходы УЧПУ передается в УС и далее на ПЭВМ [6].

Особенностью разрабатываемой автоматизированной системы сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ является ориентация на производителей отечественных УЧПУ. Она позволит службам предприятия контролировать работу

станков, помочь планировать производство, управлять загруженностью станков и своевременно устранять простои, а также предупреждать о необходимости смены режущего инструмента. Фиксация коэффициента загрузки оборудования позволит выявить оборудование, использующееся в неполную силу и загрузить его.

Металлорежущих станков с ЧПУ и УЧПУ существует огромное множество, поэтому то, какие события и сигналы будут отслеживаться системой, будет зависеть от типа оборудования и пожеланий заказчика. Что касается причин текущего простоя станка, то оператор вводит причину простоя вручную с пульта оператора. Перечень возможных причин простоя настраивается согласно необходимости.

Наличие в УЧПУ канала LAN, обеспечивающего подключение его к информационной сети, позволяет организовать на базе УЧПУ локальную производственную сеть (см. рис. 1). Это позволяет на предприятии реализовать безбумажный документооборот, начиная от чертежа детали, далее к технологической документации и управляющей программе (УП), и до готовой детали [5].

В данной локальной производственной сети используются персональные компьютеры (ПК) с правами доступа администратора и технолога. Администратор в данной сети имеет возможность копировать файлы с УП из УЧПУ к себе на ПК, записывать файлы с УП в УЧПУ, редактировать УП расположенную в УЧПУ. Права технолога в данной сети ограничены. Пользователь с правами технолога имеет возможность только скопировать УП из УЧПУ к себе на ПК. Для того чтобы пользователь с правами технолога записал УП в УЧПУ ему необходимо скопировать ее на ПК администратора. Это сделано для того, чтобы повысить защиту УЧПУ от действия вредоносных программ, при этом предполагается, что ПК администратора имеет защиту от данного вида программ.

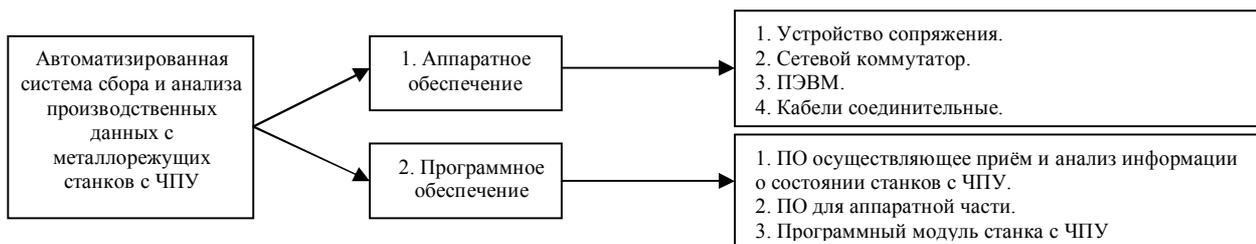


Рис. 2. Состав автоматизированной системы сбора и анализа производственных данных с металлорежущих станков с ЧПУ

Если все УП хранятся на диске УЧПУ, то оператор УЧПУ может только просмотреть содержимое папок ПК, доступ к которым открыт на ПК. Имеется возможность хранить все УП на удаленном компьютере, и выполнять их с диска удаленного ПК, т.е. во время выполнения УП на станке она будет передаваться по сети. В этом случае оператору станка с ЧПУ открыт доступ к папке с УП удаленного ПК, при этом на него возлагается определенная ответственность, т.к. он может их редактировать.

Практическая реализация локальной производственной сети была реализована на базе металлорежущих станков модели МС032 и 1В340Ф30, у которых были модернизированы системы управления. В сети были использованы два ПК для организации рабочих мест пользователей с правами администратора и технолога. Используя программы для автоматизированного проектирования, были разработаны чертежи деталей, технологическая документация и УП для станков с ЧПУ [5].

Одна из задач, которая решается при механической обработке на металлорежущих станках с ЧПУ это обеспечение заданной точности размера и формы обработанной поверхности. Точность размера и формы зависит от многих факторов, в том числе и от текущего состояния станка. В процессе эксплуатации станка с ЧПУ происходит изменение его состояния, и как результат – частичная потеря его точности. Задача обеспечения требуемой точности металлорежущего станка с ЧПУ может быть частично решена за счет возможностей современного УЧПУ.



Рис. 3. Практическая реализация локальной производственной сети

Физический износ механической части металлорежущего станка с ЧПУ можно устранить проведением капитального ремонта, включающего восстановление направляющих, замену деталей шпиндельного узла, ходовой части приводов и т.д. Для обеспечения задан-

ной точности металлорежущего станка с ЧПУ, после проведения капитального ремонта, необходимо определить его статические и динамические погрешности. К ним относятся зазоры в механических передачах, погрешность, обусловленная наличием трения покоя, накопленная погрешность ходового винта, сервоошибка и др. Данные погрешности могут быть полностью или частично скомпенсированы модернизированной УЧПУ за счет использования набора станочных параметров, позволяющих компенсировать статические и уменьшить динамические погрешности станка и его системы управления.

С целью определения причины возникновения контурной погрешности, а также ее снижения, разработана методика [6], позволяющая определять и компенсировать статические и динамические погрешности, влияющие на точность отработки траектории. Накопленные погрешности ходового винта, зазор в механических передачах, зона нечувствительности привода, погрешность, обусловленная наличием дрейфа нуля привода подач станка и трением покоя определяются с помощью разработанной системы диагностики рис. 4.

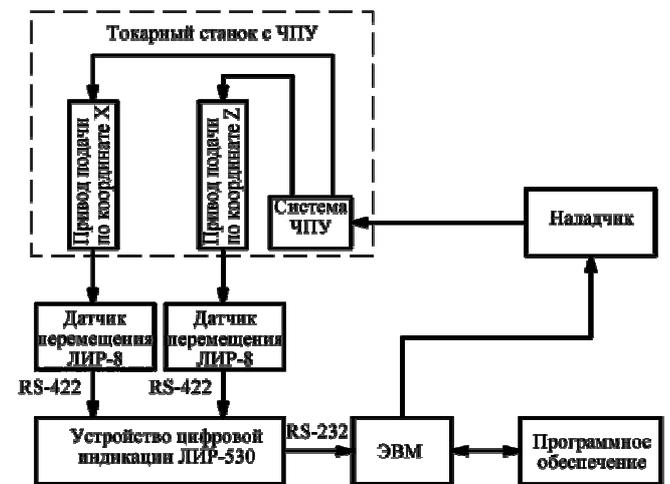
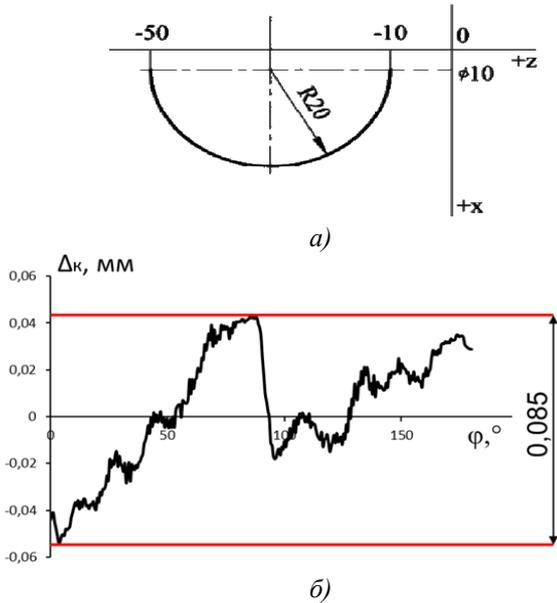


Рис. 4. Блок-схема системы диагностики точности токарного станка с ЧПУ

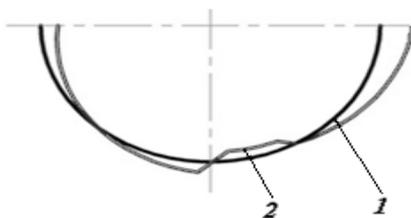
Экспериментальные исследования по повышению точности токарного станка с ЧПУ проводились на токарном станке с ЧПУ модели 1В340Ф30 с модернизированной системой управления. С помощью разработанной системы диагностики определялась необходимость повышения точности токарного станка с ЧПУ. Для этого обрабатывалась круговая траектория (рис. 5, а) исполнительными органами станка. В процессе отработки круговой траектории системой диагностики определялась фактическая траектория перемещения (рис. 5, б).

По фактической траектории определялась контурная погрешность перемещения исполнительных органов станка как разность между наибольшим и наименьшим отклонением радиуса траектории перемещения. Заданная в управляющей программе (идеальная) траектория перемещения рабочих органов станка совпадает с осью абсцисс (рис. 5, а).



**Рис. 5. Траектория перемещения исполнительных органов станка:**  
 а – траектория в полярных координатах, заданная в управляющей программе (идеальная); б – фактическая траектория, полученная при отработке кадра приводами подачи станка

Радиус круговой траектории перемещения исполнительных органов станка составлял 20 мм, контурная подача – 200 мм/мин. Контурная погрешность фактической траектории составляет  $\Delta_k = 0,085$  мм (см. рис. 5). Фактическая траектория исполнительных органов станка в полярных координатах представлена на рис. 6.

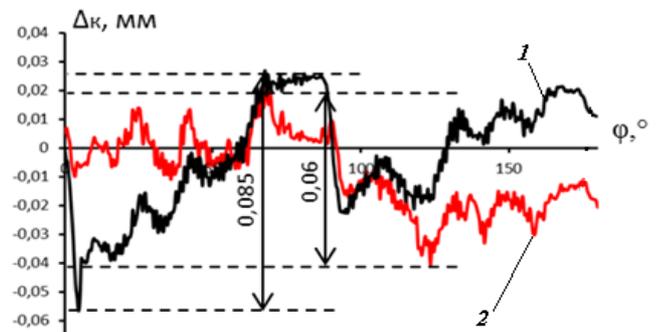


**Рис. 6. Фактическая траектория перемещения исполнительных органов станка в полярных координатах:**  
 1 – заданная траектория; 2 – фактическая траектория

В результате проведения мероприятий по диагностированию и повышению точности токарного станка с ЧПУ мод. 1В340Ф30, удалось повысить на 30 % точность обработки

траектории перемещения рабочих органов станка, что в абсолютных величинах имеет следующие значения: начальная контурная погрешность  $\Delta_{к.нач} = 85$  мкм; конечная контурная погрешность  $\Delta_{к.кон} = 60$  мкм (рис. 7).

Разработанная методика [6] диагностики (диагностика станка производится после текущих, внеплановых и капитальных ремонтов) и компенсации погрешностей станка применяется при модернизации системы управления станка. Кроме того, она может быть использована в процессе эксплуатации станка, когда происходит изменение состояния самого станка и, как результат, частичная потеря его точности. В этом случае также требуется корректировка настроек УЧПУ. При этом, как показал пример, только за счет настроек параметров УЧПУ, без ремонта механической части станка, удастся повысить точность обработки траектории перемещения рабочих органов станка на 30 %.



**Рис. 7. Результат настройки станочных параметров:**  
 1 – исходная траектория (до корректировки);  
 2 – окончательная траектория (после корректировки)

Перспективным направлением в управлении ходом технологического процесса является разработка адаптивных систем управления (АДСУ) параметрами качества поверхностного слоя. Современные УЧПУ, построенные на базе промышленного компьютера, не имеют режима адаптивного управления параметрами качества поверхностного слоя во время механической обработки. Для функционирования АДСУ параметрами качества поверхностного слоя необходимо получить информацию от датчиков, измеряющих выходные параметры процесса резания, произвести ее обработку и сформировать управляющее воздействие.

В основе адаптивного управления металлообработкой лежит знание качественных и количественных зависимостей между управляющими воздействиями, параметрами процесса, свойствами технологической системы и выходными показателями процесса резания.

Для функционирования АдСУ параметрами качества поверхностного слоя необходимо иметь математическую модель, связывающую выходные параметры управляемого процесса с его входными управляющими воздействиями. Однако, как показывает анализ, не для всех обрабатываемых материалов и условий обработки имеются такие зависимости. Задача существенно осложняется при обработке новых материалов, при использовании новых инструментальных материалов, при внедрении новых технологических процессов, т.е. когда справочные данные по ним отсутствуют или не адекватны реальным условиям.

В связи с этим возникает необходимость в проведении дополнительных экспериментальных исследований, что в реальных условиях для предприятий невыгодно. Данная проблема может быть устранена путем обучения или самообучения системы в процессе управления технологической системой и в использовании накапливаемой информации.

Самообучающаяся технологическая система – это система адаптивного управления металлорежущего станка с ЧПУ, работа которой заключается в получении математической модели [6], связывающей параметры качества поверхности с условиями обработки, и использовании полученной модели для управления технологической системой по любому из параметров качества. Исходя из этого, система должна иметь вычислительное устройство, двунаправленный канал связи с технологической системой, датчики для контроля выходных параметров процесса резания, а также программное и алгоритмическое обеспечение. Структурная схема самообучающейся технологической системы будет иметь вид, представленный на рис. 8.

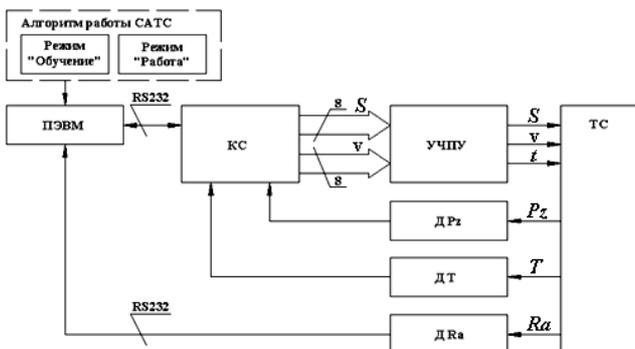


Рис. 8. Структурная схема самообучающейся технологической системы

Самообучающаяся технологическая система разработана на базе модернизированного

токарного станка мод. 16Б16 Ф3 с УЧПУ NC200. В состав системы входят следующие основные элементы: технологическая система (ТС); датчик, измеряющий тангенциальную составляющую силы резания ( $D P_z$ ), датчик измеряющий текущую температуру в зоне резания ( $D T$ ) и датчик измеряющий параметр шероховатости  $Ra$  ( $D Ra$ ) – optoNCDT 1700-2; контроллер сопряжения (КС) датчиков ( $D P_z$ ) и ( $D T$ ) с ПЭВМ и ПЭВМ с УЧПУ; УЧПУ типа NC200 (класс PCNC), обеспечивающая управление ТС за счет изменения подачи  $S$ , скорости резания  $v$  и глубины резания  $t$ .

В большинстве случаев УЧПУ предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для того, чтобы построить на базе станка с УЧПУ самообучающуюся технологическую систему, которая должна вычислять математическую модель, вести базу данных и анализировать ситуацию во время обработки необходимо использовать ПЭВМ с соответствующим алгоритмом работы.

Контроллер сопряжения предназначен для организации обмена информацией между датчиками ( $D P_z$ ) и ( $D T$ ); и ПЭВМ и ПЭВМ с УЧПУ. В состав контроллера входят элементы, преобразующие аналоговый сигнал, поступающий с датчиков, в цифровой, и передающие его в ПЭВМ. Вычисленная величина поправки (подачи, скорости резания и глубины резания) передается от ПЭВМ контроллеру сопряжения и далее в УЧПУ.

В самообучающейся технологической системе предусмотрены два режима работы «Самообучение» и «Работа» [7]. Режим «Самообучение» предназначен для определения параметров математической модели и сохранения результата самообучения в базе данных системы. Для определения параметров математической модели в самообучающейся технологической системе проводится активный эксперимент непосредственно на рабочем месте. Полученные в ходе эксперимента данные статистически обрабатываются и определяются параметры математической модели, которые запоминаются в базе данных системы вместе с исходными данными. Исходными данными являются: геометрия режущей части инструмента, материал режущей части инструмента, материал обрабатываемой заготовки и его твердость, обеспечиваемый параметр качества поверхностного слоя, величина допуска на обеспечиваемый параметр качества.

Во время проведения эксперимента самообучающаяся технологическая система авто-

математически определяет значения параметра шероховатости  $Ra$  прямым методом измерения [4], значения поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений определяются косвенным методом, на основе измерений главной составляющей силы резания  $P_z$  и температуры в зоне резания. На основе определенных значений рассчитывается величина комплексного параметра  $S_x$ .

Режим «Работа» используется для обеспечения заданного значения параметра качества поверхностного слоя или комплексного параметра  $S_x$ . При этом осуществляется адаптивное управление технологической системой по заданному параметру. В этом режиме осуществляется прием измерительной информации от датчиков, установленных вблизи зоны резания, анализ полученной информации, и на основе анализа принимается решение об управлении технологической системой.

Работа самообучающейся технологической системы была проверена в режиме адаптивного управления при обеспечении параметров качества поверхностного слоя деталей машин [9]. Полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными и они подтверждают работу системы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Половинкин В.Н. Модернизация машиностроения. Цифры. Тенденции. Вызовы. // Экспертный союз. 2012. № 1. <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/264-modernization>.
2. Meye H. Manufacturing Execution Systems Optimal Design, Planning and Deployment / Heiko Meyer, Franz Fuchs, Klaus Thiel. The McGraw-Hill Companies, 2009. pp. 271.
3. Kletti J. Manufacturing Execution Systems – MES / Jurgen Kletti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. pp. 276.
4. Федонин О.Н., Петрешин Д.И., Карпушкин В.А. Разработка алгоритма функционирования автоматизированной системы сбора и анализа данных с металлорежущих станков с ЧПУ // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. №1 (41) С. 58–62.
5. Федонин О.Н., Сьянов С.Ю., Хандожко В.А. Автоматизация технологической подготовки производства деталей в интегрированных системах проектирования и

управления с поддержкой управления CNC // Справочник. Инженерный Журнал. 2009. № 10. С. 29–32.

6. Федонин О.Н., Петрешин Д.И., Хандожко В.А., Агеенко А.В. Модернизация металлообрабатывающих станков, применяемых в условиях автоматизированного производства // Вестник Брянского государственного технического университета. 2009. № 3. С. 57–59.

7. Суслов А.Г., Петрешин Д.И. Определение закона управления для адаптивной технологической системы при обеспечении заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин при механической обработке // СТИИ. 2010. № 1. С. 30–36.

8. Петрешин Д.И. Структура программного обеспечения самообучающейся адаптивной технологической системы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2009. № 4. С. 95–99.

9. Петрешин Д.И. Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 9(15). С. 25–27.

## REFERENCES

1. Polovinkin V.N., Mechanical Engineering Modernization. Figures. Trends. Challenges. // Expert Union. 2012. № 1. <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/264-modernization>.
2. Meye H. Manufacturing Execution Systems Optimal Design, Planning and Deployment / Heiko Meyer, Franz Fuchs, Klaus Thiel. The McGraw-Hill Companies, 2009. pp. 271.
3. Kletti J. Manufacturing Execution Systems – MES / Jurgen Kletti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. pp. 276.
4. Fedonin O.N., Petreshin D.I., Karpushkin V.A., Development of algorithm of functioning an automated system of collection and analysis of NC machines // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2014. №1 (41) pp. 58–62.
5. Fedonin O.N., Siyanov S.Yu., Khandozhko V.A. Automation of technological reproduction of parts in integrated design and control systems with CNC support // *Reference Book. Engineering Journal*. 2009. № 10. pp. 29–32.
6. Fedonin O.N., Petreshin D.I., Khandozhko V.A., Ageenko A.V. Modernization of mechanical equipment used under conditions of automated production // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2009. № 3. pp. 57–59.
7. Suslov A.G., Petreshin D.I. *Definition of Control Law for Adaptive Technological System at Ensuring Specified Parameters of Machinery Surface Layer Quality at Machining* // STIN. 2010. № 1. pp. 30–36.
8. Petreshin D.I., Software structure of self-training adaptive technological system // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2009. № 4. pp. 95–99.
9. Petreshin D.I., Technological ensuring quality parameters of machinery surface layer under conditions of uncertainty // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. 2012. № 9(15). pp. 25–27.

Рецензент д.т.н. В.И. Аверченко

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

<http://www.ntmash.tu-bryansk.ru>

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 19.02.2016. Подписано в печать 24.03.2016.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7