

# НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 9 (75)

2017

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

## СОДЕРЖАНИЕ

### 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)

акад. 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. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. ШАВРИН О.И. (г. Ижевск)

### Зам. главного редактора

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

www.ntmash.tu-bryansk.ru

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

Свидетельство о регистрации средства массовой  
информации ПИ № ФС77-66087 от 10 июня 2016 года

### ТЕХНОЛОГИИ НАУКОЁМКИХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Макаров С.С., Дементьев В.Б. Численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 30ХГСН2А . . . . . 3

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

Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В. Технология комбинированного эрозионно-лучевого нанесения покрытий . . . . . 9  
Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий . . . 17  
Гусев В.Г., Морозов А.В. Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей . . . . . 21

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Сергеев А.С., Тихонова Ж.С., Уварова Т.В. Повышение точности расчета составляющих силы резания при точении коррозионностойких сталей . . . . 28

### НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО- УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Бабичев А.П., Вобу А.М., Пастухов Ф.А., Вейсса Г.К. Повышение интенсивности съема металла при вибрационной обработке на основе использования «щелевого» эффекта в рабочей камере . . . . . 33  
Берберов С.А., Лебедев В.А. Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях . . . . . 38

### ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ И МОДУЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Байков А.В. Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода . . . . . 42

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по направлению 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение*

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.

# SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 9 (75)

2017

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)

Acad. 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. CHIGIRINSKY Yu.L. (Volgograd)

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

## Deputy chief 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: naukadm@yandex.ru  
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 № ФС77-66087 от 10.06.2016

## CONTENTS

### SCIENCE INTENSIVE MATERIALS PROCESSING AND NANOTECHNOLOGIES

**Makarov S.S., Dementiev V.B.** Numerical simulation of heat exchange at cooling of high-temperature metal blank made of steel ChGSN2A. .... 3

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

**Smolentsev V.P., Kondratiev M.V., Smolentsev E.V.** Technology of composite erosion-radiation coating. .... 9

**Gruzdev A.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P.** Peculiarities of electro-erosion machining with discharge low-energy pulses. .... 17

**Gusev V.G., Morozov A.V.** Discretization technology of abrasive disc operating surfaces with laser and hydro-abrasive jet. .... 21

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF MACHINING

**Sergeev A.S., Tikhonova Zh.S., Uvarova T.V.** Accuracy increase in computation of cutting force components at corrosion-resistant steel parts turning. .... 28

### SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES OF FINISHING AND HARDENING PROCESSING

**Babichev A.P., Vobu A.M., Pastukhov F.A., Veissa G.K.** Intensity increase in metal removal at vibration treatment based on use of "slot" effect in working chamber. .... 33

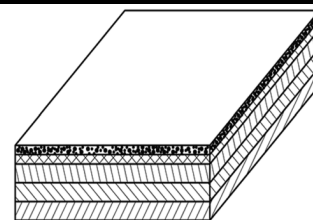
**Berberov S.A., Lebedev V.A.** Forming mandrel use for slot hole calibration in heat-treated parts. .... 38

### FUNCTION-ORIENTED AND MODULAR TECHNOLOGIES

**A.N. Mikhailov, V.A. Mikhailov, A.V. Baikov** Life complex increase of all groups of compressor blades of a turbo-shaft gas turbine engine on the basis of a functionally-directed approach. .... 42

A Journal is included in the list of editions approved by HEB at the Ministry of Education and Science of Russia for the publication of competitors' works for academic degrees in the direction of 05.02.00 – Mechanical Engineering and Science of Machines.

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



УДК 536.24:519.63

DOI: 10.12737/article\_59ae90c53930e5.50040191

**С.С. Макаров, к.т.н.,  
В.Б. Дементьев, д.т.н.**

(Институт механики Уральского отделения РАН,  
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34;

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

E-mail: demen@udman.ru; ssmak15@mail.ru

## **Численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки из стали 30ХГСН2А\***

*Приведены результаты численного моделирования теплообмена при охлаждении металлической заготовки из стали 30 ХГСН2А. Определены скорости охлаждения заготовки потоком газожидкостной среды. Проанализировано изменение интенсивности охлаждения в зависимости от скорости движения заготовки противоположно потоку охлаждающей среды.*

**Ключевые слова:** охлаждение; заготовка; поток газожидкостной среды; численное моделирование.

**S.S. Makarov, Can. Eng.,  
V.B. Dementiev, D. Eng.**

(Mechanics Institute of Ural Branch of the RAS, 34, Baramzina Str., Izhevsk 426067;  
Kalashnikov State Technical University of Izhevsk, 7, Studencheskaya Str. Izhevsk 426069)

## **Numerical simulation of heat exchange at cooling of high-temperature metal blank made of steel ChGSN2A**

*The results of the numerical simulation of heat exchange at the cooling metal blank made of steel 30ChGSN2A are shown. The velocities of blank cooling with the flow of gas-liquid medium are defined. Cooling intensity changes depending on the blank motion speed opposite the flow of cooling medium are analyzed.*

**Keywords:** cooling; blank; flow of gas-liquid medium; numerical simulation.

При изготовлении металлических заготовок в машиностроении, таких как трубы, валы, оси, втулки, пальцы, пружины и т.д., применяют эффективные упрочняющие технологии термической обработки. В работах [1 – 4] приводятся результаты исследований, позволяющие улучшить комплекс физико-механических свойств материала металлических заготовок и существенно снизить метал-

лоемкость продукции. Практически отработана технология изготовления металлических заготовок цилиндрической формы ответственных деталей из конструкционных сталей марок 60С2, Ст40, Ст50, 40ХНМА, 65Г, 65С2ВА, 30 ХГСН2А внешним диаметром от 0,012 до 0,06 м (рис. 1).

Технология упрочнения металлических заготовок завершается охлаждением потоком жидкости с заданной скоростью для формирования требуемых физико-механических свойств материала (рис. 2). Скорость движе-

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-41-180211)

ния заготовки противоположно потоку охлаждающей среды определяется технологически-ми режимами обработки и варьируется от 0,001 до 0,1 м/с.



Рис. 1. Изделия цилиндрической формы

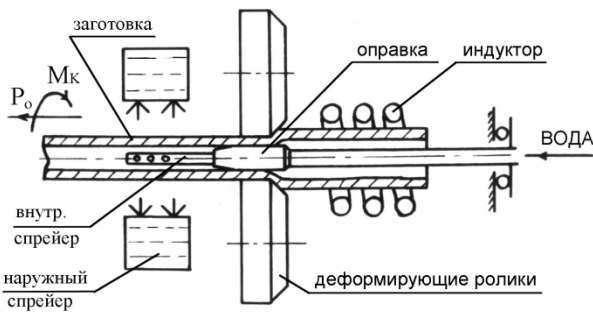


Рис. 2. Схема процесса ВТМО винтовым обжатием

Для охлаждения цилиндрических металлических заготовок широко применяют спрейерные устройства [3], позволяющие создавать одинаковые условия охлаждения по периметру заготовки за счет равномерного и симметричного подвода охлаждающей среды в виде быстро движущихся сплошных потоков жидкости.

В работе [4] рассмотрена математическая модель сопряженной задачи конвективного теплообмена при охлаждении нагретого металлического цилиндра ламинарным потоком охлаждающей среды. Охлаждение происходит без кипения жидкости. В работе [5] предложена математическая модель сопряженного теплообмена в гетерогенной системе «твердое тело – газожидкостная среда» с учетом парообразования в охлаждающем продольном потоке жидкости у поверхности высокотемпературного металлического цилиндра. Численный алгоритм применен для исследования охлаждения металлической заготовки цилинд-

рической формы из конструкционной стали 30ХГСН2А [6].

Настоящая статья посвящена численному моделированию теплообмена при охлаждении высокотемпературной металлической заготовки, движущейся относительно продольного потока газожидкостной среды, при начальных температурах нагрева, характерных для высокотемпературных тел, на поверхности которых процесс охлаждения происходит с кипением жидкости.

**Постановка задачи.** Сплошной металлический цилиндр радиусом  $r_m$  и длиной  $L$  охлаждается движущимся в направлении горизонтальной оси  $x$  потоком жидкости с начальной скоростью  $u_0$ . Толщина слоя движущейся жидкости определяется расстоянием кольцевого зазора от  $r_m$  до  $r_l$ . Толщина внешнего кольца, определяется расстоянием от  $r_l$  до  $r_{m1}$ . Физическая схема расчетной области приведена на рис. 3.

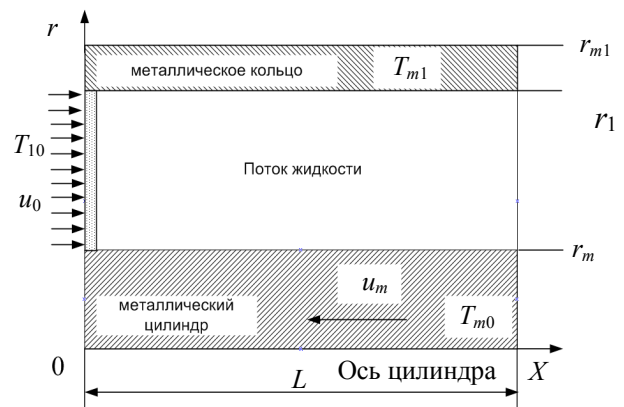


Рис. 3. Физическая схема расчетной области

При описании процесса приняты следующие предположения:

- течение жидкости считается осесимметричным относительно продольной оси цилиндра, действием гравитационных сил можно пренебречь;
- течение жидкости считается ламинарным;
- параметры в направлении  $r$  изменяются непрерывно, при этом на границах между металлом и жидкостью выполняются условия сопряжения по тепловым параметрам;
- в потоке жидкости у поверхности цилиндра имеет место процесс парообразования;
- теплофизические параметры газожидкостной среды определяются соотношениями, описывающими свойства на линии насыщения;
- считается, что плотность пара значи-

тельно меньше плотности жидкости, и описывается уравнением состояния идеального газа;

– испарение жидкости считается равновесным, давление пара равно давлению в жидкости;

– считается, что в начальный момент времени кольцевой зазор заполнен жидкостью.

**Математическая модель.** Математическая

модель сопряженного теплообмена потока газожидкостной среды и металлической заготовки в двухмерной нестационарной постановке, учитывающей осесимметричность течения потока охлаждающей среды относительно продольной оси цилиндра, рассмотрена в работах [5, 7].

Система уравнений, описывающая течение газожидкостной среды  $r_m < r < r_l$ :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \mu \frac{\partial v}{\partial r} - \mu \frac{v}{r^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - \dot{m}_v Q_v, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial Y_v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_v}{\partial r} = \dot{m}_v. \quad (5)$$

Удельная массовая скорость парообразования, находится из уравнения теплового баланса:

$$\dot{m}_v = \left( \rho c \Delta T^* \right) / Q_v,$$

где приведенный поток тепла определяется следующим соотношением:

$$\Delta T^* = \begin{cases} 0, & \text{если } T(t + \Delta t) < T_s \\ [T(t + \Delta t) - T_n(t)] / \Delta t, & \text{если } T(t + \Delta t) > T_s \end{cases},$$

$T(t) = \max(T(t); T_s)$ ,  $\Delta t$  – шаг по времени,  $T_s$  – температура насыщения.

Уравнение энергии для металлического цилиндра  $0 < r < r_m$ , и кольца  $r_l < r < r_{m1}$  имеет вид:

$$\rho_m c_m \left( \frac{\partial T_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r}. \quad (6)$$

Скорость охлаждения материала металлической заготовки определяется по формуле:

$$V_{ohl} = \frac{T_m(t + \Delta t) - T_m(t)}{\Delta t}. \quad (7)$$

Эффективные теплофизические параметры газожидкостной среды определяются следующим образом:

$$\Gamma = \Gamma_1 Y_v + (1 - Y_v) \Gamma_2,$$

где  $\Gamma = \{\rho, \mu, \lambda\}$ ,  $\Gamma_1 = \{\rho_v, \mu_v, \lambda_v\}$ ,  
 $\Gamma_2 = \{\rho_l, \mu_l, \lambda_l\}$ ;  
 $c = (c_v \rho_v Y_v + c_l \rho_l (1 - Y_v)) / \rho$ .

При расчете поля течения газожидкостной среды значения  $\{\rho, \mu, \lambda\}$  интерполируются на гранях контрольного объема.

Граничные условия:

$$x = 0: 0 < r < r_m, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$r_m < r < r_l, \quad T = T_{l0}, \quad u = u_0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0$$

$$r_l < r < r_{m1}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$x = L: 0 < r < r_m, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$r_m < r < r_l, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x} = 0$$

$$r_m < r < r_{m1}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0,$$

$$0 < x < L: r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$r = r_m, \quad r = r_l, \quad -\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} = -\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial r}, \quad T_m = T_l,$$

$$u = 0, \quad v = 0$$

$$r = r_{m1}: \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·град);

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·град);  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $p$  – давление, Па;  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $r$  – радиальная координата, м;  $x$  – продольная координата, м;  $L$  – длина расчетной области, м;  $u$  – компонента скорости по  $x$ ;  $v$  – компонента скорости по  $r$ , м/с;  $Y$  – объемная концентрация,  $Q$  – удельная теплота испарения, Дж/кг. Индексы:  $m$  – металл;  $l$  – жидкость;  $v$  – пар;  $0$  – начальное значение;  $s$  – параметры насыщения.

Система дифференциальных уравнений (1) – (6) решается методом контрольного объема. Параметры поля течения (1) – (3) рассчитаны применяемым при моделировании течений жидкости алгоритмом SIMPLE [8]. Дифференциальные уравнения приводятся к системе линейных алгебраических уравнений и решаются итерационно методом Гаусса–Зейделя с использованием коэффициента нижней релаксации.

**Результаты численных расчетов.** Рассмотрим охлаждение сплошной металлической заготовки цилиндрической формы:  $r_m = 0,02$  м;  $r_l = 0,03$  м;  $r_{m1} = 0,02$  м;  $L = 0,2$  м;  $T_{m0} = 820$  °С продольным потоком воды  $T_{l0} = 20$  °С. Начальная температура металлического кольца  $T_{m1} = T_{l0}$ . Материал заготовки сталь 30ХГСН2А. Материал кольца сталь 12Н18Н9Т. Скорость потока охлаждающей среды (вода)  $u_0 = 1$  м/с. Теплофизические параметры сред приняты согласно [9, 10]. Время расчета  $t = 2$  с.

На рис. 4 приведены графики скорости охлаждения вдоль поверхности заготовки при отсутствии скорости ее движения противоположно движению потока жидкости и со скоростью  $u_m = 0,1$  м/с.

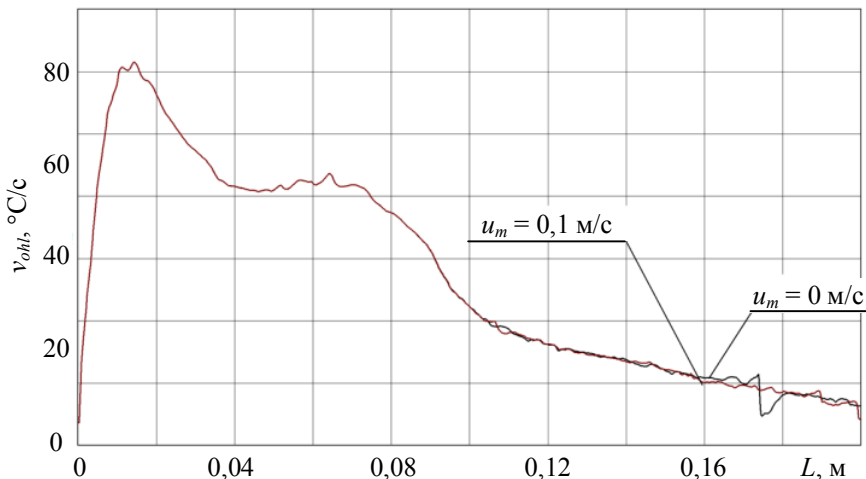


Рис. 4. Скорость охлаждения поверхности заготовки, при  $t = 2$  с

Как видно из расчетов скорость противоположного движения цилиндра незначительно сказывается на скорости охлаждения поверхности.

На рис. 5 приведен график скорости охлаждения

по радиусу в середине заготовки.

Видно, что при заданных исходных данных противоположное движение заготовки потоку жидкости меняется незначительно и составляет около 1 %.

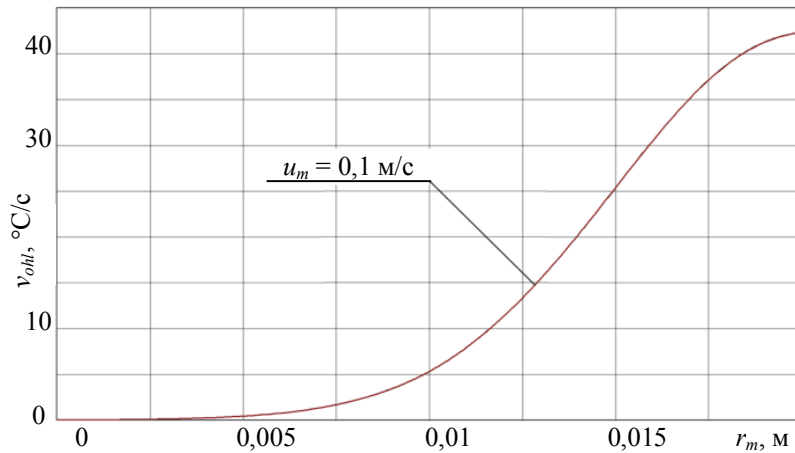


Рис. 5. Скорость охлаждения по радиусу в середине заготовки, при  $t = 2$  с

На рис. 6 приведено поле скоростей охлаждения цилиндра за расчетное время.

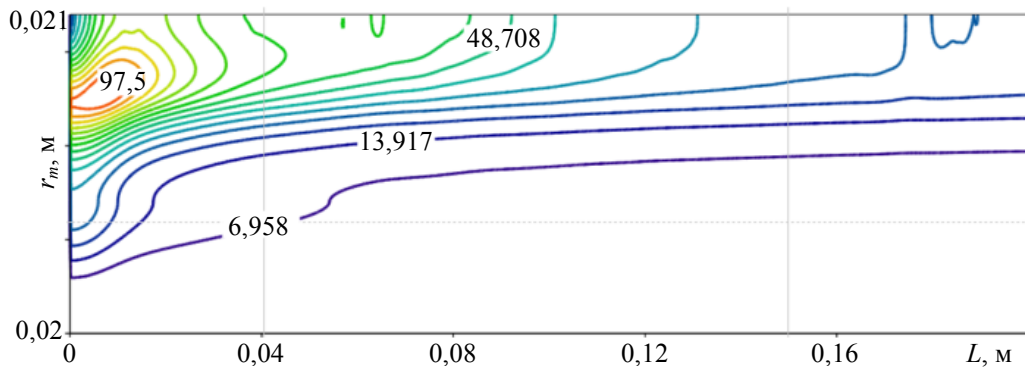


Рис. 6. Скорость охлаждения заготовки

Из расчета следует, что скорость охлаждения в объеме заготовки изменяется неравномерно и зависит от гидродинамических параметров потока газожидкостной среды. Более интенсивное охлаждение имеет место на начальном участке, где температура потока ниже. Дальше по потоку из-за нагрева жидкости и образующегося пара в жидкости у поверхности интенсивность охлаждения снижается. Значения объемной доли пара в жидкости у поверхности заготовки приведены на рис. 7.

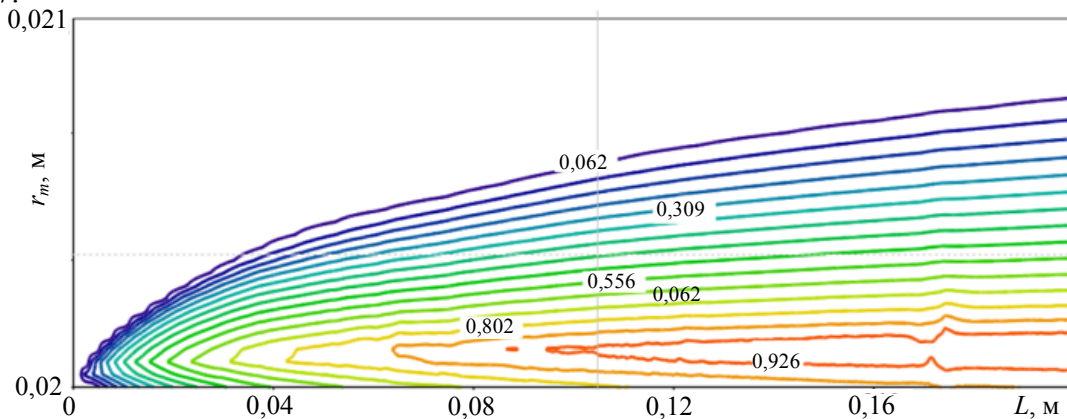


Рис. 7. Объемная доля пара в жидкости у поверхности заготовки

Из расчета видно, что доля образующегося пара увеличивается вдоль поверхности заготовки по направлению потока охлаждающей среды, тем самым создавая дополнительное термическое сопротивление и снижая скорость охлаждения.

### Заключение

Приведенная математическая модель и разработанный численный алгоритм позволяют производить численное моделирование теплообмена при охлаждении высокотемпературных металлических заготовок. Получены численные значения параметров теплообмена при охлаждении в зависимости от гидродинамических и теплофизических свойств охлаждающей среды и скорости продольного перемещения заготовки натекающему потоку среды. Результаты расчетов будут полезны для наукоемких технологий в машиностроении при термическом упрочнении металлических заготовок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Четкарев, В.А., Дементьев, В.Б., Шаврин, О.И. Анализ и оптимизация технологий упрочнения металлопродукции методом VTMO. – Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 1996. – 136 с.
2. Дементьев, В.Б., Шаврин, О.И., Маслов, Л.Н., Засыпкин, А.Д. Качество пальцев траков – основа надежности и долговечности гусениц. – Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2009. – 232 с.
3. А. С. № 579322 СССР // Черненко В.Т., Узлов И.Г., Худик В.Т., Поляков С.Н., Бухиник Е.Н., Манько В.В., Кугушин А.А., Казырский О.Л., Ереметов А.М. Устройства для охлаждения прокатных изделий, 1977.
4. Макаров, С.С., Карпов, А.И., Макарова, Е.В. Математическая модель конвективного теплообмена при взаимодействии потока охлаждающей жидкости, движущегося вдоль поверхности нагретого металлического цилиндра // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18. – № 1. – С. 32 – 40.
5. Липанов, А.М., Макаров, С.С., Карпов, А.И., Макарова, Е.В. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 53 – 59. doi: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // Procedia Engineering, 2016, vol. 150, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.734.
7. Макаров, С.С. Численное моделирование процесса охлаждения металлического цилиндра потоком газожид-

костной среды, движущимся горизонтально в кольцевом канале // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, – № 2. – С. 324 – 331.

8. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. – М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

9. Вукалович, М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение. 1967. – 160 с.

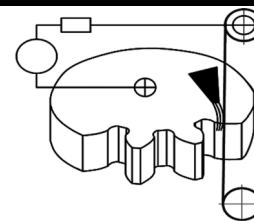
10. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г.Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Изд-во «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.

### REFERENCES

1. Chetkaryov, V.A., Dementiev, V.B., Shavrin, O.I. *Analysis and Optimization of Technologies for Metal Product Strengthening by VTMO Method*. – Izhevsk: Publishing House of IPM Ural Branch of the RAS, 1996. – pp. 136.
2. Dementiev, V.B., Shavrin, O.I., Maslov, L.N., Zasyupkin, A.D. *Track Pin Quality – Basis of Caterpillar Life and Reliability*. – Izhevsk: Publishing House of IPM Ural Branch of the RAS, 2009. – pp. 232.
3. А. С. № 579322 the USSR // Chernenko V.T., Uzlov I.G., Khudik V.T., Polyakov S.N., Bukhinik E.N., Manko V.V., Kugushin A.A., Kazyrsky O.L., Yeremetov A.M. *Devices for Rolled Product Cooling*, 1977.
4. Makarov, S.S., Karpov, A.I., Makarova, E.V. Simulator of convective heat transfer at interaction of cooling liquid flow moving along surface of heated metal cylinder // *Chemical Physics and Mesoscopy*. – 2016. – Vol. 18. – № 1. – pp. 32 – 40.
5. Lipanov, A.M., Makarov, S.S., Karpov, A.I., Makarova, E.V. Numerical investigation of high-temperature metal cylinder with flow of gas-liquid medium // *Thermo-physics and Air Mechanics*. – 2017. – Vol. 24. – № 1. – pp. 53 – 59. DOI: 10.1134/S0869864317010061.
6. Makarov S.S., Dement'yev V.B., Makarova E.V. Mathematical modeling of cooling high-temperature cylindrical workpieces // *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 393–399. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.734.
7. Makarov, S.S. Numerical simulation of metal cylinder cooling with flow of gas-liquid medium moving horizontally in ring canal // *Scientific-Engineering Bulletin of Information Technologies, Techniques, Mechanics and Optics*. – 2017. – Vol. 17, – № 2. – pp. 324 – 331.
8. Patankar, S. *Numerical Methods for Solution of Problems of Heat Exchange and Liquid Dynamics* / transl. from Engl. – М.: Energoatomizdat Publishing House, 1984. –pp. 152.
9. Vukalovich, M.P. *Thermo-physical Properties of Water and Aqueous Vapor*. – М.: Mechanical Engineering. 1967. – pp. 160.
10. *Steels and Alloys*. Reference Book of Types / under the editorship of V.G. Sorokin, M.A. Gervasiev. – М.: “Internet Engineering” Publishing House, 2001. – pp. 608.

Рецензент д.т.н. Т.М. Махнева





УДК 621.9.047

DOI: 10.12737/article\_59ae90c54b8cd0.64519859

**В.П. Смоленцев**, д.т.н.,  
**М.В. Кондратьев**, старший преподаватель,  
**Е.В. Смоленцев**, д.т.н.  
(Воронежский государственный технический университет,  
394026, г. Воронеж, Московский пр., 14)  
E-mail: Vsmolen@inbox.ru

## **Технология комбинированного эрозионно-лучевого нанесения покрытий**

*Представлен новый метод комбинированной обработки с одновременным воздействием тепловой энергии от импульса тока и подводом тепла от луча плазмы. Раскрыт механизм формирования качественных покрытий, при котором достигается формообразование толстых слоев с улучшенным микропрофилем, где выравнивание профиля микроповерхности достигается за счет воздействия концентрированной энергии, доставляемой лучом плазмы на поверхность расплавленного покрытия, вызывающей повышенную жидкотекучесть металла, стекание его с выступов в углубления и снижение высоты микронеровностей.*

**Ключевые слова:** комбинированная обработка; электроэрозионное, плазменное покрытие; тепловая энергия; область применения.

**V.P. Smolentsev**, D. Eng.,  
**M.V. Kondratiev**, Senior lecturer,  
**E.V. Smolentsev**, D. Eng.  
(Voronezh State Technical University, 14, Moskovsky Avenue, Voronezh, 394026)

## **Technology of composite erosion-radiation coating**

*A new method of composite treatment with the simultaneous impact of thermal energy of a current pulse and heat supply of a plasma beam is developed. The mechanism of a qualitative coating formation is shown at which the thick layer shaping with the improved micro-profile is achieved, where a micro-surface profile matching is achieved at the expense of the impact of concentrated energy supplied by a plasma beam to the surface of a molten coating causing an increased metal castability, its runoff from lugs into hollows and micro-irregularity height decrease.*

*A mechanism of combined process behavior is developed which allowed creating a procedure of the design of technological modes, defining their place in technological transitions and substantiating maximum accessible technological potentialities of the method offered at the realization of working matters for science intensive products.*

*The examples of the efficient use of a combined erosion-beam plasma treatment are shown, which extends a field of the method application and lightens a technological pre-production at the introduction into manufacturing science intensive products of new engineering generations.*

**Keywords:** combined treatment; electro-erosion; plasma coating; thermal energy; field of application.

Среди известных технологических методов получения покрытий особое место занимает электроэрозионное нанесение различных металлических материалов (включая твердые сплавы) на режущие кромки режущего инструмента, переходные участки инструментов

для объемного формообразования, при восстановлении геометрии деталей (например, для устранения брака в литье, штамповках).

Однако при совершенствовании процесса наращивания толстых (до 1,5 мм на диаметр) слоев проявилось нежелательное повышение

местных неровностей поверхностного слоя и растрескивание хрупкого покрытия при резком охлаждении, что вызывало необходимость в последующей трудоемкой и не всегда возможной механической обработке. Известные [1, 2] попытки предварительного плазменного подогрева детали в месте обработки не дали стабильных положительных результатов по сохранению качества поверхности, а в ряде случаев, оказались не достижимыми из-за сложной геометрии и больших или слишком малых габаритов изделия.

Лучевые методы, в частности плазменный, используемые в машиностроении, показали возможность достижения высокой твердости, износоустойчивости и желаемого качества легирования поверхностного слоя, но только в случае, если толщина не превышает десятых долей миллиметра.

Сочетание в едином процессе тепловых воздействий (электроэрозионного и плазменного) позволяет спроектировать технологию комбинированного эрозионно-лучевого плазменного покрытия, востребованного в машиностроении, в частности для локального восстановления изношенных участков деталей [3–5], и получения качественных износоустойчивых покрытий сопрягаемых поверхностей (подшипники скольжения, запорные устройства, передачи и др.) с приданием им повышенных эксплуатационных показателей, например износоустойчивости [6, 7], термостойкости [8]. В основе всех исследований лежит теория подобия, изложенная в [9].

**Механизм формирования эрозионно-лучевого покрытия.** Для описания механизма необходимо принять ряд допущений, правомерность которых подтверждена комплексом экспериментальных исследований:

1. Объем металла в капле после электроэрозионного нанесения сохраняется постоянным в течение всего периода нанесения покрытия и во время воздействия луча.

2. Начальная температура капли наносимого покрытия может быть принята как температура плавления материала покрытия, увеличенная на величину подогрева лучом материала детали в зоне покрытия и постоянный запас температуры на остывание, покрытие и теплоперенос.

3. Температура, создаваемая лучом, поступающим на каплю, должна быть не ниже начальной температуры капли покрытия, а время воздействия луча должно быть не менее длительности подвода тепловой энергии, необходимой для плавления металла капли и

присадочного материала с учетом перегрева покрытия остаточной теплотой в капле после ее нанесения электроэрозионным способом.

4. Принято, что растекание капли после нанесения покрытия и воздействия луча происходит только под действием поверхностного натяжения, хотя на формирование микропрофиля могут оказывать влияние тепловые процессы, протекающие между материалами капли, детали и окружающей средой.

5. Каждый слой, наносимый электроэрозионным покрытием, за счет диффузии изменяет состав всего покрытия, включающий ранее нанесенные и наносимый слои. Особенно это касается содержания углерода при нанесении слоев углеродом высокоуглеродистых сталей.

Механизм эрозионно-лучевого нанесения покрытий включает несколько этапов: первый – это нагрев детали лучом плазмы; второй – нанесение капель покрытия; третий – выравнивание поверхности детали при воздействии луча плазмы; четвертый – формирование износостойкого покрытия лучом плазмы.

На первом этапе протекает подогрев зоны нанесения покрытия, при котором луч направляют так, чтобы предельная температура поверхности детали не превышала границы плавления металла. Далее (второй этап) происходит процесс электроэрозионного нанесения покрытия на упрочняемую поверхность участка детали при совмещении времени попадания капли на деталь с подводом тепла лучом плазмы.

На третьем этапе происходит дальнейший разогрев материала капли, увеличение ее текучести и под действием гравитационных сил и адгезионных процессов перетекание наиболее нагретого покрытия с вершин микровыступов во впадины, за счет чего осуществляется выравнивание микропрофиля поверхности. На четвертом этапе за счет химико-термических преобразований в разогретом наружном слое обеспечивается получение износостойкого твердого покрытия.

Механизм получения покрытия эрозионно-лучевым методом может быть формализован. В качестве исходных данных должно учитываться следующее:

- достигнутые на текущий момент эксплуатационные показатели (включая износостойкость) покрытий рассматриваемого вида;
- характеристики заложенных в документации материалов и покрытий (включая жидкотекучесть, шероховатость поверхности покрытия);
- возможности технических средств техно-

логического оснащения для электроэрозионного покрытия и плазменного упрочнения, а также возможность совмещения воздействий для управления комбинированным процессом.

В качестве граничных условий для проектирования механизма можно принять:

- предельные возможности по толщине электроэрозионного нанесения требуемых качественных покрытий на заданные материалы деталей с учетом заложенных в документации требований к поверхностному слою покрытия;

- температуры плавления материалов детали и покрытия;

- показатели жидкотекучести материала покрытия.

При моделировании процесса следует рассматривать все этапы протекания механизма комбинированной обработки.

На первом этапе, где на деталь воздействует сканирующий луч плазмы, температура детали зависит от времени ее нагрева  $\tau$ .

$$\tau = \frac{F_0 \cdot h_c^2}{a_{cp}}, \quad (1)$$

где  $F_0$  – критерий Фурье;  $h_c$  – глубина слоя термического влияния;  $a_{cp}$  – средний коэффициент теплопроводности.

С учетом (1) устанавливается время  $\tau$  воздействия луча, скорость его сканирования  $W_{cp}$  на длине зоны упрочнения  $D_0$ :

$$W_{cp} = \frac{D_0 \cdot a_{cp}}{F_0 \cdot h_c^2}. \quad (2)$$

Для того чтобы объединить в комбинированном процессе действие луча для подогрева с плазменным упрочнением нужно длительность действия луча поддерживать не более времени протекания импульса  $\tau_{и}$  при электроэрозионном покрытии:

$$\tau \leq \tau_{и}. \quad (3)$$

Тогда частоту ( $\nu_{\Lambda}$ ) сканирования луча вычислим по формуле

$$\nu_{\Lambda} = \frac{W_{cp}}{H_{\Lambda}} = \frac{D_0 \cdot a_{cp}}{F_0 \cdot h_c^2 \cdot H_{\Lambda}}, \quad (4)$$

где  $H_{\Lambda}$  – регулируемый параметр, определяющий амплитуду перемещения луча, который зависит от расстояния между срезом со-

пла и поверхностью покрытия. Выбирается в диапазоне  $H_{\Lambda} = (4-6)D_0$ .

Для обеспечения наибольшего допустимого (без плавления материала) подогрева детали следует рассчитать количество теплоты  $Q$ , необходимое для нагрева:

$$Q = c_{удд} \cdot m_H \cdot (t_{пл} + t_r), \quad (5)$$

где  $c_{удд}$  – удельная теплоемкость подогреваемой массы детали;  $m_H$  – масса нагреваемого участка;  $t_{пл}$  – температура плавления материала детали;  $t_r$  – избыточная температура, гарантирующая сохранность геометрии поверхности детали под действием тепловой энергии луча.

Масса нагреваемого участка  $m_H$  может оцениваться формулой

$$m_H = \gamma_{удд} \cdot K_d \cdot H_{\Lambda} \cdot D_0, \quad (6)$$

где  $\gamma_{удд}$  – удельная плотность материала детали;  $K_d$  – коэффициент, учитывающий рассеивание тепла на нагрев соседних участков детали.

Расчеты, выполненные по первому этапу модели, являются контрольными для оценки назначения или расчета технологических режимов плазменной обработки.

На втором этапе определяющими являются параметры капли, наносимой в процессе электроэрозионного покрытия. Высоту капли можно рассчитать с учетом коэффициента перекрытия капель  $\beta$  и найти глубину впадины, определяющую шероховатость покрытия  $Rz_0$ . Форма капли зависит от текучести расплавленного сплава с учетом температуры перегрева 500...600 К и давления  $P_{мк}$ :

$$P_k = P_{мк} + P_{атм}, \quad (7)$$

где  $P_k$  – давление на каплю, наносимую при электроэрозионном покрытии;  $P_{атм}$  – атмосферное давление (может быть принято как 0,1 МПа). Поверхностное натяжение  $\sigma_n$  расплавленной капли можно принять как постоянную справочную величину для материала покрытия.

$$P_k = \sigma_n \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8)$$

где  $\sigma_n$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе «жидкий металл – воздух» (табличные данные);  $R_1, R_2$  – главные радиусы кривизны жидкости (капли). В рассматриваемом

мом случае  $R_1 = R_2 = r_0$ .

$$P_k = \frac{2\sigma_n}{r_0} \quad (9)$$

Из формулы (9) находим радиус капли  $r_0$ :

$$r_0 = \frac{2\sigma_n}{P_{mn} + P_{атм}} \quad (10)$$

В формуле (10)  $P_{mn}$  является давлением фронта волны в момент разряда:

$$P_{mn} = \rho_k \cdot V_{y.v}^2 + K_{mn}, \quad (11)$$

где  $\rho_k$  – плотность материала капли;  $V_{y.v}$  – скорость фронта ударной волны, которая зависит от длительности импульса, величины торцевого зазора ( $S_T$ ).

Для изучаемого диапазона длительности импульса и расстояния  $S_T = 10...30$  мкм скорость фронта ударной волны может быть оценена величиной  $v_{y.v} = 10^4$  м/с. В случае точечного источника  $v_{y.v}$  имеет сферическую форму, однако, для малой площади сечения канала разряда с достаточной точностью может применяться зависимость без учета кривизны поверхности обрабатываемого участка:

$$v_{y.v} = K_{y.v} \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_k}}, \quad (12)$$

где  $K_{y.v}$  – коэффициент ударной волны, учитывает среду, в которой происходит разряд (для воды  $K_{y.v} = 0,7$ );  $K_p$  – коэффициент, учитывающий перераспределение давления за фронтом ударной волны, характеризуют связь между мощностью разряда и временем действия импульса.

$$K_p = \frac{K_c \cdot U^2}{L_{эКВ} \cdot S_T}, \quad (13)$$

где  $K_c$  – коэффициент, учитывает перераспределение удельной мощности разряда по времени его действия. Для цилиндрической волны, действующей в течение  $\tau_v$ ,  $K_c = 0,15$ ;  $U_{np}$  – напряжение на электродах, необходимое для пробоя промежутка  $S_T \cdot U_{np} = 0,7U$  (здесь  $U$  – напряжение при разомкнутых элект-

тродах);  $L_{эКВ}$  – эквивалентная индуктивность разрядного контура:

$$L_{эКВ} = \frac{T^2}{(2\pi)^2 \cdot C}, \quad (14)$$

где  $T$  – период действия разряда:  $T = q \cdot \tau_v$  ( $q$  – скважность разрядов ( $q = 2...3$ ));  $C$  – емкость контура разряда (режимный параметр).

Для условий разряда при электроэрозионной обработке в водной среде (в частности это могут быть пары воды в атмосфере)  $\Delta P_{mn}$  (величина, учитывающая потери давления) может в импульсе достигать 30 МПа.

Отсюда радиус капли равен

$$r_0 = \frac{2\sigma_n}{\rho_k K_{y.v}^2 \sqrt{2\pi^2 \cdot K_c \cdot CU^2} + \Delta P_{mn} + P_{атм}} \quad (15)$$

Далее может быть рассчитана высота капли  $h_0$ , определяющая шероховатость электроэрозионного покрытия ( $Rz_0$ ):

$$h_0 = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\eta_{им} \cdot C \cdot U^2}{C_{уд} \cdot \rho_k \cdot (t_{ni} + \Delta t) \cdot r_0}, \quad (16)$$

где  $\eta_{им}$  – коэффициент полезного действия импульса;  $C_{уд}$  – удельная теплоемкость материала покрытия,  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ .

На третьем этапе рассматривается динамика растекания капли и выравнивание микроповерхности под действием подвода тепла лучом плазмы. Здесь следует математически описать образование слоя, его толщину и микроповерхность.

По аналогии с (11) при допущении  $\sigma_{n1} = \sigma_n$  ( $\sigma_{n1}$  – поверхностное натяжение капли после дополнительного нагрева лучом плазмы) радиус капли  $r_1 = r_0$ .

Тогда

$$R_{z1} = \frac{2\sigma_n}{P_{mn1} + P_{атм}} - \sqrt{\frac{4\sigma_n^2}{(P_{mn1} + P_{атм})} - \beta^2 (h_1^2 + 2h_1 \cdot r_1)}, \quad (17)$$

где  $\beta$  – перекрытие соседних капель.

На четвертом этапе формируется упрочняющий слой плазменного покрытия. Толщина этого слоя составляет несколько микрон и при заданной толщине покрытия  $h_1$ , превышающей 100 мкм, нет необходимости рассчитывать толщину слоя плазменного упрочняю-

щего покрытия, т.к. она находится в пределах погрешности расчетов.

Тогда окончательная толщина покрытия

$$h_2 = h_1 \quad (18)$$

$$R_{z2} = R_{z1} \quad (19)$$

Полученные в процессе моделирования параметры позволяют проектировать технологические процессы комбинированной обработки с получением износостойких покрытий (рис.1).

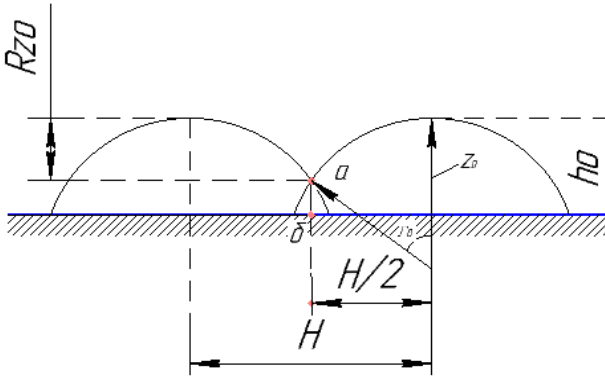


Рис. 1. Схема расчета зоны перекрытия капель  $h_n$  и высоты неровностей  $Rz_0$

### Эксплуатационные параметры комбинированного эрозионно-лучевого плазменного износостойкого покрытия

Главными факторами, определяющими износостойкость деталей с покрытием, являются [10]:

- твердость слоев покрытия;
- толщина покрытия и упроченного слоя;
- шероховатость поверхностного слоя (в парах трения);
- условия работы деталей (контактные напряжения, скоростные режимы, ударные нагрузки, контактное трение, температурные факторы и др.).

Для подтверждения правомерности положений разработанного механизма на созданной установке (рис. 2) были проведены экспериментальные исследования и обобщен опыт внедрения деталей с комбинированным покрытием.

На рис. 3 показаны результаты экспериментальных исследований по сравнительным испытаниям износа образцов и деталей после электроэрозионного и комбинированного покрытия жаропрочных сплавов.

На рис. 3 под индексом «3» в числителе приведены экспериментальные, а в знаменателе – расчетные значения износа (мм).

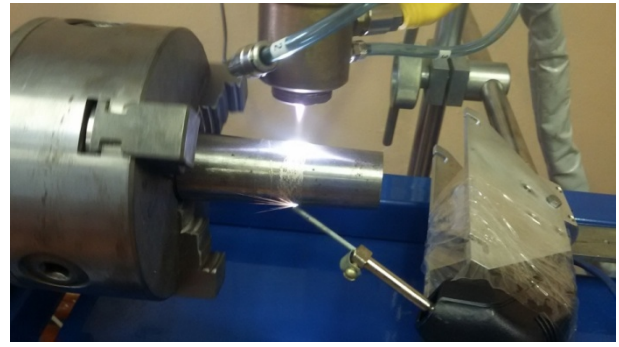


Рис. 2. Комбинированная установка для нанесения покрытий

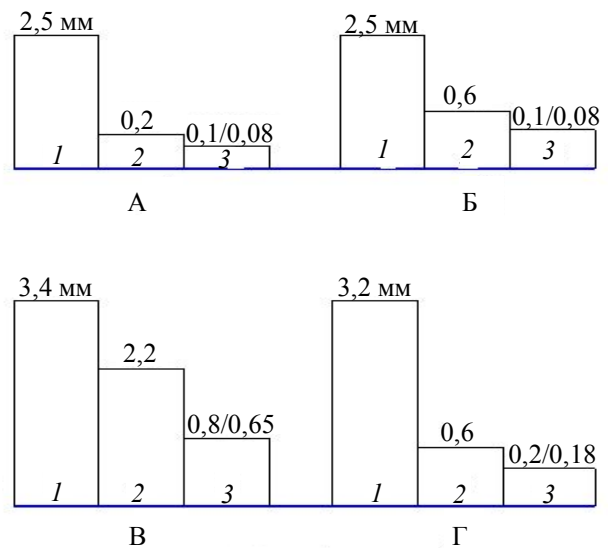


Рис. 3. Износ сплавов ВЖЛ (а) и ЭИ437Б (б) с покрытием:

А – Cr; Б – WC; В – MoS<sub>2</sub>; Г – ZrB<sub>2</sub>; 1 – материал без покрытия; 2 – электроэрозионное покрытие; 3 – комбинированное покрытие

Испытания проводились при следующих режимах: контактное давление образцов – 0,25 МПа; скорость относительного перемещения контактных пар 2,0...2,5 м/с; толщина покрытия 0,25 мм; температура испытаний 1200 К; длительность испытаний 350 ч.

На рис. 3 видно, что здесь хорошо подтверждается качественная сторона механизма, так как износ жаропрочных сплавов в условиях трения после электроэрозионного нанесения покрытия снизился до 10 – 12 раз, а после комбинированного нанесения покрытий – в десятки раз.

Приведенные сравнительные (эксперимент – расчет по модели) результаты показывают, что расчетные значения близки к экспериментальным, а имеющиеся отклонения объясняются изменениями условий протекания процесса ввиду нестабильности свойств материала.

лов, шероховатости поверхности покрытия, контактного давления, влияние износа упрочняющего и электроэрозионного покрытия на результаты испытаний.

На созданной машине трения были проведены испытания образцов для установления коэффициента трения (рис. 4), что является подтверждением полезности покрытия из чугуна. Материал деталей – сталь 45; покрытие на контактных парах – чугун СЧ24; контактное давление 1,6 МПа; площадь контакта – 12 см<sup>2</sup>; температура испытаний 460...500 К; скорость перемещения контактных тел 1,0 м/с. Работа со смазкой в абразивной среде.

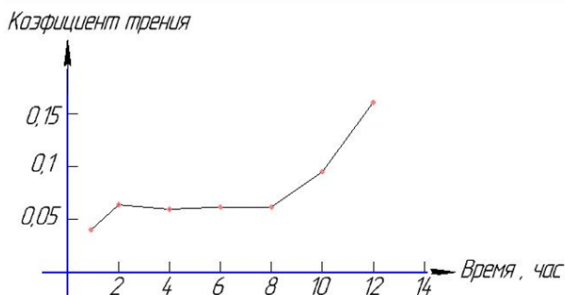


Рис. 4. Изменение коэффициента трения по мере износа покрытия

Анализ рис. 4 показывает, что коэффициент трения в течение 8 ч изменяется незначительно, затем, очевидно под действием абразива, плазменное напыление стирается и начинается интенсивное возрастание коэффициента трения, что подтверждает предлагаемый в работе механизм повышения износостойкости комбинированным методом нанесения и упрочнения покрытий.

Для повышения износостойкости и защиты от коррозии деталей из различных металлов на поверхность могут наноситься титановые покрытия. На рис. 5 приведена динамика износа стальной детали с электроэрозионным покрытием из ОТ4-1 (2) и с плазменным упрочнением (3) наносимого покрытия. Условия испытаний: контактное давление 0,3 МПа; скорость контактного перемещения между сопряженными образцами 0,3 м/с. Испытания проводились со смазкой в трансформаторном масле, содержащем 0,05 % по объему абразивного порошка из карбида бора. Пары трения работали в масле с абразивом.

#### Проектирование технологического процесса комбинированного нанесения качественных покрытий

С учетом разработанного механизма получения комбинированного покрытия созданы

условия для обоснованного назначения технологических режимов, что дало возможность разработать методику проектирования комбинированного процесса для нанесения износостойких покрытий на детали различного назначения, алгоритм которой представлен на рис. 6.

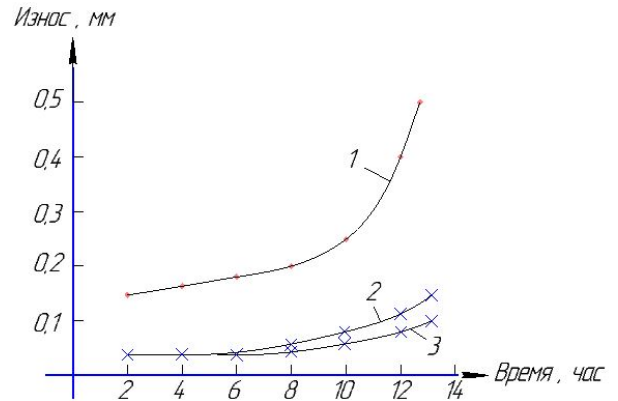


Рис. 5. Износостойкость титановых покрытий: 1 – деталь без покрытия; 2 – покрытие толщиной 0,3 мм из ОТ4-1; 3 – покрытие с плазменным упрочнением

Исходные данные ТП включают сведения о детали с покрытием, месте его расположения, сведения о требуемом покрытии, материальной и научной базе для получения кондиционной детали.

Здесь могут быть два варианта использования рассматриваемого технологического процесса:

- 1) для получения износостойкой поверхности деталей, работающих в узлах трения;
- 2) для восстановления размеров изношенных поверхностей с приданием им повышенной твердости.

Таким образом, исходные данные, приведенные на рис.6, включают:

- требования к качеству поверхностного слоя упрочненной детали, обеспечивающие эксплуатационные свойства изделия;
- анализ особых свойств материалов: детали (температура плавления, удельная теплоемкость; покрытий (жидкотекучесть, температура плавления и др.);
- состояние поверхности под покрытие – возможно ли в таком виде использовать для нанесения покрытий с применением электрического поля.

Здесь же следует проанализировать возможность реализации граничных условий:

- удовлетворяет ли шероховатость поверхности после покрытия требованиям чертежа детали;
- допустима ли температура плавления материала детали для ее сохранности в процессе

нанесения покрытия;  
– отвечает ли предельная толщина покры-

тия заданным условиям восстановления работоспособности детали.

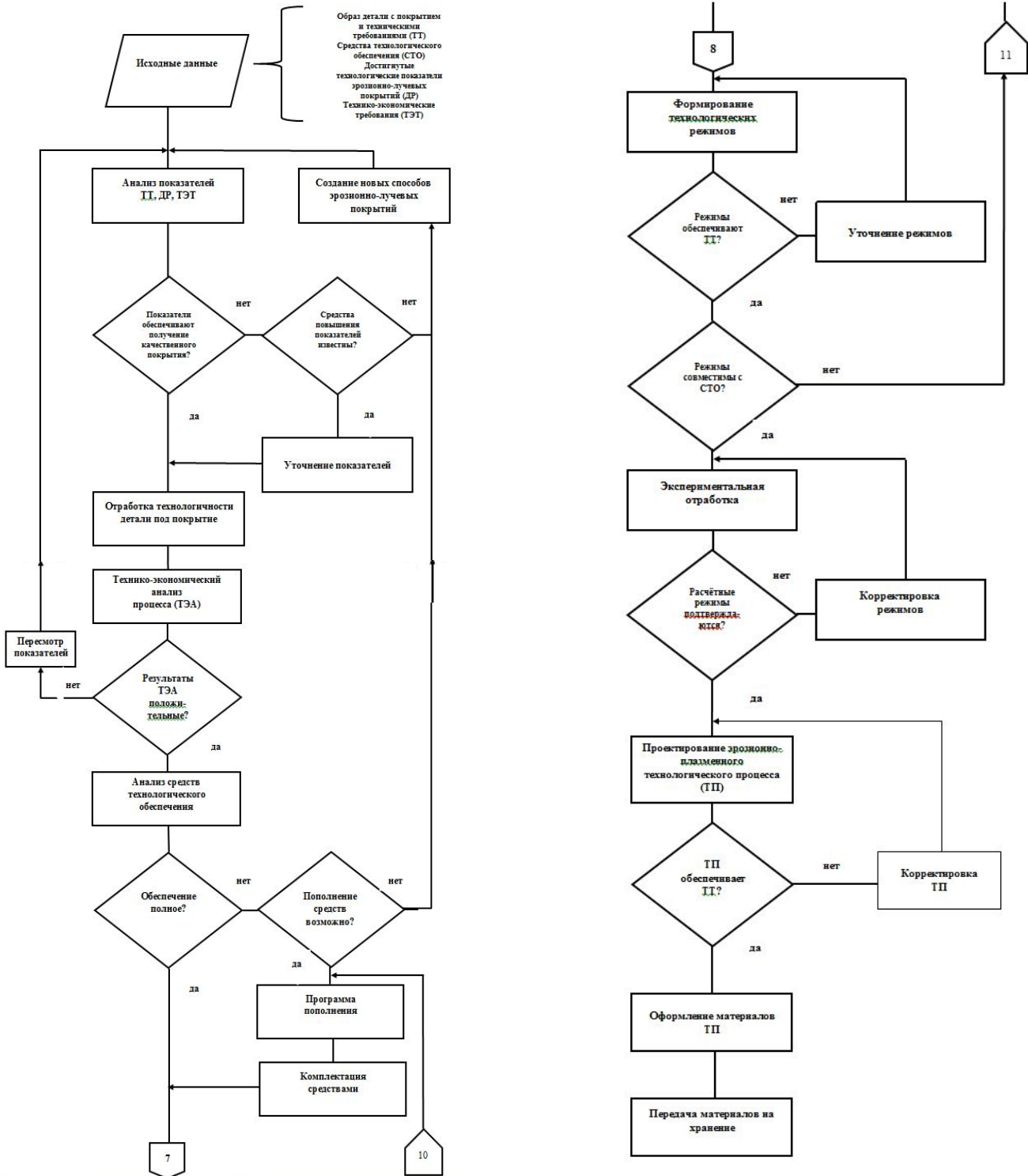


Рис. 6. Алгоритм проектирования эрозионно-лучевого технологического процесса нанесения износостойких покрытий

На первом этапе необходимо выбрать варианты реализации совмещения различных видов комбинированных покрытий [11] и обоснования выбора материалов, обеспечивающих эксплуатационные свойства изделий.

Здесь же [11] требуется провести анализ возможностей известных вариантов покрытий и обосновать применение рационального вида. Под такой вариант необходимо выполнить отработку технологичности объекта исследова-

ний, после чего разработать технологические режимы, учитывающие специфику предложенного эрозионно-лучевого способа, и спроектировать технологический процесс.

### Заключение

Использование созданного способа, механизма его реализации, алгоритма проектирования комбинированного процесса позволяет расширить область эффективного использования нового процесса, снизить затраты на технологическую подготовку производства и ускорить запуск в производство новых поколений летательных аппаратов, где рассматриваемые покрытия находят наибольшее применение.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев, Г.А., Коденцев, С.Н., Усков, И.А. Повышение эффективности газоплазменного напыления формированием заданного микрорельефа и упрочняющей обработкой // Нетрадиционные технологии в технике, экономике и социальной сфере: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. – Воронеж: ВГТУ, 2000. – С. 89–92.
2. Пат. 2537429 (РФ) Способ лазерного упрочнения плоской заготовки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, А.Н. Осеков / Заявка 20111230034 от 07.06.2011. Оpubл. 10.01.2015. Бюл. изобр. №1.
3. Бутовский, М.Э. Нанесение покрытий и упрочнение материалов концентрированными потоками энергии. Ч. 1: Электроэрозионное упрочнение. Техника и технология. – М.: ИКФ «Каталог», 1998. – 340 с.
4. Качество машин: справочник в 2-х т. / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 1995. Т.1. – 256 с. Т.2. – 432 с.
5. Пат. 2396152 (РФ) Способ электроэрозионного восстановления детали из стали или чугуна / В.П. Смоленцев, А.В. Бондарь, А.Н. Некрасов / Заявка 2008120420 от 22.05.2008. Оpubл. 10.08.10. Бюл. изобр. №22.
6. Васильев, А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 13–20.
7. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
8. Смоленцев, В.П., Коровин, А.А., Коптев, И.И., Салтанаева, Е.А. Технология электрохимического получения теплообменных поверхностей для интенсивного охлаждения // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – №1(19). – С. 34–40.
9. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.

10. Бржозовский, Б.М., Мартынов, В.В., Зенин, Е.П. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. – Саратов: СГТУ, 2009. – 176 с.

11. Сафонов, С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. – 224 с.

### REFERENCES

1. Sukhochev, G.A., Kodentsev, S.N., Uskov, I.A. Gas-plasma sputtering efficiency increase by formation of specified micro-relief and strengthening // *Nonconventional Technologies in Engineering, Economy and Social Sphere: Inter-College Proceedings. Issue. 2.* – Voronezh: VSTU, 2000. – pp. 89–92.
2. Pat. 2537429 (the RF) *Method of Flat Blank Laser Hardening* / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, A.N. Osekov / Application 20111230034 dated 07.06.2011, published on 10.01.2015. Bulletin of Inventions №1.
3. Butovsky, M.E. Deposition of coatings and material hardening with concentrated flows of energy. Part. 1: *Electro-Erosion Hardening. Engineering and Technique.* – M.: IKF “Catalogue”, 1998. – pp. 340.
4. *Machine Quality: Reference Book in 2 Vol.* / under the general editorship of A.G. Suslova. – M.: Mechanical Engineering, 1995. Vol.1. – pp. 256. Vol.2. – pp. 432.
5. Pat. 2396152 (the RF) *Method of Electro-Erosion Reduction of Parts Made of Steel or Cast Iron* / V.P. Smolentsev, A.V. Bondar, A.N. Nekrasov / Application 2008120420 of 22.05.2008., published on 10.08.10. Bulletin of Inventions №22.
6. Vasiliev, A.S. Statistic model of properties transformations in parts in technological media // Bulletin of MSTU. Series. Mechanical Engineering. – 1997. – № 4. – pp 13–20.
7. Vasiliev, A.S. *Properties Directed Formation of Engineering Parts* / A.S. Vasiliev et al. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 352.
8. Smolentsev, V.P., Korovin, A.A., Koptev, I.I., Saltanaeva, E.A. Technology of electro-chemical manufacturing heat-exchange surfaces for intensive cooling // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2013. – №1(19). – pp. 34–40.
9. Bezyazychny, V.F. *Similitude Method in Engineering Techniques.* – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.
10. Brzhozovsky, B.M., Martynov, V.V., Zenin, E.P. *Cut-ter Hardening by Impact of Low-temperature Plasma of Combined Discharge.* – Saratov: SSTU, 2009. – pp. 176.
11. Safonov, S.V. *Technological Support of Product Operating Characteristics.* – Voronezh: IPC VSU, 2015. – pp. 224.

Рецензент д.т.н. О.Н. Кириллов



УДК 621.9.048

DOI: 10.12737/article\_59ae90c63c66d6.60177261

А.А. Груздев, аспирант,

Ю.А. Моргунов, к.т.н., Б.П. Саушкин, д.т.н.

(Московский политехнический университет, 107023, Москва, ул. Б.Семеновская, 38)

E-mail: morgunov56@mail.ru; sbp47@mail.ru

## Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий

*Проведены исследования энергетических характеристик эрозионного импульса и геометрических параметров единичных эрозионных лунок при наложении разрядных импульсов малых энергий. Показана нелинейная зависимость энергии импульса от его длительности в данных условиях. На основании результатов эксперимента уточнена величина коэффициента электроэрозионной обрабатываемости для стали 12Х18Н10Т.*

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка; единичная электроэрозионная лунка; коэффициент электроэрозионной обрабатываемости.

A.A. Gruzdev, Post graduate student,

Yu.A. Morgunov, Can. Eng., B.P. Saushkin, D. Eng.

(Moscow Polytechnic University, 38, B. Semyonovskaya Str., Moscow 107023)

## Peculiarities of electro-erosion machining with discharge low-energy pulses

*The investigations of energetic characteristics of an erosion pulse and geometric parameters of single erosion dimples at the application of discharge low-energy pulses are carried out. A non-linear dependence of pulse energy upon its length under given conditions is shown. On the basis of the experiment results a value of the factor of electro-erosion workability for steel 12Ch18N10T is specified.*

**Keywords:** electro-erosion machining; single electro-erosion dimple; factor of electro-erosion workability.

Актуальным направлением развития технологий электроэрозионной обработки (ЭЭО) становится обработка микрообъектов. Так, по материалам международных симпозиумов по электрической обработке материалов (International Symposium for Electromachining, ISEM) в 2010 – 2016 гг. суммарная доля статей по электроэрозионной микрообработке к общему объему статей по ЭЭО составила 20 %.

Эта область применения ЭЭО характеризуется использованием разрядных импульсов малых энергий в диапазоне 50...500 мкДж [1, 2]. Прошивку отверстий малого диаметра и электроэрозионную проволочную вырезку проводят обычно в диапазоне энергий разрядных импульсов 250...3500 мкДж [3, 4]. Поскольку энергию разрядного импульса изменяют в большинстве случаев, регулируя длительность импульса, речь идет об импульсах длительностью 0,5...10 мкс. Учитывая, что длительность искровой стадии разрядного импульса имеет порядок  $10^{-6}$  с, можно предположить, что роль этой стадии в развитии процесса разряда в этом случае будет существен-

ной.

Недостаточная исследованность этого вопроса затрудняет расчетную оценку производительности операций электроэрозионной микрообработки, их нормирование и заставляет выбирать параметры режима обработки опытным путем.

При оценке объемной производительности ЭЭО используют выражение [5]:

$$Q = k_m k_{ми} k_{ж} k_{ро} k_{эф} W_p f, \quad (1)$$

где  $k_m$  – коэффициент, определяемый теплофизическими характеристиками материала заготовки;  $k_{ми}$  – коэффициент, определяемый материалом электрода-инструмента;  $k_{ж}$  – коэффициент, зависящий от свойств рабочей жидкости;  $k_{ро}$  – коэффициент, зависящий от параметров режима, в частности, от полярности подключения электродов;  $k_{эф}$  – коэффициент, связанный с эффективностью использования импульсов и отражающий долю рабочих импульсов в общем числе подаваемых в единицу времени импульсов напряжения.

Коэффициент  $k_m$  определяет электроэрози-

онную обрабатываемость материала. Значения данного коэффициента определяются экспериментально в конкретных условиях обработки. В достаточно узком диапазоне энергий разряда, когда изменением формы единичной разрядной лунки можно пренебречь, его можно выразить как отношение среднего объема единичной лунки  $V_{л}$  к средней энергии разрядного импульса  $W_{и}$ .

Для оценки этого коэффициента разработана методика проведения эксперимента и выполнен анализ результатов обработки стали 12Х18Н10Т разрядными импульсами малой длительности.

Экспериментальные исследования проводили на электроэрозионном прошивочном станке модели ЭП310П, обеспечивающем обработку в диапазоне электрических параметров режима, приведенных в табл. 1. Станок предназначен для прошивки отверстий диаметром 0,1...3,0 мм и обеспечивает функцию подачи единичного импульса напряжения на межэлектродный промежуток.

**1. Электрические параметры режима обработки**

Наименование параметра	Значение
Напряжение между электродами, В	20...200
Ток обработки, А	1,0...15
Длительность импульса, мкс	1,0...30
Частота следования импульсов, кГц	1,0... 100
<i>Примечание:</i> Рабочая жидкость – вода.	

Количественная оценка мощности разрядного импульса производилась графическим интегрированием с использованием осциллограмм тока и напряжения, полученных с применением осциллографа фирмы Tektronix модели TDS 2012C и специального шунта.

Суть графического интегрирования сводится к разбивке осциллограмм на  $n$  равных временных участков  $\Delta t$ . Для каждого из участков графически определялись средний ток ( $I_{ср, i}$ ) и среднее напряжение ( $U_{ср, i}$ ), а энергия разрядного импульса находилась суммированием.

Для получения единичной лунки полированный образец ( $Ra = 0,08$  мкм) помещали в рабочую зону станка. Латунный электрод-инструмент диаметром 0,7 мм с помощью щупа (набор № 2 ГОСТ 882-75) подвели к образцу, обеспечивая зазор 0,02 мм. Далее накладывали единичный импульс с напряжением холостого хода 200 В и длительностью, выбираемой в диапазоне 1,0...30 мкс. Данную операцию повторяли 3–5 раз для получения средних значений.

Измерение геометрических параметров лунок проводилось на микроскопе Olympus VХ 51 с использованием его программных функций. Глубину лунки принимали как разность координат положений объектива микроскопа при фокусировке на поверхности образца и на доннышке лунки. Фотографии типичных единичных эрозионных лунок представлены на рис. 1.

Для оценки объема лунки использовалась модель объема шарового сегмента. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2, а также на рис. 2 и 3.

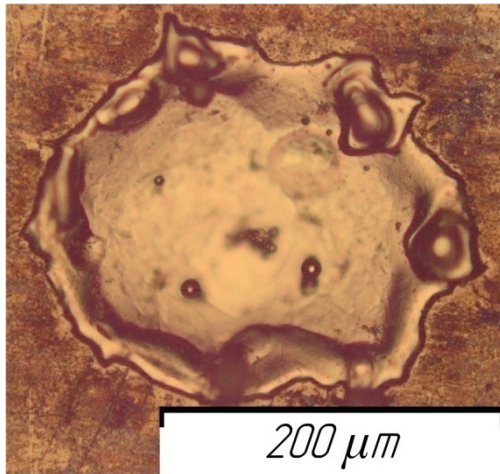
Рассмотрим зависимости энергетических характеристик разряда от длительности импульса (рис. 2).

Как видно, зависимости средних значений напряжения (кривая 2) и тока (кривая 3) в импульсе от длительности импульса имеют экстремум, а энергия импульса зависит от его длительности по закону, близкому к параболическому.

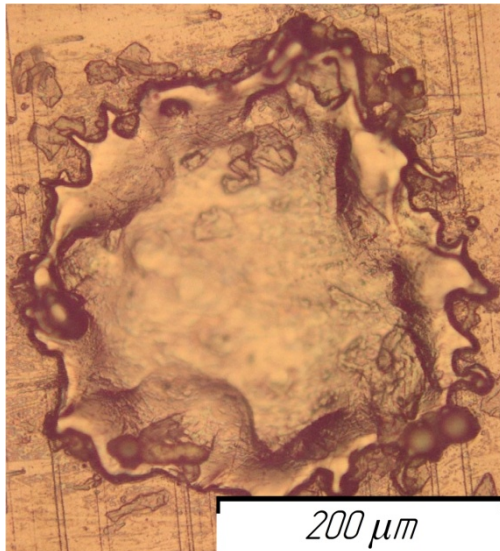
При наложении на межэлектродный промежуток (МЭП) импульса напряжения происходит его рост до величины, необходимой для пробоя. После пробоя напряжение на МЭП начинает падать с крутым фронтом до величины напряжения горения дуги 20...25 В. При длительности импульса  $\tau_{и} > 10$  мкс дуговая (низковольтная) часть импульса начинает превалировать над искровой (высоковольтной), при расчете среднего напряжения.

**2. Результаты экспериментов**

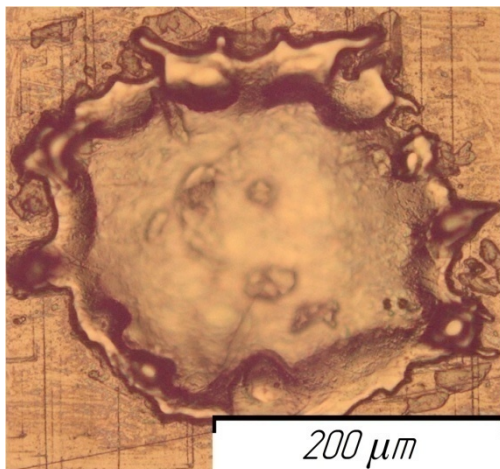
Параметр	Значения величин					
	2,0	5,0	10	15	20	30
Длительность импульса, мкс						
Энергия импульса, мкДж	275	1056	–	2620	–	3342
Средний ток в импульсе, А	5,5	7,7	–	6,4	–	5,2
Среднее напряжение импульса, В	26,8	32,5	–	26,2	–	25,8
Объем лунки, $10^{-5}$ мм <sup>3</sup>	1,2	7,1	13,7	–	17,8	22,1
Диаметр лунки, мкм	74	153,5	214,3	–	216,5	214,3
Глубина лунки, мкм	6,7	9	9	–	11,3	14,3
Отношения диаметра к глубине	11,1	17,1	23,8	–	19,1	15



$\tau_{и} = 5$  мкс;  $W_{и} = 1700$  мкДж;  
 $d_{л} = 142$  мкм;  $h_{л} = 9$  мкм;  
 $V_{л} = 61 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>



$\tau_{и} = 20$  мкс;  $W_{и} = 5000$  мкДж;  
 $d_{л} = 216$  мкм;  $h_{л} = 10$  мкм;  
 $V_{л} = 156 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>



$\tau_{и} = 30$  мкс;  $W_{и} = 5500$  мкДж;  
 $d_{л} = 220$  мкм;  $h_{л} = 14$  мкм;  
 $V_{л} = 226 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>

Рис. 1. Фотографии единичных лунок

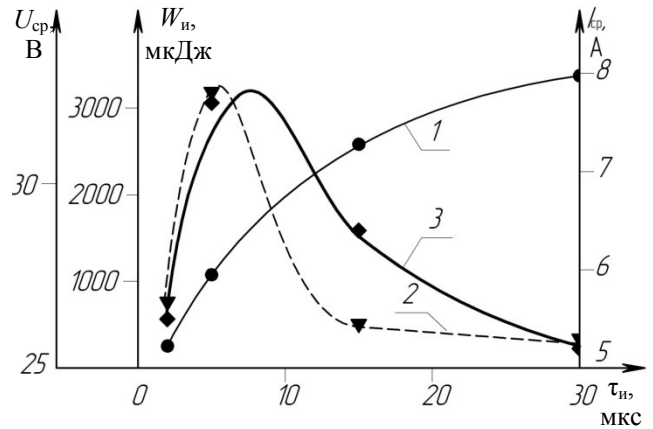


Рис. 2. Зависимости энергетических характеристик разряда от длительности импульса:

1 – энергия импульса; 2 – среднее напряжение в импульсе; 3 – средний ток в импульсе

Средний ток возрастает с длительностью импульса (кривая 3) в связи с изменением сопротивления плазменного столба вплоть до достижения его максимального диаметра, а затем начинает снижаться. При достаточно большой длительности импульса, когда влияние искровой стадии разряда становится незначительным, энергия импульса (кривая 1) прямо пропорциональна его длительности и зависимость, близкая к параболической, становится близкой к линейной.

Зависимости геометрических параметров лунки от энергии импульса представлены на рис. 3. Анализируя зависимости 3 и 4 можно заключить, что при длительности импульса до 10 мкс наблюдается преобладающий рост диаметра лунки, в то время как при длительности импульса 10...30 мкс преобладает увеличение глубины лунки. Отношение  $d_{л}/h_{л}$  сначала быстро возрастает (кривая 2), а затем проходит через экстремум с последующим снижением.

Данную особенность можно объяснить тем, что при малых длительностях импульса лунка формируется преимущественно по механизму испарения материала, в то время, как при больших длительностях импульса значительная доля объема лунки формируется в результате выброса материала в жидко-капельном состоянии.

Объем лунки, как и энергия импульса, зависит от длительности импульса по закону, близкому к параболическому (кривая 1). Сравнение кривых 1 (см. рис. 2 и 3) и выполненные расчеты показывают, что в условиях данного эксперимента подтверждается близкая к линейной зависимость объема лунки от

энергии импульса, т.е.  $V_{л} \sim W_{и}$ . Тогда в соответствии с (1) коэффициент пропорциональности представляет собой вышеупомянутый коэффициент электроэрозионной обрабатываемости:

$$k_m = \frac{V_{л}}{W_{и}}. \quad (2)$$

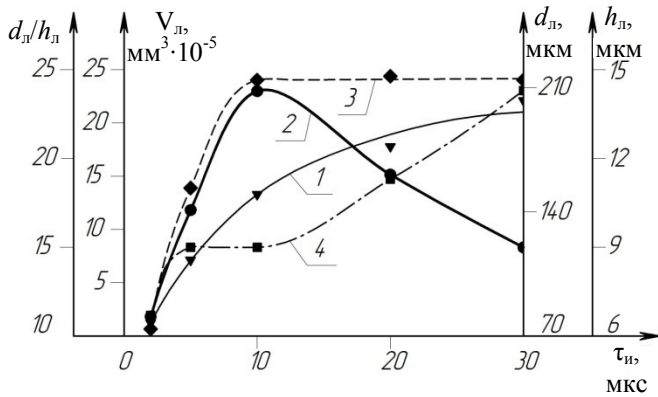


Рис. 3. Зависимости геометрических параметров лунки от длительности импульса:

1 – объём лунки; 2 – отношение диаметра к глубине; 3 – диаметр; 4 – глубина

Расчеты показали, что в наших условиях величина коэффициента обрабатываемости для стали 12X18H10T составляет 0,06 мм<sup>3</sup>/Дж. Полученный результат можно использовать для обоснованного нормирования операции электроэрозионной микрообработки и прошивки отверстий диаметром менее 0,5 мм, с погрешностью ±10 % в диапазоне энергий импульса 250...3500 мкДж.

### Выводы:

1. Показано, что при длительности разрядного импульса менее 10 мкс искровая стадия разряда существенно влияет на процесс электроэрозионного разрушения материала, что приводит к нелинейной зависимости энергии импульса и объема лунки от длительности импульса.

2. Наблюдается линейная взаимосвязь между объемом лунки и энергией разряда, характерная для длинных импульсов.

3. При длительности импульса менее 10 мкс геометрические параметры эрозионной лунки определяются преимущественно механизмом испарения материала.

4. Коэффициент электроэрозионной обрабатываемости для стали 12X18H10T при обработке импульсами малых энергий составляет 0,06 мм<sup>3</sup>/Дж.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тао J. Modeling of the anode crater in electrical discharge machining / J. Tao, J. Ni, A.J. Shih // Trans ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 2012. № 1, 134. – P. 1 - 11.

2. Ставицкий, Б.И. Из истории развития электроискровой обработки материалов / Б.И. Ставицкий. – Харьков: ЧФ «ЦентрИнформ», 2013. – 104 с.

3. Гудкова, О.С., Блинова, Т.А. Анализ методов получения малых отверстий в деталях из нержавеющей стали // Международная научно-техническая конференция «Исследования и инновации в ВУЗе», г. Белгород, 2012: Сборник докладов. – 2012. Ч. 2. С. 320 – 323.

4. Научные технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии: учеб. пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин / Под ред. Б.П.Саушкина. – М.: Форум, 2013. – 928 с.

5. Елисеев, Ю.С., Саушкин, Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Саушкина Б.П. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2010. – 437 с.

### REFERENCES

1. Tao J. Modeling of the anode crater in electrical discharge machining / J. Tao, J. Ni, A.J. Shih // Trans ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 2012. № 1, 134. – P. 1 - 11.

2. Stavitsky, B.I. *From History of Material Spark Machining* / B.I. Stavitsky. – Kharkov: ChF “CenterInform”, 2013. – pp. 104.

3. Gudkova, O.S., Blinova, T.A. Analysis of methods for manufacturing small holes in stainless steel parts // *The Inter. Scientific-Tech. Conf. “Investigations and Innovations in College”*, Belgorod, 2012: Proceedings. – 2012. Part 2. pp. 320 – 323.

4. *Science Intensive Techniques of Engineering Production. Physico-Chemical Methods and Techniques: Textbook* / Yu.A. Morgunov, D.V. Panov, B.P. Saushkin, S.B. Saushkin / under the editorship of B.P. Saushkin. – M.: Forum, 2013. – pp. 928.

5. Yeliseev, Yu.S., Saushkin, B.P. *Electro-erosion Treatment of Parts of Aero-space Engineering* / under the editorship of B.P. Saushkin – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2010. – pp. 437.

Рецензент д.т.н. А.С. Калашиников

УДК 62-1/-9

DOI: 10.12737/article\_59ae90c6572822.07490267

В.Г. Гусев, д.т.н.,

А.В. Морозов, к.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof\_gusev@mail.ru

## Технология дискретизации рабочих поверхностей шлифовальных кругов лазером и гидроабразивной струей

*Рассмотрена новая область использования лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления для процессов высокочастотной дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов. Разработаны способы высокочастотной дискретизации высоко концентрированными потоками энергии и конструкции дискретных инструментов, позволяющие уменьшить уровень вибрации технологической системы и одновременно сохранить достоинства дискретного шлифования.*

**Ключевые слова:** шлифование; высокочастотная дискретизация; режущая поверхность; лазерный луч; гидроабразивная струя высокого давления; уровень вибрации.

V.G. Gusev, D. Eng.,

A.V. Morozov, Can. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir, 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

## Discretization technology of abrasive disc operating surfaces with laser and hydro-abrasive jet

*The well-known discrete abrasive discs are characterized by a high vibration level of the technological system that causes the geometrical characteristics degradation of surfaces ground, life and technological equipment decrease and tool quick wear. New methods of the high-frequency discretization of a cutting surface with the use of a laser beam and a hydro-abrasive jet and also designs of grinding tools decreasing a vibration level of the technological system are developed.*

*The processes of the high-frequency discretization of grinding discs are improved experimentally: the path of a high-concentrated energy flow motion is substantiated, the modes of hole cutting out in abrasive of a tool and a field of the application of a laser beam and a high-pressure hydro-abrasive jet are defined.*

**Keywords:** grinding; high-frequency discretization; cutting surface; laser beam; high-pressure hydro-abrasive jet; vibration level.

Известные дискретные шлифовальные круги, выполненные в виде корпуса и абразивных сегментов, расположенных по его периферии, а также цельные круги с периферийными выступами и впадинами [1] наряду с достоинствами (снижение температуры шлифуемой поверхности до 3-х раз, повышение качества поверхностного слоя, производительности до 2-х раз и др.) характеризуются высоким уровнем вибрации технологической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка». Этот существенный недостаток обусловлен ударными импульсами, наносимыми абразивными сегментами (выступами) по обрабатываемой поверхности заготовки, что вызывает ухудшение геометрических характеристик шлифованных поверхностей, снижение долговечности технологического оборудования и

быстрый износ шлифовального инструмента.

Снижения энергии ударных импульсов можно достичь путем уменьшения протяженностей воздушных промежутков между смежными сегментами, однако этот путь неизбежно приводит к повышению тепловой напряженности процесса шлифования, что нивелирует достоинства указанных выше дискретных инструментов. Размещение сегментов и абразивных выступов на малом расстоянии 5... 10 мм приводит к существенному уменьшению площадей, статических характеристик и моментов сопротивления несущих сечений режущих элементов и невозможности использования известных дискретных кругов по причине низкой механической прочности и разрушения их в процессе шлифования.

Создание высокопрочных дискретных

шлифовальных инструментов, обеспечивающих низкий уровень вибрации элементов технологической системы, является научной проблемой, разрешение которой позволит повысить геометрические показатели качества шлифованной поверхности, ресурс работы шлифовального инструмента и долговечность технологического оборудования.

Существующие способы дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов в принципе не могут достичь поставленной цели [2] по указанным выше причинам, поэтому были разработаны новые способы дискретизации [3, 4] и конструкции шлифовальных инструментов [5, 6] с малыми масштабами дискретизации. С этих позиций для реализации процессов высоко частотной дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов проанализирована возможность использования высоко концентрированного потока энергии.

Лазерный луч и гидроабразивная струя высокого давления при обработке абразивного материала находятся вне конкуренции по сравнению с обработкой резанием и традиционным прессованием и могут выполнить дискретизацию малого масштаба. При малой протяженности режущих и прерывающих процесс шлифования участков (5...10 мм) обработка дискретным инструментом характеризуется высокочастотными циклами «резание – отдых», которые принципиально изменяют динамику процесса шлифования и снижают уровень вибрации элементов технологической системы [7].

В процессе дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов использовали технологический волноводный CO<sub>2</sub>-лазер ТЛ-1000 с диффузионным охлаждением рабочей смеси. Длина волны лазерного излучения – 10,6 мкм, номинальная мощность – 850 Вт, максимальная мощность – 1000 Вт, частота импульсов излучения – 100...500 Гц, длительность импульса излучения – 1,0...0,2 мкс. При выжигании отверстий измеряли температуру тепловизором модели Therma CAM S65.

Первые опыты по обработке высокочастотной дискретизации шлифовальных кругов путем выжигания лазерным лучом системы радиальных отверстий малого диаметра показали, что в абразивном материале появляются локальные вспучивания, цвета побежалости желто-оранжевой окраски, свидетельствующие о термическом повреждении исходной структуры инструмента.

В соответствии со стандартом, регламенти-

рующим безопасность выполнения шлифовальных операций, круги перед установкой на шпиндель шлифовального станка должны подвергаться испытанию на механическую прочность при 1,5-кратной перегрузке по рабочей частоте вращения. Шлифовальные круги с измененной структурой не выдерживали испытания на механическую прочность и разрывались после непродолжительного вращения (менее 1 мин), что потребовало экспериментальной отработки процесса выжигания отверстий.

Для устранения термического повреждения абразивного материала уменьшали плотность мощности лазерного излучения, отверстия выжигали при большом числе проходов и периодическом прерывании процесса выжигания, однако – все это приводило к снижению производительности процесса дискретизации и увеличению себестоимости шлифовального инструмента. В этой связи для снижения тепловой напряженности выжигание выполняли парами смежных строк с поочередным позиционированием лазерного луча с длинной на короткую строку и обратно, что обеспечило многократное кратковременное остывание абразивного материала. При таком способе выжигание одного отверстия на глубину 25 мм требовало 6 – 7 рабочих проходов лазерного луча и такое же число позиционирований к каждому отверстию.

Экспериментальную отработку процесса дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов проводили также на гидроабразивной установке ALBA 4-1313. Давление рабочей смеси в гидроабразивной установке составляло 5,33 МПа, давление воды в контуре высокого давления  $P = 384...432$  МПа. Для вырезания отверстий использовали гранатовый абразив типа GMA Garnet Mesh 80 (размер частиц абразива – 0,178 мм). Расход гранатового абразива  $Q_{абр} = 150$  г/мин. Диаметр выходного сопла  $d_c = 0,25$  мм, диаметр фокусирующей трубки  $d_{ф.т} = 0,76$  мм, длина трубки  $L_{ф.т} = 75$  мм.

Отверстия в шлифовальном инструменте вырезали с использованием разработанного способа и спроектированной и изготовленной технологической оснастки (рис. 1) [3].

Оснастка включает плиту 1 и стойку 2, к которой прикреплены держатель 3 и фиксатор 4. В отверстие держателя 3 вставлен вал 5. По периферии делительного диска 6 просверлены радиальные отверстия, окружной шаг которых определяется шагом вырезаемых отверстий. В фиксатор 4 ввернут винт 7. На коническую

ступень вала 5 установлена планшайба 8. Делительный диск 6, планшайба 8 и шлифовальный круг 9 жестко соединены болтами. При повороте диска 6 на один окружной шаг шлифовальный круг 9 поворачивается на окружной шаг вырезаемых отверстий.

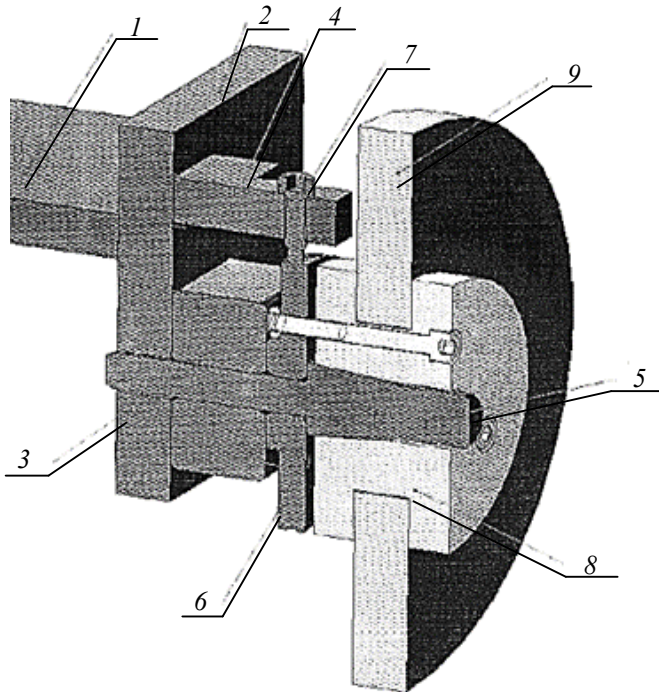


Рис. 1. Экспериментальная установка для высоко частотной дискретизации инструмента гидроабразивной струей высокого давления

Гидроабразивной головкой вырезали последовательно все отверстия одной строки, затем режущую головку перемещали в исходную позицию, а шлифовальный круг 9 поворачивали на центральный угол, соответствующий дуге окружности между соседними строками. Для поворота круга 9 на окружной шаг винт 7 выворачивали из фиксатора 4, освобождая тем самым диск 6. Поворачивали диск 6 вместе с кругом 9 на один окружной шаг, после чего вворачивали винт 7, фиксируя круг 9 в новой угловой позиции для вырезания отверстий по второй строке. Дискретизация инструмента заканчивается после вырезания всех отверстий в круге.

Отверстия, формируемые лазерным лучом в теле шлифовального круга, образуются в результате сублимации абразивных зерен и связки, приводящей к искажению цилиндрической формы отверстий. Погрешности диаметральных размеров и формы в продольном и поперечном сечениях отверстий приводят к неравномерному распределению масс дискретного шлифовального круга и возникнове-

нию главного вектора и главного момента дисбалансов, которые негативно сказываются на снижении геометрической точности шлифованных поверхностей и других важнейших показателях процесса шлифования. Было установлено, что погрешности выжженных отверстий в значительной степени определяются траекторией движения высоко концентрированного потока энергии.

Применение гидроабразивной струи высокого давления исключает термическое повреждение абразивного материала инструмента, так как в процессе дискретизации, кроме свободного абразива, используется вода под высоким давлением, что является эффективным охлаждающим средством зоны обработки. Этот факт позволяет сохранить исходную структуру абразивного материала, избежать появления в шлифовальном инструменте цветов побежалости и вырезать отверстия в направлении одной строки, что исключает многочисленные позиционирования гидроабразивной струи с одной строки отверстий на другую и уменьшает вспомогательное время на дискретизацию инструмента.

На установке гидроабразивной резки ALBA 4-1313 были вырезаны 245 радиальных отверстий диаметром 2,5 мм на режиме: давление воды в контуре высокого давления  $P = 240$  МПа; размер частиц абразива – 178 мкм; расход абразива – 150 г/мин; диаметр сопла  $d_c = 0,25$  мм; скорость перемещения режущей головки  $v_s = 1,0$  м/мин. Время на вырезание 245 отверстий на глубину 25 мм составило 115 мин, а при прожигании тех же отверстий лазерным лучом – 480 мин. Столь большая разница в производительности объясняется необходимостью многократного кратковременного позиционирования лазерного луча во избежание термического повреждения абразивного материала.

При выжигании отверстий малого диаметра (до 1 мм) позиционирования лазерного луча с одной строки на другую не требуется, поскольку удаляется малый объем абразива и отсутствует термическое повреждение инструмента. В этих условиях время на дискретизацию шлифовальных кругов лазерным лучом меньше на 7...9 % по сравнению с вырезанием отверстий гидроабразивной струей высокого давления.

Для выбора траектории движения струи высоко концентрированного потока энергии, обеспечивающей минимальные геометрические погрешности отверстий, исследованы пять альтернативных траекторий струи. При

этом траектория не должна выходить за пределы вырезаемого отверстия.

При первой траектории струя высоко концентрированного потока энергии (лазерного луча или гидроабразивной струи) начинает свое движение из центра формируемого радиального отверстия по спирали и выходит на максимальный радиус. Затем струя зигзагообразными движениями перемещается в диаметрально противоположную точку окружности и заканчивает обработку отверстия движением по окружности, окончательно формируя профиль отверстия. При второй траектории струя движется по концентрическим окружностям, обеспечивая получение требуемого размера отверстия. При третьей траектории струя перемещается по зигзагообразным отрезкам из периферийной точки будущего отверстия в диаметрально противоположную точку, а окончательно отверстие формируется движением струи по окружности.

При четвертой траектории струю выводят в точку 1 (рис. 2, а), (после чего перемещают в точку 2 по отрезкам параллельных прямых, например, *CB*, *AD* и др. Из конечной точки *B* предшествующего отрезка прямой линии (например, *CB*) струя перемещается в начальную точку *A* последующего отрезка *AD*. Из точки 2 высоко концентрированный поток энергии перемещается в точку 3, затем по окружности – на полный угол 360°, завершая формирование вырезаемого отверстия.

Отрезок *BA* наклонен к положительному направлению оси *X* под углом

$$\beta_i = 0,5\pi \pm \arctg\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y_i}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta X = \text{const}$  – шаг параллельных отрезков прямых линий (рабочих ходов струи), равный диаметру  $2r_n$  пятна контакта струи с абразивным материалом;  $\Delta Y_i = Y_{i+1} - Y_i$  – текущее приращение ординаты конечной точки отрезков параллельных прямых, приходящееся на шаг  $\Delta X$ ;  $Y_{i+1}$  – значение текущей ординаты конечной точки параллельного отрезка, соответствующее аргументу  $X_i = 2(i+1)r_n$ ;  $Y_i$  – текущее значение ординаты, которое определяется путем подстановки значения абсциссы  $X_i = 2i \cdot r_n$  в уравнение окружности

$$X_i^2 + Y_i^2 = (r_0 - r_n)^2 \quad (2)$$

и решения уравнения (2) относительно  $Y_i$ .

Выполнив указанную процедуру, получим текущее значение ординаты

$$Y_i = \pm \sqrt{r_0^2 - (r_0 - 2r_n)^2 + (1 - 4i^2)r_n^2}, \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус вырезаемого отверстия;  $r_n$  – радиус пятна контакта струи с шлифовальным кругом;  $i$  – текущий порядковый номер шага  $\Delta X$ .

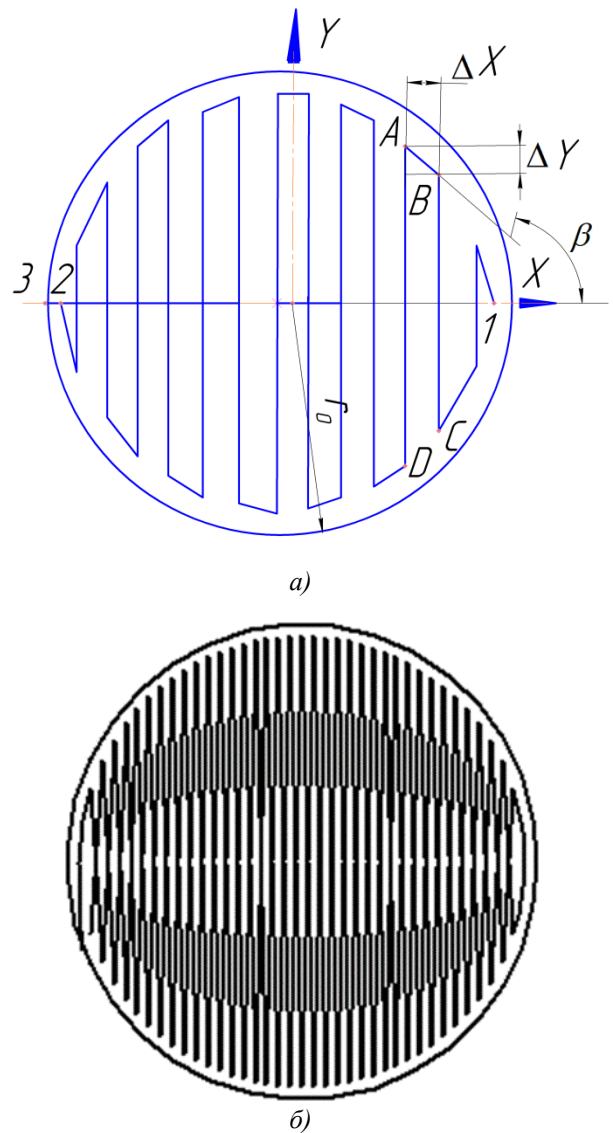


Рис. 2. Четвертая (а) и пятая (б) траектории движения струи высоко концентрированного потока энергии при вырезании отверстия

В интервале положительных значений абсциссы  $(r_0 - r_n) \geq x \geq 0$  длина рабочих ходов струи (параллельных отрезков) увеличивается, а в интервале отрицательных значений  $0 \geq x \geq -(r_0 - r_n)$  – уменьшается на величину

$$\Delta Y_i = 2 r_n / \text{tg}\beta_i, \quad (4)$$

где  $\beta_i$  – текущий угол наклона отрезка прямой линии, соединяющего конечную и начальную точки предыдущего и последующего параллельных рабочих ходов (параллельных отрезков) соответственно.



Ранее отмечалось, что шаг рабочих ходов струи назначают равным диаметру  $2 r_n$  пятна контакта с шлифовальным кругом, при этом длина участка оси абсцисс, на котором размещаются эти шаги, равна  $2(r_0 - r_n)$ . При шаге рабочих ходов струи, равном  $2 r_n$  общее число рабочих ходов, потребных для формирования радиального отверстия (в том числе и заключительного рабочего хода струи по окружности), определяется по формуле

$$n_x = \frac{2(r_0 - r_n)}{2r_n} + 1 = \frac{r_0}{r_n}. \quad (5)$$

Пятая траектория (рис. 2, б) содержит все движения струи четвертой траектории и отличается от последней тем, что после перемещения из точки 1 в точку 2 (рис. 2, а) струя движется по зеркально отраженной траектории параллельных отрезков прямых линий из точки 2 в точку 1.

Описанные траектории струи реализованы на лазерной и гидроабразивной установках. В процессе гидроабразивного вырезания отверстий температура в зоне резания повышалась на единицы градусов, в этой связи температуру контролировали лишь в процессе лазерного выжигания отверстий.

Для оценки каждой из траекторий выбраны критерии: термическое повреждение абразивного материала, точность отверстия и производительность процесса вырезания. Отверстия радиусом  $r = 0,90; 1,60$  и  $2,65$  мм выжигали лазером в стандартных шлифовальных кругах ПП 250×76×32 25AF46L26V2 ГОСТ P52381-2005, широко используемых при обработке металлов и сплавов. Первая и пятая траектории движения лазерного луча обеспечивают необходимую глубину отверстия и минимальные геометрические погрешности, однако в абразиве появлялись цвета побежалости и локальные вспучивания, что свидетельствовало об изменении исходной структуры под действием высокой температуры.

Выжигание отверстий по второй траектории при подаче лазерного луча  $v_s = 500$  и  $1000$  мм/мин также сопровождалось появлением пятен серовато-коричневатого цвета, которые отчетливо видны у отверстий, приближенных к торцам инструмента. При подаче  $1500$  и  $2000$  мм/мин цвета побежалости исчезают, однако выжженное отверстие плохо геометрически сформировано: удален не весь объем абразива, отверстие имеет коническую форму.

Третья траектория выжигания радиальных отверстий не вызывает термического повреж-

дения абразивного материала, но при этом в отверстиях остаётся не полностью выжженный абразивный материал, вследствие чего его удаляли дополнительными проходами, что приводило к снижению производительности процесса дискретизации круга. По четвертой траектории были изготовлены шлифовальные круги на режимах: подача лазерного луча  $v_s = 250$  мм/мин, мощность излучения  $N = 1$  кВт. При этом установлено, что на точность формы отверстий и температуру в окрестности выжигаемого отверстия влияет не только режим резания, диаметр отверстия, но и число выполненных рабочих ходов.

При выжигании отверстий радиусом  $r_0 = 0,9$  мм поочередно в 1-й, 2-й и 3-й строках и увеличении числа рабочих ходов усредненная температура в зоне обработки возрастает. Для отверстий радиусом  $r_0 = 0,9$  мм численные значения их окружного и осевого шагов на режущей поверхности круга составляют единицы миллиметров, поэтому к малой площади абразива подводится большая плотность мощности лазерного излучения, что приводит к нагреву абразивного материала до температуры  $500...600$  °С. Скорость нарастания температуры по мере увеличения числа рабочих ходов лазерного луча постепенно уменьшается, однако стабилизации температуры не происходит, а в кругу наблюдаются цвета побежалости.

Выжигание отверстий радиусом  $r_0 = 0,9$  мм парами смежных параллельных строк позволило сохранить исходную структуру абразива, однако потребовалось выполнять позиционирование лазерного луча между строками. При вырезании отверстий  $r_0 = 1,6$  мм парами строк наблюдалось незначительное повышение температуры по сравнению с  $r_0 = 0,9$  мм, что также позволило сохранить исходную структуру абразива.

Температура в зоне обработки при выжигании отверстий радиусом  $r_0 = 2,65$  мм парами строк выше по сравнению с двумя предшествующими случаями, что обусловлено большим объемом выжигаемого абразива. Однако температура в зоне обработки также не вызывала термического повреждения абразивного материала. На основании многочисленных опытов выжигания отверстий лазерным лучом, измерения температуры и точности отверстий установлено, что наиболее полно ранее выбранным критериям отвечает 4-я траектория движения высококонцентрированного потока энергии. Температура в окрестности отверстия, формируемого гидроабразивной

струей, составляла 24 °С при исходной температуре круга 22,5 °С. Этот факт позволил исключить критерий «Термическое повреждение» при использовании гидроабразивной струи и учитывать лишь точность отверстия и производительность процесса дискретизации.

Вырезание отверстий на гидроабразивной установке в соответствии с первой и второй траекториями приводит к значительным геометрическим погрешностям формы продольного сечения. При давлении 384...432 МПа, диаметре сопла 0,25 мм, подаче гидроабразивной струи 120 мм/мин, расходе абразива 150 г/мин возникает значительное отклонение профиля продольного сечения отверстий. Форма вырезанного отверстия получается параболической, при этом в центре отверстия образуется опережающее углубление.

Последующее выполнение рабочих ходов гидроабразивной струи не приводило к исправлению геометрических погрешностей, образованных на первых проходах. В этой связи от первой и второй траектории струи следует отказаться. Неудовлетворительные результаты по точности отверстия получены также при использовании третьей траектории: в отверстиях остается не удаленный абразив.

Хорошие результаты по точности отверстий обеспечивают четвертая и пятая траектории. После вырезания отверстие имеет отклонение от круглости 0,07 мм для четвертой траектории и 0,05 мм – для пятой, а отклонение профиля продольного сечения – 0,12 мм. Диаметральная точность отверстия, вырезанного по пятой траектории, измеряется сотыми долями миллиметра, но производительность процесса дискретизации существенно ниже, по сравнению с четвертой траекторией.

Количество рабочих ходов при 5-й траектории значительно больше, чем при 4-й, вследствие чего время выполнения процесса дискретизации с использованием 5-й траектории примерно в 2 раза больше, чем при 4-й. По геометрической точности вырезанного отверстия 4-я траектория уступает 5-й, однако различие в точности отверстий для обоих вариантов незначительное и составляет сотые доли миллиметра. Поэтому при использовании лазерного луча и гидроабразивной струи высокого давления более предпочтительной является 4-я траектория.

Дискретный шлифовальный круг с радиусом вырезанных отверстий  $r_0 = 0,90$  мм (рис. 3, а) изготовлен с использованием лазерного луча, а с радиусом  $r_0 = 1,60$  мм (рис. 3, б) – гидроабразивной струей. Изготовленные шлифо-

вальные круги не имеют термического повреждения, выдержали испытания на механическую прочность, характеризуются требуемой точностью вырезанных отверстий и могут использоваться для высоко производительного дискретного шлифования металлов и сплавов. Для отверстий диаметром более одного миллиметра рекомендуется использовать гидроабразивную струю высокого давления, а диаметром меньше 1 мм – лазерный луч.

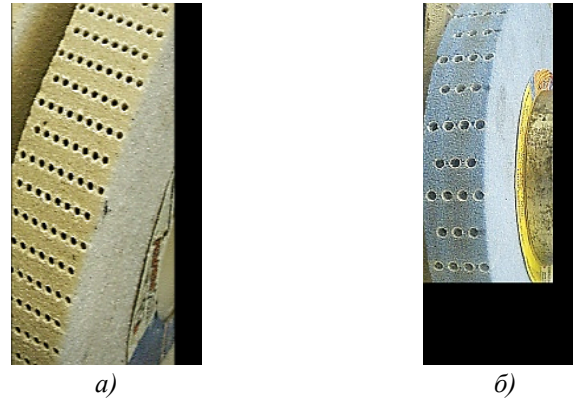


Рис. 3. Дискретная режущая поверхность шлифовального круга, выполненная лазерным лучом (а); гидроабразивной струей высокого давления (б)

Для сравнительной оценки степени снижения уровня вибрации в процессе шлифования заготовок (пластин из легированной стали) известными и разработанными высоко частотными дискретными кругами измеряли уровень вибрации передней опоры шпиндельного узла плоскошлифовального станка 3Г71 виброизмерительным прибором АГАТ. В процессе шлифования использовали дискретные круги ПП 250×76×32 25AF46L6V2A2 ГОСТ P52381-2005, ГОСТ P52587-2006, рабочая частота вращения кругов составляла  $n = 2880$  мин<sup>-1</sup>. Для круга с радиусом вырезанных отверстий  $r = 1,6$  мм, число строк отверстий  $n_{c1} = 62$ ; окружной шаг  $T_0 = 12,66$  мм; осевой шаг  $T_{oc} = 5,6$  мм; угловой шаг  $\varphi = 5^\circ 48'$ . Число режущих выступов цельного дискретного шлифовального круга равно  $n_{c2} = 8$ , окружной шаг  $T_0 = 98,1$  мм, отношение протяженности выступа и впадины 1:1.

В процессе шлифования разработанным дискретным инструментом частота внешнего динамического воздействия циклов «резание–отдых»  $f_{c1} = nn_{c1}/60 = 2880 \cdot 62/60 = 2976$  Гц, а частота воздействия режущих выступов цельного круга  $f_{c2} = nn_{c2}/60 = 384$  Гц. Время одного цикла «резание–отдых» для сравни-

ваемых процессов соответственно составляет:  $\tau_{п1} = 3,4 \cdot 10^{-4}$  с (в т.ч. время прерывания процесса резания  $\tau_{п1} = 8,6 \cdot 10^{-5}$  с);  $\tau_{п2} = 2,6 \cdot 10^{-3}$  с (время прерывания  $\tau_{п2} = 1,3 \cdot 10^{-3}$  с).

Доминирующую роль в снижении уровня вибрации технологической системы играет время прерывания процесса резания, которое в 15,1 раза меньше для разработанного высоко частотного дискретного шлифовального инструмента. За малое время прерывания процесса резания  $\tau_{п1} = 8,6 \cdot 10^{-5}$  с инерционная технологическая система не успевает упруго восстановиться, вследствие чего очередной цикл резания происходит при незначительных энергиях удара инструмента о заготовку, что приводит к снижению динамической активности шпиндельного узла с установленным высоко частотным дискретным шлифовальным кругом.

Результаты измерения уровня вибрации шпиндельного узла показали, что при шлифовании высоко частотным дискретным инструментом уровень вибрации по сравнению с цельным дискретным кругом с выступами и впадинами меньше в 1,3 – 1,7 раза в зависимости от режима резания. Чем выше режим резания (больше глубина резания, продольная и поперечная подача заготовки), тем больше степень снижения уровня вибрации шпиндельного узла с установленным высоко частотным дискретным инструментом.

Таким образом, экспериментальная обработка процессов высоко частотной дискретизации режущей поверхности шлифовальных кругов с использованием высоко концентрированных потоков энергии позволила изготовить инструменты и провести процессы шлифования, подтвердившие высокую эффективность разработанных способов [3, 4] и конструкций дискретных шлифовальных кругов [5, 6] в снижении уровня вибрации шпиндельного узла шлифовального оборудования при одновременном сохранении достоинств дискретного шлифования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, В.Г., Морозов, В. В. Технология плоского дискретного шлифования: учеб. пособие / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Гусева. – Владимир: изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 344 с. – ISBN 978-5-89368-825-2.

2. Гусев, В.Г., Морозов, А.В. Плоское периферийное шлифование дискретными кругами: монография [текст] / Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2012. – 222 с. – ISBN 978-5-905371-38-7.

3. Пат. № 2520169 РФ, В24D 18/00, В24C 1/00. Способ дискретизации абразивного инструмента // В.Г. Гусев, А.В. Морозов, О.Ю. Метелкин; заявл. 02.11.2012; опубл. 20.04.2014. Бюл. 2010. № 9.

4. Пат. №2589993 РФ, В24D 18/00, В24C 1/00. Способ дискретизации режущей поверхности шлифовального инструмента // А.В. Морозов, В.Г. Гусев; заявл. 05.12.2014; опубл. 14.06.2016 Бюл. № 19.

5. Пат. № 2385216 РФ, В24D, 7/00. Дискретный шлифовальный инструмент / Гусев В. Г., Морозов А. В., Швагирев П. С.; заявл. 27.02.08; опубл. 2010. Бюл. № 9.

6. Пат. №2582841 Российская Федерация, В24D 18/00, В24C 1/00. Шлифовальный инструмент с дискретной режущей поверхностью // А.В. Морозов, В.Г. Гусев, П.С. Швагирев; заявл. 05.12.2014 Опубл.27.04.2016. Бюл. №12.

7. Морозов, А.В. Технологическая характеристика дискретных шлифовальных кругов и области их применения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». – Курск: ЮЗГУ, 2016. – ЗАО «Университетская книга». – С. 62–64. – ISBN 978-5-9906195-4-8.

## REFERENCES

1. Gusev, V.G., Morozov, V.V. *Technology of Flat Discrete Grinding*: Textbook / under the editorship V.G. Gusev, D. Eng., Prof. – Vladimir: Publishing House of Vladimir State University, 2007. – pp. 344. – ISBN 978-5-89368-825-2.

2. Gusev, V.G., Morozov, A.V. *Flat Periphery Grinding with Discrete Discs*: Monograph [text] / Yoshkar-Ola: Colloquium, 2012. – pp. 222. – ISBN 978-5-905371-38-7.

3. Pat. № 2520169 the RF, B24D 18/00, B24C 1/00. *Method of Abrasive Discretization* // V.G. Gusev, A.V. Morozov, O.Yu. Metelkin; applied 02.11.2012; published. 20.04.2014. Bull. 2010. № 9.

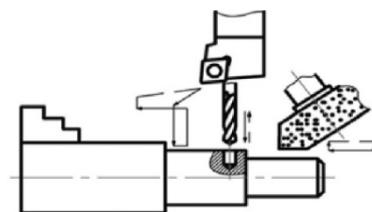
4. Pat. №2589993 the RF, B24D 18/00, B24C 1/00. *Discretization Method of Abrasive Cutting Surface* // A.V. Morozov, V.G. Gusev; applied 05.12.2014; published 14.06.2016 Bull. № 19.

5. Pat. № 2385216 the RF, B24D, 7/00. *Discrete Grinding Tool* / Gusev V.G., Morozov A. V., Shvagirev P.S.; applied 27.02.08; published 2010. Bull. № 9.

6. Pat. №2582841 the Russian Federation, B24D 18/00, B24C 1/00. *Grinding Tool with Discrete Cutting Surface* // A.V. Morozov, V.G. Gusev, P.S. Shvagirev; applied 05.12.2014 Published 27.04.2016. Bull. №12.

7. Morozov, A.V. Technological characteristic of discrete grinding discs and fields of their application: *Proceedings of the Inter. Scientif.-Pract. Conf. "Outlooks in Development of Machining Techniques and Equipment in Mechanical Engineering"*. – Kursk: SWSU, 2016. – CC "University Book". – pp. 62–64. – ISBN 978-5-9906195-4-8.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко



УДК 621.9.015

DOI: 10.12737/article\_59ae90c55d3e09.36459701

**А.С. Сергеев**, к.т.н.,  
**Ж.С. Тихонова**, аспирант,  
**Т.В. Уварова**, старший преподаватель  
(ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет,  
400005, Россия, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28)  
E-mail: sergeevapp@mail.ru

## **Повышение точности расчета составляющих силы резания при точении коррозионностойких сталей\***

*Приведены математические модели расчёта составляющих силы резания с введением в их структуру дополнительного информационного параметра – термоЭДС предварительного пробного рабочего хода, как характеристики теплофизических свойств контактной пары. Предложенные математические зависимости могут использоваться для построения алгоритмов автоматизированного расчёта.*

**Ключевые слова:** сила резания; скорость резания; теплопроводность; термоЭДС; коррозионностойкие стали.

**A.S. Sergeev**, Can. Eng.,  
**Zh.S. Tikhonova**, Post graduate student,  
**T.V. Uvarova**, Senior lecturer  
(FSBEI HE Volgograd State Technical University, 28, Lenin Avenue, Volgograd, Russia, 400005)

## **Accuracy increase in computation of cutting force components at corrosion-resistant steel parts turning**

*The simulators of the cutting force components computation with the introduction in them a structure of an additional information parameter – thermo-EMF (electromotive force) of the preliminary test working stroke as a characteristic of thermo-physical properties of a contacting pair are shown. Mathematical dependences offered may be used for the algorithm formation of computer-aided computations.*

**Keywords:** cutting force; cutting speed; thermal conduction; thermo-EMF; corrosion-resistant steels.

Коррозионностойкие стали относятся к классу труднообрабатываемых материалов. Обработка коррозионностойких сталей сопряжена с повышенным износом инструмента и, как следствие, низким его ресурсом, что побуждает к снижению режимов резания. Ввиду того, что теплопроводность коррозионностойких сталей с повышением температуры резания (скорости резания) не уменьшается, а

растет, данный класс сталей ограничен с точки зрения возможной интенсификации режимов резания. Прежде всего, это связано с возникновением тяжелых условий обработки, сопровождающихся значительным увеличением сил резания и как следствие нагрузки на составляющие всей станочной системы, а это является ключевым фактором на пути обеспечения качества обработки изделий.

Вместе с тем, доля использования коррозионностойких сталей в промышленности достаточно велика, поэтому исследования, по-

\* Работа выполняется в рамках гранта РФФИ, номер проекта 17-08-00018.

священные обеспечению точности выбора основных параметров их обработки, являются актуальными.

В настоящий момент в существующей справочно-нормативной и научной литературе информация о выборе режимов обработки коррозионностойких сталей встречается по большей части в виде рекомендательной формы [1], что не может служить фактором использования данного материала с точки зрения автоматизации процесса назначения режимов резания или в ограниченной форме.

Так, например, в справочнике [2], являющемся основным при расчете параметров процесса резания, отсутствует в полном объеме информация о составляющих силы резания: радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$ , значения которых используются при расчете точности обработки, зажимных усилий автоматизированных зажимных устройств (патронов) на стадии проектирования технологического процесса.

В приведенных математических зависимостях тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  не учитывается влияние теплофизических свойств режущего инструмента на ее

величину. Фактическая точность размеров и геометрической формы обработанных заготовок зависит от отжаты в упругой технологической системе, вызываемых колебаниями горизонтальной составляющей силы резания  $P_y$ , определяемой уровнем применяемых режимов резания [3].

В справочнике [4] и источнике [5] приведена формула расчета составляющей силы резания  $P_z$  для конструкционных сталей, жаропрочной стали 12X18H9T, чугуна и других сплавов. Примечательно, что для стали 12X18H9T показатель степени при скорости резания  $n$  равен нулю, а значит, по данным справочника скорость резания не оказывает влияние на величину составляющих силы резания и при определенных значениях глубины резания  $t$  и подачи  $S$  в скоростном диапазоне обработки (например, 10...100 м/мин) величина  $P_z$  сохраняется постоянной.

Для оценки сходимости расчетных значений составляющих сил резания  $P_z$  по источнику [6] с фактическими значениями были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены в табл. 1.

**1. Сравнение расчетных значений  $P_z$  по [59] с экспериментальными данными при точении сталей мартенситного и мартенситноферритного классов**

Скорость резания $V$ , м/мин	Подача $S$ , мм/об	Глубина резания $t$ , мм	Составляющая силы резания $P_z$ ,		Относительная ошибка, %
			расчетная [59]	измеренная	
Сталь: 14X17H2, инструмент BK8					
20	0,15	1	661	1000	34
40			596	970	39
60			561	925	39
80			537	900	40
Сталь: 40X13, инструмент T15K6					
20	0,15	1	577	1250	49
40			520	900	42
60			489	880	44
80			468	845	45

Измерение силы резания производилось тензометрическим токарным динамометром DKM 2010 (фирмы «TeLC» Германия), встроенным в резцедержатель в специальной оправке и интегрированным с персональным компьютером. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Средств автоматизации и роботизации» кафедры «Автоматизация производственных процессов». Обработка резанием проводилась без применения СОТС.

В табл. 1 приведено значение ошибки расчета по имеющейся математической зависимости для данных условий механической об-

работки. Ошибка расчета составляет 34...49 % (см. табл. 1), что недопустимо для обеспечения надёжности процесса резания и требует корректировки математической модели с целью снижения величины погрешности.

Для повышения точности расчета (снижение ошибки расчета в допустимых пределах, например 10...15 %) составляющих силы резания, помимо учета марки стали, геометрии режущего инструмента, глубины резания, скорости резания и подачи, необходимо учесть ряд дополнительных факторов, которые оказывают влияние на их расчётную величину.

Со стороны твёрдосплавного инструмента такими факторами являются изменение химического и фазового состава твердого сплава, как между марками, так и внутри его марочного состава. Различные марки твёрдого сплава обладают различной теплопроводностью. Внутри марочного состава теплопроводность, как и режущие свойства, изменяется за счёт различного содержания в кобальтовой связке растворённого вольфрама (2...20 %), что допускается техническими условиями на его изготовление.

Со стороны обрабатываемой стали химический, фазовый состав, структурное состояние стали определяют не только её прочностные характеристики, но и теплопроводность, которая через соотношение с теплопроводностью инструмента определяет уровень температуры в зоне резания и степень упрочнения стали в условиях высокоскоростного пластического деформирования.

Таким образом, технологические особенности металлургического производства предполагают наличие неизбежного разброса физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, что подтверждается наличием ГОСТ на показатели механических свойств и процентное содержание химических элементов готовой продукции инструментальных заводов и металлургических комбинатов. В этой связи использование средних поправочных коэффициентов на физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов в математических зависимостях справочно-нормативной литературы приводит к появлению погрешностей расчета.

Как показывает практика разброс режущих свойств, твёрдосплавных пластин и обрабатываемости сталей, может носить случайный характер и подчиняться различным законам распределения (например, рис. 1). При этом возникают ситуации, при которых заготовка из партии поставки, обладающая худшей обрабатываемостью ( $\sigma_{Bmax}$ ), сочетается с твёрдым сплавом, имеющим низкие режущие свойства (минимальный коэффициент износа инструмента  $K_{Иmin}$ ), на рис. 1, это сочетание зон (4 – 5) и наоборот – сочетание зон (1 – 8).

Но если во втором случае (сочетание зон (1 – 8)) речь идет о недоиспользовании ресурса инструментального материала, то первая ситуация (сочетание зон (4 – 5)) грозит простоем оборудования по причине преждевременного выхода из строя инструмента. В.К. Старков, в своих исследованиях [7], отмечает, что коле-

бания физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов может приводить к разбросу стойкости инструмента в 4 и более раз при обработке на постоянных режимах резания.

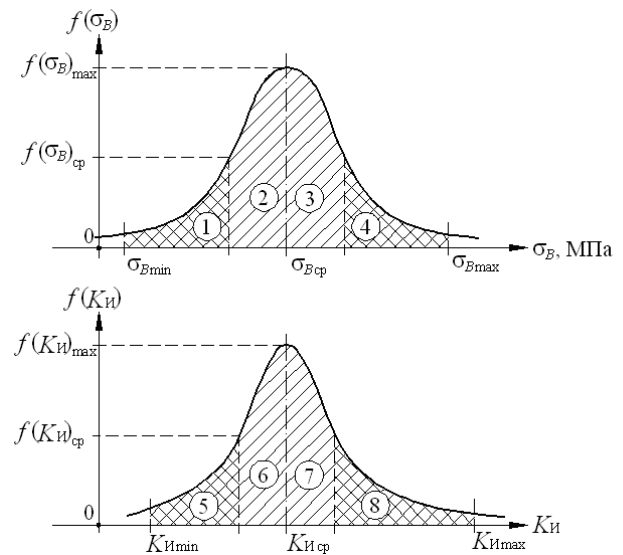


Рис. 1. Плотности распределения механических свойств обрабатываемых сталей  $f(\sigma_B)$  и режущих свойств инструмента  $f(K_{И})$

безусловно, плотность распределения в партии заготовок  $f(\sigma_B)$  и твердого сплава  $f(K_{И})$  с режущими свойствами, приближенными к границам установленных допусков (зоны 1, 4 и 5, 8), по мере приближения к последним – снижается, но все же она существует. Значительно выше она в околোগраничном интервале между границей диапазона допуска на механические свойства и его средним значением (зоны 2, 3 и 6, 7).

Неприятность заключается в том, что, например, в случае нормального распределения свойств обрабатываемого и инструментального материалов (см. рис. 1), плотность распределения заготовок  $f(\sigma_B)$  и твердого сплава  $f(K_{И})$  может оказаться одинаковой (или почти одинаковой) в левом и правом околোগраничном и граничном интервалах. Это означает, что количество таких сочетаний контактных пар увеличивается как минимум вдвое по сравнению, например, с экспоненциальным законом распределения механических свойств.

Такая неоднородность свойств контактной пары в условиях автоматизированного производства приводит к снижению стабильности и качества механической обработки в целом.

При анализе существующих методов предварительной оценки свойств стальных заготовок и твёрдосплавного инструмента отмечено,

что одним из путей решения этой задачи может быть тестовый метод предварительного пробного рабочего хода на строго фиксированных режимах резания для каждой пары инструмент–заготовка с измерением возникающей при этом термоэлектродвижущей силы и использованием величины термоЭДС пробного рабочего хода для оценки свойств контактируемых пар и условий резания.

В предлагаемом методе предварительного пробного рабочего хода величина термоЭДС используется не как традиционная характеристика уровня температур в зоне резания, а как интегральная оценка теплофизических свойств контактной пары. Физической основой использования термоЭДС пробного рабочего хода в этом качестве является использование контактной составляющей термоЭДС естественной термопары, которая несёт информацию о разности работ выхода электронов из твёрдого сплава и стали. Работа выхода, в свою очередь, имеет тесную корреляционную связь с прочностью, электропроводностью и теплопроводностью контактируемых пар [8].

Информативная способность естественной термопары проявляется в том, что величина этого сигнала имеет устойчивую корреляцию с теплопроводностью случайно собранных в процессе обработки металла контактных пар. Была поставлена задача разработки математических моделей с учетом специфики теплофизических свойств группы коррозионностойких сталей: сталь 20X13, 40X13, 13X11H2B2MФ (мартенситный класс), 12X18H10T (аустенитный класс), 14X17H2, (мартенситно-ферритный класс), как наиболее востребованных на производстве, с введением в формулы дополнительного параметра, характеризующего теплофизические свойства каждой новой контактной пары – термоЭДС предварительного пробного рабочего хода, измеренную на строго постоянных, одинаковых для всех сменных контактных пар режимах резания ( $V = 100$  м/мин;  $S = 0,1$  мм/об;  $t = 1$  мм).

В результате экспериментального исследования, опытным путем авторами были получены математические модели по расчету составляющих силы резания при точении коррозионностойких сталей. Составляющие силы резания предлагается определять по следующим зависимостям:

$$P_x = 118,3 \cdot E^{0,664} \cdot t^{0,712} \cdot S^{0,516} \cdot V^{0,165},$$

$$P_y = 700,3 \cdot E^{0,408} \cdot t^{0,551} \cdot S^{0,866} \cdot V^{0,097},$$

$$P_z = 4681,5 \cdot E^{-0,102} \cdot t^{0,609} \cdot S^{0,649} \cdot V^{-0,035},$$

где  $E$  – термоЭДС пробного прохода естественной термопары «обрабатываемая заготовка – твердый сплав»;  $t$  – глубина резания;  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, м/мин.

Рекомендуемые режимы и условия обработки, в диапазоне которых справедливы математические зависимости, а также программа для расчета составляющих силы резания приводятся в работе [9]. При этом средняя относительная погрешность определения составляющей  $P_x$  составляет 12%;  $P_y$  – 14%;  $P_z$  – 3% соответственно. Формула справедлива для расчета составляющих силы резания при обработке сталей: 20X13, 40X13, 13X11H2B2MФ (мартенситный класс), 12X18H10T (аустенитный класс), 14X17H2, (мартенситно-ферритный класс).

Предложенные математические модели могут быть использованы как основа для построения блок-схемы алгоритмов автоматизированного расчёта составляющих силы резания при токарной обработке коррозионно-стойких сталей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Pramet.** Точение: Каталог / Pramet tools, s.r.o. – Чехия: Pramet, 2016. – 264 с.
2. **Прогрессивные** режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / ред. В. И. Баранчиков. – М.: Машиностроение, 1990. – 399 с.
3. **Маталин, А.А.** Технология механической обработки: учебник / А.А. Маталин – Л.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
4. **Справочник** технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова, – 5 изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003, – 912 с.
5. **Безъязычный, В.Ф.** Расчет режимов резания: учеб. пособие / В.Ф. Безъязычный, И. Н. Аверьянов, А.В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.
6. **Режимы** резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др.; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
7. **Старков, В.К.** Физика и оптимизация резания материалов: учебник. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
8. **Епифанов, Г.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие / Г. И. Епифанов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1977. – 288 с.
9. **Свид. о гос. регистрации** программы для ЭВМ № 2015614913 от 29 апр. 2015 г. РФ, МПК (нет). Расчёт составляющих сил резания при точении коррозионно-стойких сталей / Зайцева Н.Г., Сергеев А.С., Плотноков А.Л., Жданов А.А.; ВолГТУ. – 2015.

## REFERENCES

1. Pramet. *Turning: Catalogue* / Pramet tools, s.r.o. – Czech Republic: Pramet, 2016. – pp. 264.
2. *Efficient Cutters and Metal Cutting Modes: Reference Book* / under the editorship of V.I. Baranchikov. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – pp. 399.
3. Matalin, A.A. *Machining Technology: Textbook* / A.A. Matalin – L.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 464.
4. *Technologist-Mechanician's Reference Book*. In 2 Vol. Vol.2 / under the editorship A.M. Dalsky, A.G. Kosilova, R.K. Mecheryakov, A.G. Suslov, – 5-th ed., revised – M.: Mechanical Engineering-1, 2003, – pp. 912.
5. Bezyazychny, V.F. *Cutting Mode Computation: Textbook* / V.F. Bezyazychny, I.N. Averiyarov, A.V. Kordyukov. – Rybinsk: RSATA, 2009. – pp. 185.
6. *Cutting Modes for Hard-to-Machine Material Machining: Reference Book* / Ya.L. Gurevich, M.V. Gorokhov, V.N. Zakharov et al.; 2-d ed. revised and supplemented. – M.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 240.
7. Starkov, V.K. *Physics and Optimization of Material Cutting: Textbook*. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 640.
8. Yepifanov, G.I. *Solid-State Physics: Textbook* / G. I. Yepifanov. – 2-d ed. revised and supplemented – M.: Higher School, 1977. – pp. 288.
9. State registration certificate for computer software № 2015614913 of April 29, 2015 the RF, IPC (no). *Computation of Cutting Force Components at Corrosion-resistant Steel Turning* / Zaitseva N.G., Sergeev A.S., Plotnikov A.L., Zhdanov A.A.; VolgaSTU. – 2015.

Рецензент д.т.н. А.М. Козлов

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

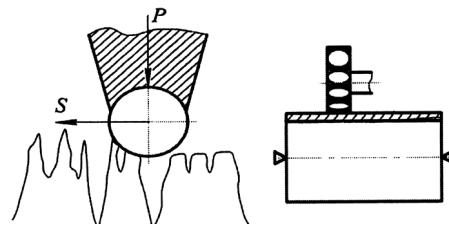
Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

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 621.91.048.6

DOI: 10.12737/article\_59ae90c6700ce5.15497553

**А.П. Бабичев**, д.т.н.,  
**А. М. Вобу**, аспирант,  
**Ф.А. Пастухов**, ведущий инженер,  
**Г.К. Вейсса**, аспирант

(Донской государственной технической университет  
344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),  
E-mail: vibrotech@mail.ru

## **Повышение интенсивности съема металла при вибрационной обработке на основе использования «щелевого» эффекта в рабочей камере**

*Представлены результаты исследований о повышении интенсивности съема металла при вибрационной обработке на основе использования «щелевого» эффекта в рабочей камере. Представленные результаты исследований показывают, что с уменьшением размера отсека в рабочей камере съем металла увеличивается и шероховатость поверхности улучшается.*

**Ключевые слова:** рабочая камера; вибрационная обработка; интенсивность вибрационной обработки; съем металла; шероховатость поверхности.

**A.P. Babichev**, D. Eng.,  
**A.M. Vobu**, Post graduate student,  
**F.A. Pastukhov**, Principal engineer,  
**G.K. Veissa**, Post graduate student

(Don State Technical University 1, Gagarin Sq., Rostov-upon-Don, 344010)

## **Intensity increase in metal removal at vibration treatment based on use of “slot” effect in working chamber**

*The results of the investigations on metal removal intensity increase during the vibration treatment on the basis of the “slot” effect use in a working chamber are presented. The investigation results presented show that with the decrease of a section dimension in the working chamber metal removal increases and surface roughness is getting better.*

**Keywords:** working chamber; vibration treatment; vibration treatment intensity; metal removal; surface roughness.

Одной из важных задач современного машиностроения является улучшение качества выпускаемых изделий, с повышением производительности труда, а также их конкурентоспособность на мировом рынке. Для решения

этой задачи разрабатываются и внедряются новые схемы обработки и конструктивные формы рабочей камеры.

Интенсивность вибрационной обработки зависит от режима и продолжительности об-

работки, характеристики и размеров частиц рабочей среды, объема рабочей камеры и степени её заполнения, механических свойств материала обрабатываемых заготовок и др. Наиболее общими параметрами процесса являются сила ударов (микроударов) и характеристика обрабатывающей среды (ОС). Скорость соударения частиц среды и обрабатываемых деталей определяется по известной эмпирической формуле [1, 2, 3]:

$$V_{ч.р.с.} = V_{р.к.} \cdot K_v,$$

где  $V_{р.к.}$  – скорость перемещения точки рабочей камеры;  $K_v$  – коэффициент потери скорости,  $K_v = 0,877^{l_1}$ ;  $l_1$  – расстояние от стенки рабочей камеры до рассматриваемой точки (частицы среды).

Интенсификация и повышение производительности рабочей камеры (щелевого эффекта) на съём металла и шероховатость поверхности при вибрационной обработке является одной из основных задач вибрационной и виброволновой обработки (ВиО и ВиВЛО) [1]. Рабочая камера, являясь основным элементом станка, определяет особенности процесса [4, 5]. При вводе дополнительных элементов (например, интенсификаторы воздействия), изменяя её ориентацию относительно вибровозбудителя (привода), представляется возможным влиять на интенсивность процесса и его результаты. В этой связи дальнейшие исследования в области совершенствования конструкции рабочих камер являются весьма актуальными, в том числе с учётом большого многообразия технологических задач, решаемых с применением вибрационных технологий.

В предлагаемой статье представлены варианты конструкции рабочих камер для интенсификации вибрационной и виброволновой обработки (ВиО) в технологии машиностроение. На рис.1 показано положение перегородок (сегментов) в рабочей камере, создающих щелевой эффект.

**Материалы и методы исследования.** Предварительная экспериментальная оценка влияния «щелевого» эффекта на интенсивность обработки произведена на примере универсальной рабочей камеры прямоугольной формы путём установления сменных перегородок, ограничивающих её ширину.

Общий объём камеры  $V_{р.к.} = 40 \text{ дм}^3$ . Ограничивающие перегородки устанавливались на расстоянии от торцевой стенки рабочей камеры на 75, 150 и 240 мм, определяя таким образом ширину «щели». Режим колебаний:  $A = 3,0 \text{ мм}$ ;  $f = 30 \text{ Гц}$ ; продолжительность обработки  $t_{об} = 30, 60, 90 \text{ мин}$ ; в качестве рабочей среды применяется гранулированный абразив (призмы) ПТ15х15; в качестве технологической жидкости (ТЖ) – 1,5 %-ный раствор кальцинированной соды; материал образцов – сталь 3, сталь 45, алюминиевый сплав Д16Т и алюминиевый сплав АВТ-1.

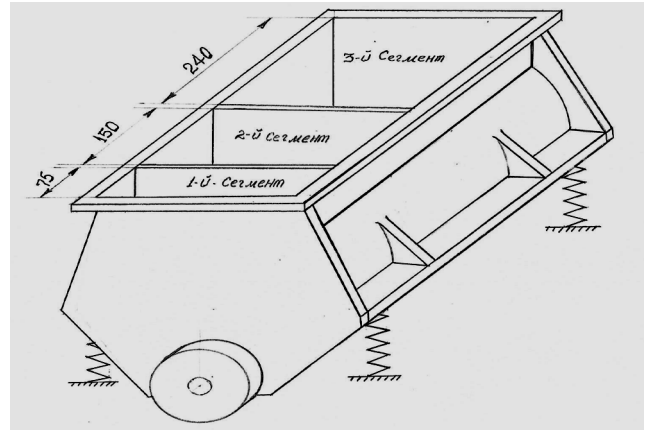


Рис. 1. Рабочая камера с размещением перегородок

**Результаты исследования и их обсуждение.** Контролируемые параметры: величина съёма металла  $Q$ , г, и шероховатость поверхности, мкм. Результаты экспериментальных исследований съёма металла  $Q$ , г, представлены в табл. 1, 2, 3, 4. Результаты среднего съёма металла представлены в табл. 5.

**1. Результаты экспериментальных исследований съёма металла**

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходный вес $Q$ , г	Вес после обработки $Q$ , г		
				30 мин	60 мин	90 мин
Сталь 3	Отсек 1	1	22,7860	22,7760	22,7600	22,7420
		2	23,2000	23,1870	23,1690	23,1474
	Отсек 2	3	23,0000	22,9920	22,9800	22,9620
		4	23,6620	23,3572	23,3430	23,3250
	Отсек 3	5	23,7010	23,6960	23,6800	23,6684
		6	23,6838	23,6790	23,6670	23,6560

2. Результаты экспериментальных исследований съема металла

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходный вес $Q$ , г	Вес после обработки $Q$ , г		
				30 мин	60 мин	90 мин
Алюминиевый сплав Д16Т	Отсек 1	1	9,7040	9,6920	9,6800	9,6620
		2	8,9546	8,9412	8,9342	8,9142
	Отсек 2	3	7,3258	7,3190	7,3100	7,2970
		4	7,4908	7,4852	7,4780	7,4680
	Отсек 3	5	7,8670	7,8614	7,8540	7,8440
		6	7,1236	7,1182	7,1120	7,1040

3. Результаты экспериментальных исследований съема металла

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходный вес $Q$ , г	Вес после обработки $Q$ , г		
				30 мин	60 мин	90 мин
Сталь 45	Отсек 1	1	31,3930	31,3670	31,3230	31,2800
		2	32,3880	32,3340	32,2860	32,2420
		3	29,8850	29,8240	29,7800	29,7336
	Отсек 2	4	30,4362	30,4100	30,37400	30,3316
		5	29,9900	29,9550	29,9150	29,8748
		6	33,8150	33,7900	33,7400	33,7000
	Отсек 3	7	31,5276	31,5034	31,4730	31,4400
		8	30,8900	30,8674	30,8400	30,8000
		9	29,0700	29,0486	29,0170	28,9860

4. Результаты экспериментальных исследований съема металла

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходный вес $Q$ , г	Вес после обработки $Q$ , г		
				30 мин	60 мин	90 мин
Алюминиевый сплав АВТ-1	Отсек 1	1	10,0000	9,9872	9,9600	9,9290
		2	10,4736	10,4630	10,4358	10,3860
		3	10,3520	10,3372	10,3150	10,2674
	Отсек 2	4	10,1180	10,1068	10,0820	10,0552
		5	10,2446	10,2360	10,2200	10,1860
		6	10,5236	10,5106	10,4900	10,4608
	Отсек 3	7	9,9950	9,9904	9,9776	9,9532
		8	9,9988	9,9930	9,9786	9,9550
		9	10,5746	10,5660	10,5500	10,5210

5. Результаты экспериментальных исследований съема металла

Материал и положение деталей в рабочей камере		Ср. сема металла после обработки 30 мин	Ср. сема металла после обработки 90 мин	Ср. сема металла после обработки 180 мин
		Сталь 3	Отсек 1	0,047
	Отсек 2	0,0287	0,0707	0,1116
	Отсек 3	0,0227	0,0525	0,0872
Алюминиевый сплав Д16Т	Отсек 1	0,0127	0,0382	0,0811
	Отсек 2	0,0109	0,0314	0,0614
	Отсек 3	0,0063	0,0207	0,0464
Сталь 45	Отсек 1	0,0115	0,0285	0,0483
	Отсек 2	0,0064	0,0195	0,0351
	Отсек 3	0,0049	0,0189	0,0302
Алюминиевый сплав АВТ-1	Отсек 1	0,0127	0,0222	0,0412
	Отсек 2	0,0062	0,0143	0,0258
	Отсек 3	0,0055	0,0123	0,0213

На рис. 2 представлен график, который показывает влияние времени обработки на изменение съема металла в различных сегментах (отсеках) размерного фактора рабочей камеры (шеллевого типа).

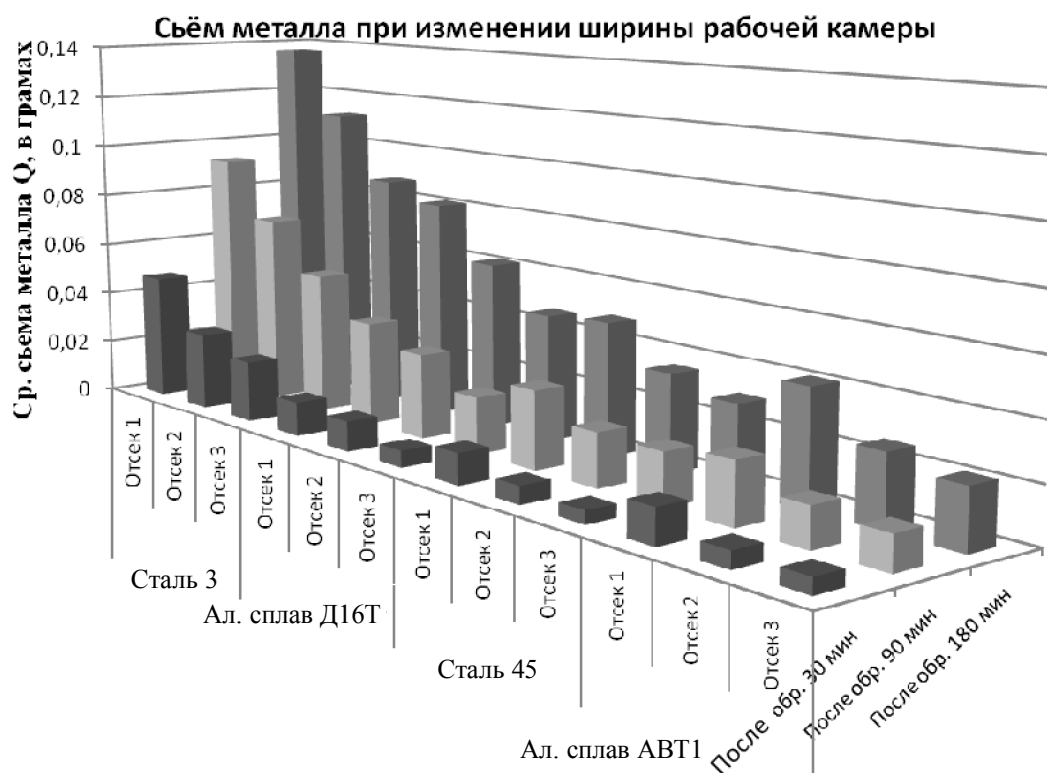


Рис. 2. Величина съема металла при изменении ширины рабочей камеры

Результаты экспериментальных исследований шероховатости поверхности представлены в табл. 6, 7, 8, 9. Итоговая шероховатость поверхности представлена в табл. 10.

#### 6. Результаты экспериментальных исследований шероховатости поверхности

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходная шероховатость, Ra ср., мкм	После 30 м обработки шероховатость, Ra ср., мкм	После 60 м обработки шероховатость, Ra ср., мкм	После 90 м обработки шероховатость, Ra ср., мкм
Сталь 3	Отсек 1	1	2,191	1,4004	1,379	1,048
		2	1,667	1,183	1,1544	0,8142
	Отсек 2	3	2,181	1,362	1,4826	1,0994
		4	1,767	1,364	1,0284	0,8034
	Отсек 3	5	1,795	1,3396	1,3646	1,0738
		6	1,722	1,2668	1,1054	1,0388

#### 7. Результаты экспериментальных исследований шероховатости поверхности

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходная шероховатость, Ra ср., мкм	После 30 мин обработки шероховатость, Ra ср., мкм	После 60 мин обработки шероховатость, Ra ср., мкм	После 90 мин обработки шероховатость, Ra ср., мкм
Алюминиевый сплав Д16Т	Отсек 1	1	1,821	2,2302	1,8778	1,315
		2	3,254	1,9138	1,7652	1,5458
	Отсек 2	3	2,465	1,4408	1,2832	0,8022
		4	1,957	1,2162	1,0978	0,7446
	Отсек 3	5	1,838	1,7132	1,6554	1,0062
		6	3,431	1,1648	1,3864	0,7722

8. Результаты экспериментальных исследований шероховатости поверхности

Материал и положение деталей в рабочей камере			Исходная шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 30 мин обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 60 мин обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 90 мин обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм
Сталь 45	Отсек 1	1	2,055	1,406	1,3744	1,3014
		2	2,173	1,368	1,3774	1,2306
		3	1,52	1,2526	1,2034	1,2674
	Отсек 2	4	2,216	1,7724	1,4294	1,264
		5	1,826	1,4456	1,259	1,0444
		6	1,653	1,2066	1,2822	0,9784
	Отсек 3	7	1,854	1,155	1,332	1,5198
		8	1,872	1,5792	1,445	1,4776
		9	1,437	1,1748	1,337	1,1456

9. Результаты экспериментальных исследований шероховатости поверхности

Материал и положение деталей в рабочей камере			После 30 м обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 60 м обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 90 м обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм
Алюминиевый сплав АВТ-1	Отсек 1	1	1,4068	1,2246	1,028
		2	1,3848	0,9078	0,8856
		3	2,176	1,8976	1,5474
	Отсек 2	4	1,1084	0,8932	0,7574
		5	1,8934	1,5976	1,245
		6	1,5292	0,9908	0,8942
	Отсек 3	7	1,007	0,8426	0,8988
		8	1,2548	0,9236	0,8544
		9	2,479	2,1678	1,9366

10. Итоговая шероховатость поверхности

Положения деталей в рабочей камере	Исходная шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 30 мин обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 60 мин обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм	После 90 мин обработки шероховатость, $Ra$ ср., мкм
Отсек 1	2,0973	1,5722	1,4162	1,1983
Отсек 2	2,0093	1,4339	1,2344	0,9633
Отсек 3	1,9927	1,4134	1,3560	1,1724

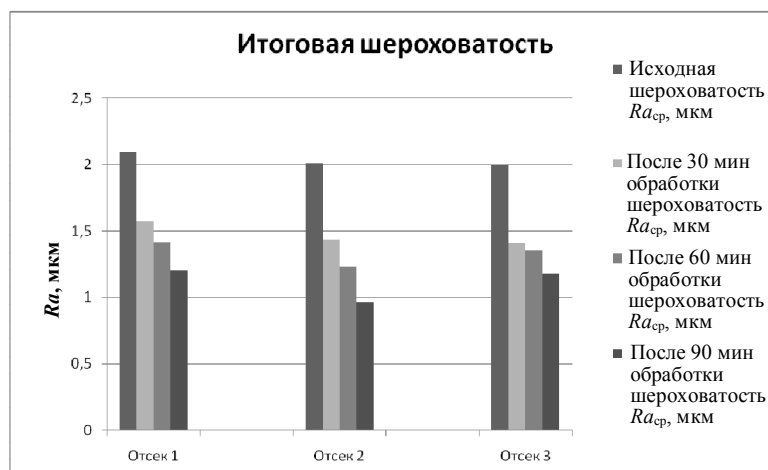


Рис. 3. Влияние продолжительности обработки  $t$ , мин, на шероховатость поверхности в различных отсеках (сегментах) рабочей камеры

Анализ результатов исследований подтверждает возможность повышения интенсивности процесса вибрационной обработки при использовании щелевого эффекта в конструкции рабочей камеры больше на 23 %, сравнивая первый сегмент со вторым; на 36 %, сравнивая первый сегмент с третьим и на 14 %, сравнивая второй сегмент с третьим. В общем заметно существенное влияние размерного фактора рабочей камеры на интенсивность процесса обработки. Отмечено, что с увеличением размера щели рабочей камеры, интенсивность съема материала снижается.

Изменение интенсивности съема материала сопровождается изменением шероховатости поверхности. Однако на шероховатость поверхности, как известно, влияет ряд факторов зернистость абразива, исходная шероховатость, состав ТЖ и др. [1, 2].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев, А.П., Бабичев, И.А.** Основы вибрационной технологии; изд.2-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – С. 157–166.
2. **Бабичев, А.П., Мотренко, П.Д., Гиллеспи, Л.К. и др.** Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок); под ред. д-ра техн. наук, проф. А.П. Бабичева. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010, - с.33.
3. **Бабичев, А.П.** Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей // Бабичев А.П., Мотренко П.Д. и др. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 215 с.

4. **Бабичев, А.П.** Инструментальное обеспечение процессов обработки деталей в гранулированных средах: монография / Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Костенков С.А., Рожненко О.А. – Ростов н/Д: Издательство ДГТУ, 2011. – 267 с.

5. **Тамаркин, М.А.** Оптимизация технологических параметров процесса вибрационной обработки // Совершенствование процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей: межвуз. сб. / РИСХМ. – Ростов н/Д, 1986. – С. 24 – 28.

### REFERENCES

1. Babichev, A.P., Babichev, I.A. *Fundamentals of Vibration Techniques*; 2-d ed.revised and supplemented – Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU, 2008. – pp. 157–166.
2. Babichev, A.P., Motrenko, P.D., Gillespy, L.K. et al. *Vibration Techniques Use in Parts Refinement and Finishing* (refinement, washing, removal of burr and barbs, edges treatment); under the editorship of A.P. Babichev, D. Eng., Prof. Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU, 2010, - pp.33.
3. Babichev, A.P. *Vibration Techniques Use for Quality Increase of Surface and Parts Operating Properties* // Babichev A.P., Motrenko P.D. et al. – Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU, 2006. – pp. 215.
4. Babichev, A.P. *Instrumental Support of Parts Machining in Granulated Media*: monograph / Babichev A.P., Motrenko P.D., Kostenkov S.A., Rozhnenko O.A. – Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU, 2011. – pp. 267.
5. Tamarkin, M.A. Technological parameters optimization of vibration treatment process // Parts Finishing-Strengthening Improvement: Inter-college Proceedings / RIAM. – Rostov-upon-Don, 1986. – pp. 24 – 28.

Рецензент д.т.н. С.А. Зайдец

УДК 67.05

DOI: 10.12737/article\_59ae90c5c1ad81.23976520

**С.А. Берберов**, к.т.н.,

**В.А. Лебедев**, к.т.н.

(Донской государственный технический университет  
344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: va.lebidev@yandex.ru

## Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях

Представлена конструкция твердосплавного сборного инструмента, обеспечивающая калибрование шлицевых отверстий в термообработанных деталях с высокой точностью, малой шероховатостью поверхности и упрочненным поверхностным слоем.

**Ключевые слова:** дорнование; калибрование; шлицевое отверстие; дорн; точность.

## Forming mandrel use for slot hole calibration in heat-treated parts

*A design of the hard-alloy complex tool ensuring calibration of slot holes in heat-treated parts with high accuracy, minor roughness of the surface and a strengthened surface layer is presented.*

**Keywords:** mandrelling; calibration; slot hole; mandrel; accuracy.

Дорнование шлицевых отверстий является одним из методов отделочной обработки поверхностей деталей машин пластическим деформированием, обеспечивающим увеличение производительности обработки, повышение точности отверстий, высвобождение дорогостоящего режущего инструмента, исключение брака и повышение эксплуатационных свойств детали.

Шлицевые соединения получили широкое распространение в современных машинах: коробках передач и скоростей тракторов, комбайнов, автомобилей, станков и др. Это объясняется тем, что шлицевые соединения позволяют передавать большие крутящие моменты и центрировать с высокой степенью точности втулки, зубчатые колеса, шестерни относительно шлицевого вала.

В машинах применяют шлицевые соединения прямобочные, эвольвентные и треугольные. Вне зависимости от профиля шлицевых отверстий технология их изготовления вызывает большие затруднения, особенно при центрировании прямобочных шлицевых отверстий по наружному диаметру.

Получение шлицевых отверстий в «сыром» материале не представляет затруднений, так как их легко можно обеспечить протягиванием соответствующими шлицевыми протяжками. Однако в связи с тем, что детали со шлицевыми отверстиями несут большие нагрузки, их изготавливают из высоколегированных сталей, которые подвергаются термообработке или объемной закалке, или предварительному цементированию с последующей закалкой. Часто поверхностная твердость этих деталей достигает 50...55 HRC.

В процессе термической обработки материал детали объемно деформируется и обеспеченная протягиванием точность отверстий нарушается, причем, в основном, происходит усадка отверстий по внутреннему диаметру и ширине шлицев. Восстановление точности шлицевых от-

верстий после термической обработки затруднительно, из-за малого пространства для размещения шлифовального круга, особенно при восстановлении точности по наружному диаметру и боковым поверхностям шлицевого отверстия.

В настоящее время существует ряд методов калибровки шлицевых отверстий после термообработки, такие как режущими протяжками, электрохимическое стравливание слоя материала, хонингование, но они либо малоэффективны, либо имеют малую производительность и, как следствие, большую себестоимость. Так, например, калибровка шлицевых отверстий режущими прошивками, изготовленными из быстрорежущей стали, часто применяемое на производстве, неэффективно из-за невысокой стойкости инструмента (они снимают окалину).

Электрохимическое стравливание материала с поверхности шлицевого отверстия также неэффективно, так как оно не обеспечивает не только точность отверстия но и необходимое качество поверхностного слоя материала, имеет невысокую производительность, требует дополнительные затраты на оборудование для электрохимического стравливания. Хонингование шлицевых отверстий по наружному диаметру и ширине шлица обеспечивает высокую точность и качество поверхностного слоя отверстий, но неэффективно вследствие малой производительности, высокой стоимости обработки больших расходов на хоны, которые быстро выходят из строя из-за наличия заусенцев в отверстии.

Исследования, проведенные в ДГТУ, показали, что наиболее эффективным методом калибровки шлицевых отверстий является дорнование их шлицевыми дорнами, которое осуществляется проталкиванием или протягиванием дорна сквозь шлицевое отверстие или на прессе, или на протяжном станке [1].

**Конструктивные особенности шлицевого дорна.** Дорн имеет определенную геометрию,

как по наружному диаметру, так и по боковым поверхностям. Это заборные и обратные конуса для плавного входа в шлицевые отверстия и выхода из него, калибрующая ленточка по боковым поверхностям и наружному диаметру.

Для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях наиболее эффективны конструкции фасонных сборных твердосплавных дорнов, которые обеспечивают не только высокую точность обработанного отверстия и качество поверхностного слоя, но и технологичны при их изготовлении.

Достоинство таких дорнов заключается в том, что рабочими органами дорнов являются

твердосплавные стандартные пластины группы ВК. Твердосплавная пластина позволяет формировать геометрию боковых поверхностей рабочих частей дорнов (заборные, обратные конуса и ленточку) вне корпуса на заточном или шлифовальном станках.

После обработки пластины собираются на корпусе дорна и закрепляются. Формирование геометрии дорна по наружному диаметру (заборные и обратные конуса и калибрующая ленточка) производится на собранном дорне на круглошлифовальном или заточном станках. Одна из таких конструкций дорна приведена на рис. 1.

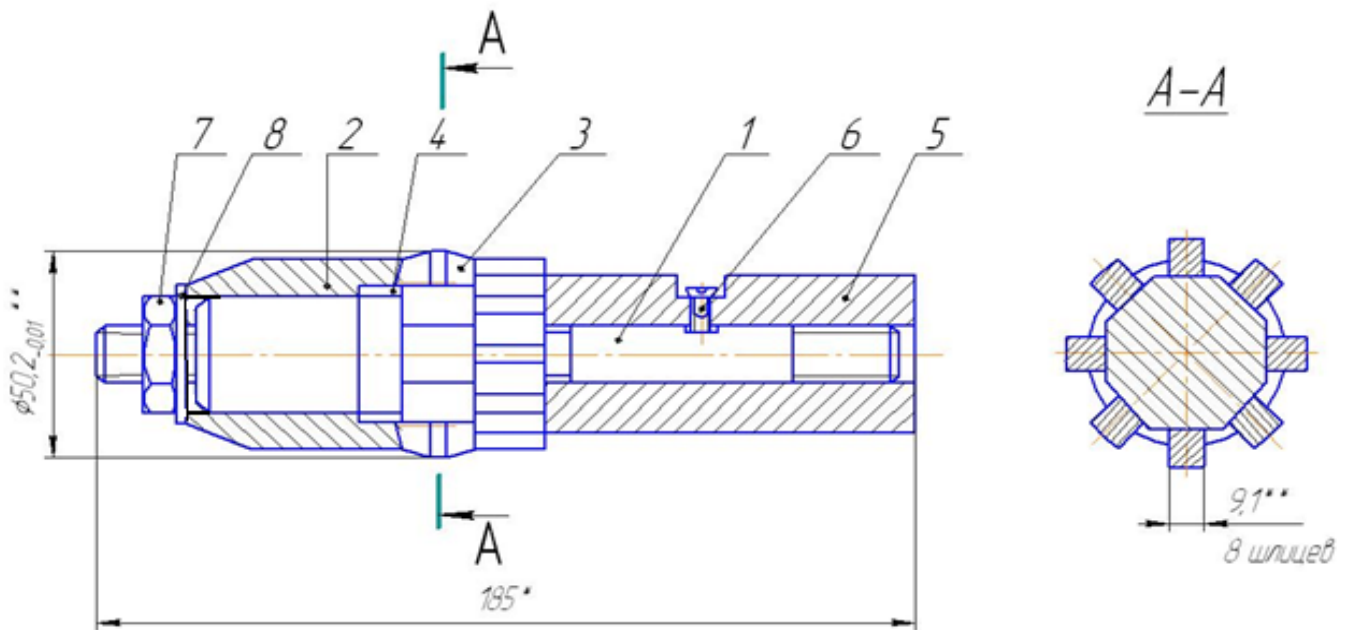


Рис. 1. Дорн для калибрования шлицевых отверстий:

1 – оправка; 2 – сепаратор; 3 – корпус; 4 – пластины; 5 – хвостовик; 6 – винт; 7 – гайка; 8 – шайба

Твердосплавные пластины 3 устанавливаются на корпусе 1, на котором предварительно подготовлен шлифованным многоугольник по количеству шлицев. Пластины закрепляются на корпусе при помощи сепаратора 2, который ориентирует пластины по углу. Для компенсации погрешностей пластин по длине на поверхности сепаратора 2 в стыке с пластинами наклеивается резиновая прокладка 4. Пластины, таким образом, по углу могут самоустанавливаться по шлицевому отверстию, так как их задача калибровать отверстие по наружному диаметру и ширине шлицев. Исправлять погрешность шлицевых отверстий по углу такой дорн не предназначен.

Дорнование производится с натягом (превышение размера дорна над соответствующими размерами отверстия). Предварительные исследова-

ния показали, что наилучшие результаты получаются при заборных и обратных конусах, шириной ленточки, натяги дорнования зависят от множества факторов и колеблются в допустимых пределах. В результате прохождения дорна сквозь шлицевое отверстие, благодаря натягу и геометрии дорна, происходит пластическая деформация поверхности детали, как по наружному диаметру, так и по боковым поверхностям шлицев. Точность шлицевого отверстия возрастает, шероховатость поверхностного слоя уменьшается, создаются благоприятные напряжения сжатия и, как следствие, повышается износостойкость детали.

**Исследование процесса калибрования шлицевых отверстий.** Основная же задача дорнования – обеспечение точности шлицевых отверстий по наружному диаметру и ширине



шлицев. Исследования показали, что поле рассеивания параметров отверстий, полученное после термообработки деталей, уменьшается в 1,5–2 раза после обработки дорнами и повышает точность шлицевых отверстий на 1–2 качества точности. Повышение точности шлицевых отверстий происходит за счет пластических деформаций поверхностных слоев шлицев в результате процесса дорнования.

На рис. 2 приведена зависимость остаточных деформаций металла от натяга дорнования при обработке деталей из различных материалов, которая имеет прямолинейный характер.

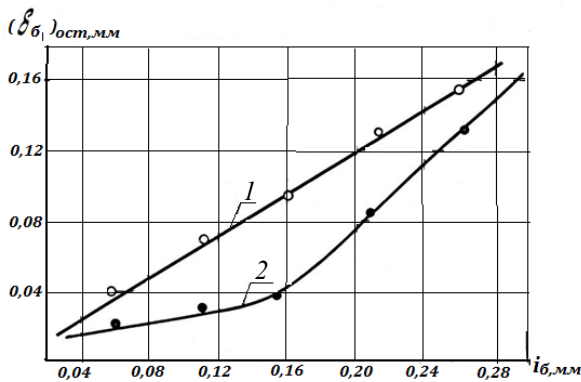


Рис. 2. Зависимости остаточных деформаций металла от величины натяга по боковой поверхности:

1 – сталь 40X, объемно-закалённая до твердости 48...52 HRC; 2 – сталь 20X, цементированная на глубину 0,8...1,1 мм и закалённая до твердости 58...62 HRC

Малый угол наклона зависимости 1 к оси абсцисс, свидетельствует о том, что остаточная деформация по боковому диаметру шлицевого отверстия при дорновании втулок из стали 40X, закалённой до твердости 48...52 HRC, намного меньше натяга дорнования. Следовательно, величины обратных упругих деформаций в этом случае из общей суммы абсолютной деформации (натяг дорнования  $i_B$ ) имеет наибольшее значение.

Одним из важнейших элементов, определяющих форму рабочей поверхности дорна, являются углы заборного конуса  $\alpha$ , так как заборной частью осуществляется основная деформация обрабатываемого металла и от неё в значительной степени зависит усилие дорнования  $P$  и качество поверхности. При правильном выборе углов заборных конусов шлицевых дорнов тяговое усилие будет минимальным, высота шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия также будет получаться наименьшей, ввиду преимущественного радиального течения металла.

На рис. 3 приведены результаты исследований изменения высоты шероховатости поверхности  $Rz$  шлицевых отверстий втулок от величины заборного угла  $\alpha$  фасонного дорна.

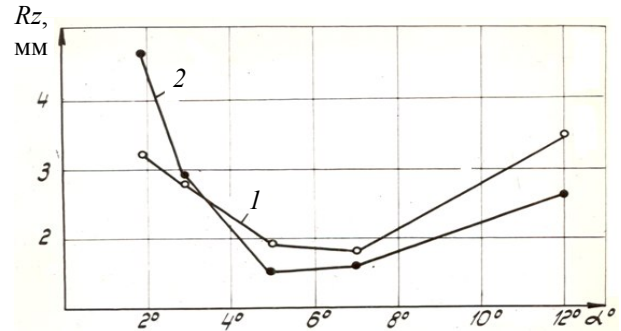


Рис. 3. Зависимость высоты шероховатостей поверхности  $Rz$  и тяговых усилий  $P$  от величины заборного конуса:

1 – сталь 20X, цементированная и закалённая до твердости 58...62 HRC; 2 – сталь 40X, закалённая до твердости 48...52 HRC

Исследования показали, что оптимальная геометрия дорнующего инструмента  $\alpha = 4...6^\circ$  обеспечивает наивысшее качество обработанной поверхности шлицевого отверстия и наименьшую величину тягового усилия дорнования.

### Заключение

Калибрование шлицевых отверстий в термообработанных деталях с использованием предложенной конструкции твердосплавного сборного шлицевого дорна является эффективным методом отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающим получение поверхностей высокого качества.

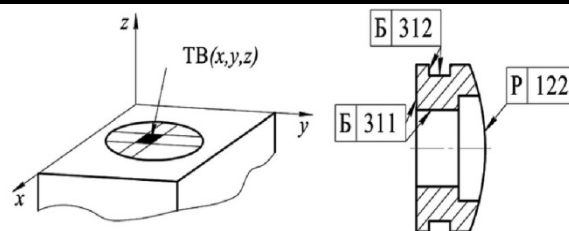
### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берберов С.А., Берберова Н.И., Кешишьян К.С. Повышение качества шлицевых отверстий в термообработанных деталях дорнованием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №8. С. 10–13.

### REFERENCES

1. Berberov S.A., Berberova N.I., Keshishyan K.S. Quality increase of slot holes in heat-treated parts by mandrelling // *Hardening Technologies and Coatings*. 2015. №8. pp. 10–13.

Рецензент д.т.н. Я.Н. Отений



УДК 621.438

DOI: 10.12737/article\_59ae90c6830360.45378807

**А.Н. Михайлов**, д.т.н.,  
**В.А. Михайлов**, аспирант,  
**А.В. Байков**, к.т.н.  
(Донецкий национальный технический университет)  
E-mail: mntk21@mail.ru

## **Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода**

*Выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора турбовального ГТД. При этом проведено структурирование лопаток компрессора в группы и показано, что структурные группы лопаток работают в различных условиях эксплуатации. Установлено, что различные структурные группы лопаток компрессора имеют свои определенные особенности эксплуатации и эрозионного износа. Показано, что эрозионный износ всех групп лопаток компрессора можно характеризовать неравномерностями трех родов. В работе предложен общий подход в повышении ресурса всех групп лопаток компрессора вертолетного ГТД.*

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; лопатки компрессора; группы лопаток; технология; ресурс.

**A.N. Mikhailov**, D. Eng.,  
**V.A. Mikhailov**, Post graduate student,  
**A.V. Baikov**, Can. Eng.  
(Donetsk National Technical University)

## **Life complex increase of all groups of compressor blades of a turbo-shaft gas turbine engine on the basis of a functionally-directed approach**

*The analysis of peculiarities in compressor blade operation of the turbo-shaft gas turbine engine is carried out. At the same time the compressor blade structuring into groups is carried and it is shown that structural groups of blades operate under different conditions of operation. It is defined, that different structural groups of compressor blades have their own definite peculiarities of operation and erosion wear. It is shown, that the erosion wear of all groups of compressor blades may be characterized by irregularities of three kinds. In the paper a general approach to life increase of all groups of compressor blades in a helicopter gas turbine engine is offered.*

**Keywords:** aircraft engine; compressor blades; blade groups; technology; life.

В настоящее время, для вертолетов широко используются турбовальные двигатели серии ТВ3-117 и ВК-2500. Они, в основном, применяются для вертолетов следующих типов Ми-24П, Ми-28Н, Ка-32А1, Ка-50 и Ка-52 и других машин. Турбовальные двигатели серии

ТВ3-117 и ВК-2500 являются надежными, компактными и высокоэффективными газотурбинными двигателями (ГТД).

Одной из основных подсистем турбовального двигателя является осевой компрессор. В осевом компрессоре имеется пять различных

групп лопаток. Именно лопатки компрессора [1, 2] являются одним из слабых звеньев вертолетного двигателя, так как они разрушаются одними из первых. При этом процесс эрозионно-абразивного износа лопаток каждого каскада имеет свои определенные особенности. К этим группам лопаток можно отнести следующие виды (в эти группы включены поворотные лопатки входного направляющего аппарата): поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) (1 ступень); поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) статора (4 ступени); лопатки направляющего аппарата статора (8 ступеней); лопатки спрямляющего аппарата (1 ступень); лопатки ротора (12 ступеней).

Выполненные исследования особенностей разрушения лопаток компрессора показывают, что главным недостатком разрушений лопаток осевого компрессора при эксплуатации является то, что лопатки разрушаются при эксплуатации неравномерно. А именно происходят следующие явления: каждая лопатка имеет неравномерное разрушение элементов по входной кромке, по периферийной кромке, по задней кромке, по поверхности корыта пера лопатки; неравномерные разрушения происходят по номерам ступеней каждой группы ступеней лопатки, по видам групп лопаток.

Данные исследования проводились для лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117, общий вид которых показан на рис. 1.

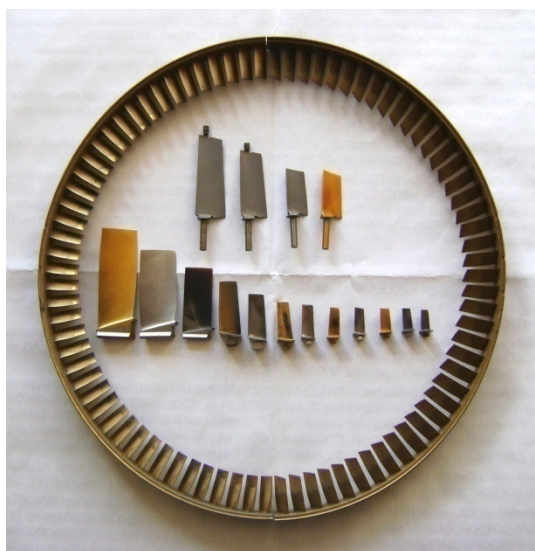


Рис. 1. Общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117

Для исключения неравномерностей разрушения лопаток и повышения их ресурса необходимо разработать общий подход к повыше-

нию ресурса лопаток компрессора и создать ряд технологических методов, обеспечивающих комплексное повышение ресурса всех ступеней и каскадов лопаток проточной части осевого компрессора.

Рабочий процесс вертолетного турбовально-го двигателя гипотетически соответствует идеальному термодинамическому циклу Брайтона [2] с подводом и отводом теплоты при постоянных давлениях и изоэнтальпическом сжатии и расширении. Для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газоздушного потока проточной части. На практике идеальный цикл всегда отличается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый комплекс различных параметров. Важнейшие из них – это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора, лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором [3]. С увеличением зазоров проточной части компрессора снижаются все параметры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и элементами проточной части компрессора происходит в основном из-за эрозионно-абразивного их износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий.

Можно отметить, что процесс действия эксплуатационных воздействий потоков среды и возникающих при этом разрушений лопаток компрессора имеет определенные особенности. А именно, этот процесс обусловлен неравномерными действиями на элементы лопатки, на лопатки группы и лопатки входящие в различные виды их групп. Эти особенности неравномерных действий и разрушений можно характеризовать следующими неравномерностями: неравномерность 1-го рода (по элементам лопатки), неравномерность 2-го рода (по номерам ступеней), неравномерность 3-го рода (по видам групп ступеней).

Это приводит к неравномерным разрушениям лопаток осевого компрессора. Неравномерности усложняют процесс применения технологических методов повышения ресурса эксплуатации лопаток компрессора. Вместе с тем, для повышения ресурса лопаток компрессора необходимо рассматривать особенности их разрушения в едином комплексе и из этих условий обеспечивать свойства лопаток комплексно для всего компрессора.

Таким образом, при обеспечении свойств лопаток необходимо учитывать следующие эксплуатационные особенности (рис. 2):

– неравномерные воздействия и разрушения

лопатки в пределах каждой ступени в одноименном виде групп лопаток;  
– неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от номера

ступени в одноименном виде групп лопаток;  
– неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от вида групп лопаток.



Рис. 2. Виды групп лопаток осевого компрессора ГТД модели ТВ3-117 и особенности их разрушений

Основные виды эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД можно представить следующим образом: газоздушный поток с включениями пыли, пепла, песка, абразива и тому подобных частиц; потоки крупных частиц и элементов; ударные, динамические и вибрационные нагрузки; действие различных видов сил и возникающих при этом напряжений изгиба и кручения, растяжения и сжатия, смятия и среза; пар, жидкости, вода, льдинки, снег; кислотные, щелочные, солевые и другие виды воздействий; температурные и другие воздействия; комбинированные воздействия.

На этом множестве эксплуатационных воздействий наиболее значительные, влияющие на увеличения зазоров в проточной части осевого компрессора, являются воздействия первого вида. То есть постоянно действующие эрозионные воздействия мелких частиц пыли, песка и абразива.

Эксплуатационные воздействия приводят к разрушениям лопаток компрессора ГТД, основ-

ные из которых следующие: эрозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки; местные царапины, риски, забоины и вмятины элементов пера лопатки; усталостные и ударные разрушения лопатки от действия различных видов разрушений; излом пера лопатки; коррозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки; разрушения поверхностного слоя от действия кислот, щелочей, солей и других видов воздействий; комбинированные разрушения лопатки.

На практике обычно возникают комбинированные разрушения лопаток. При этом следует заметить, что эрозионно-абразивный износ лопаток наиболее отрицательно влияет на увеличение зазоров в проточной части компрессора, что и снижает эксплуатационные параметры компрессора ГТД.

При этом к основным параметрам, влияющим на возникновение неравномерностей разрушения лопаток в осевом компрессоре ГТД, можно отнести следующие: изменяющаяся пространственная форма лопатки; изменяющаяся

пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора; изменяющиеся параметры проточной зоны компрессора; изменяющиеся параметры потока среды в проточной части компрессора; особенности кинематики лопаток компрессора.

Следует учитывать то, что на возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки влияет изменяющаяся пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора [2 – 4]. Эти особенности существенно зависят от следующего: количества лопаток в ступени и их пространственного расположения; количества ступеней в группе и их пространственного расположения; количества видов групп и их пространственного расположения.

Кроме того, возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки обусловлены изменяющимися параметрами проточной зоны компрессора: геометрическими параметрами; параметрами зазоров проточной зоны [3]; структурой зазоров и полостей проточной зоны. Более того, возникновение неравномерностей происходит из-за изменяющихся параметров потока среды в проточной части компрессора, которые определяются: параметрами размеров, структуры и концентрации частиц потока; скоростью и интенсивностью потока среды; параметрами температуры и особенностями движения потока среды по проточной части компрессора. И наконец, возникновение неравномерностей разрушений лопаток происходит из-за особенностей кинематики лопаток компрессора, определяющих их вращение или неподвижность. В целом, действие этих параметров необходимо учитывать комплексно.

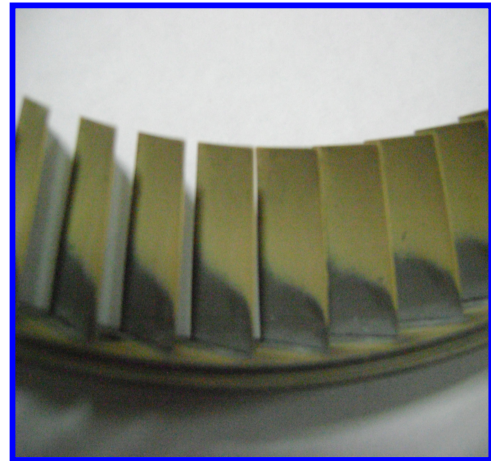
В осевом компрессоре турбовального двигателя наиболее значительно изнашиваются лопатки ротора. Анализ процесса эрозионно-абразивного износа лопаток показывает, что они изнашиваются также и из-за особенностей концентрации частиц пыли в единице объема среды, которая переменна, и может достигать до  $6 \text{ г/м}^3$  на последних ступенях компрессора по сравнению с первыми ступенями лопаток компрессора. Эти особенности усложняют процессы эрозионно-абразивного износа элементов пера лопаток по длине проточной части компрессора. Поэтому каждая лопатка определенной ступени имеет свои особенности эрозионно-абразивного износа.

В процессе эксплуатации ГТД лопатки компрессора разрушаются из-за действия эрозионно-абразивного износа. При этом возникают неравномерный износ лопаток, который подразделяется на неравномерности трех родов.

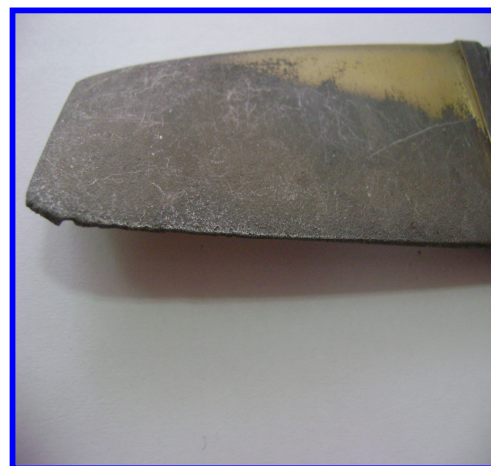
На рис. 3 представлен общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117.



а)



б)



в)

**Рис. 3. Общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117:**

а – поворотные лопатки НА статора; б – лопатки НА статора; в – лопатка ротора

Анализ особенностей разрушения групп лопаток осевого компрессора (см. рис. 3) показывает, что каждая группа лопаток имеет свои

особенности разрушений, которые определяются неравномерностью 3-го рода. При этом в каждой группе лопатки имеют свои особенности разрушений, которые характеризуются неравномерностью 2-го рода. Если рассматривать конкретную лопатку, то по элементам пера лопатки действуют неравномерности 1-го рода.

Выполненные исследования этих особенно

стей разрушения позволили установить, что процесс разрушений групп лопаток, лопаток по ступеням и конкретно каждой лопатки имеют свои закономерности [4]. Эти закономерности можно представить в виде структурной схемы взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации, которая показана на рис. 4.

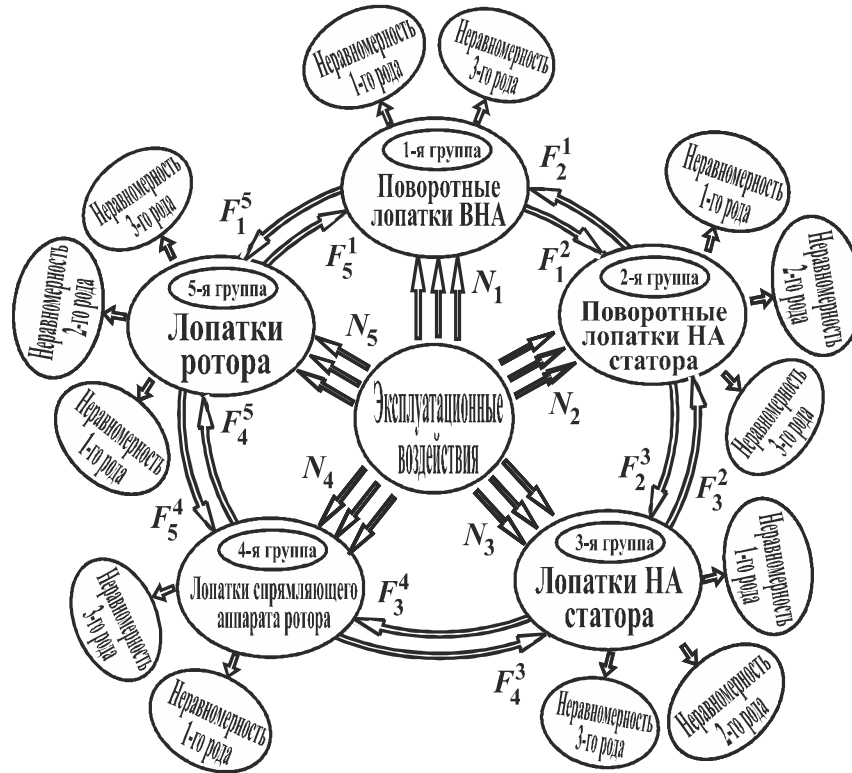


Рис. 4. Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения

Лопатки осевого компрессора образуют пять различных групп лопаток, на них действуют эксплуатационные воздействия  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  каждое из которых характеризуется потоками материи, энергии и информации. Взаимосвязь между особенностями разрушений различных групп лопаток показана с помощью связей  $F_i^j$ .

Выполненные исследования особенностей разрушений лопаток компрессора турбовального двигателя вертолета позволили установить, что они имеют определенные особенности. При этом в процессе неравномерного разрушения лопаток действует три рода неравномерностей, которые снижают ресурс лопаток и авиационного двигателя в целом. Для исключения таких неравномерных разрушений лопаток необходимо обеспечивать специальные свойства лопаток компрессора. Однако традиционными технологическими методами решить эти проблемы

не возможно. Здесь необходимы специальные подходы с применением функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5].

Возникающие неравномерности эрозионно-абразивного износа лопаток не позволяют эффективно применять традиционные методы снижения их износа. Например, при нанесении традиционных нитрид титановых покрытий на перо лопатки ротора повышается только незначительно ресурс лопаток. Это обусловлено тем, что предельные разрушения пера лопатки ротора происходят на передней кромке пера у его периферии. После разрушения покрытия происходит интенсивное разрушение тела пера при отсутствии разрушения поверхности корыта пера лопатки. Это снижает ресурс лопатки в целом, и не позволяет их восстанавливать, в том числе многократно [4].

При обеспечении функционально-ориентированных свойств пера лопатки можно

существенно повысить ресурс лопаток, например, за счет возможности многократного восстановления работоспособности лопаток посредством применения специальных покрытий неравномерной толщины или с неравномерными физико-механическими свойствами, как это выполнено в работе [4].

Для решения вопросов комплексного повышения ресурса лопаток осевого компрессора вертолетного ГТД разработана структурная схема взаимосвязей  $F_i^j$  и обеспечения функционально-ориентированных свойств на базе функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5] (рис. 5).

1.  $Str \{F, A\}$  – структура, состоящая из двух множеств, а именно множества действующих на элементы лопатки эксплуатационных функций  $F$  и множества возникающих между ними связей  $A$ .

2.  $Str \{P, B\}$  – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного из функциональных элементов  $P$  множества лопаток компрессора и множества действующего между ними связей  $B$ .

3.  $Str \{C, G\}$  – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного из свойств элементов лопатки  $C$ , которые необходимо обеспечить, и множества действующих между ними связей  $G$ .

4.  $Str \{TB, Q\}$  – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного на технологических воздействиях  $TB$ , необходимых для

обеспечения свойств, и множества действующих между ними связей  $Q$ .

5. Принципы ФОТ [5]. Представленные элементы методики связаны между собой на базе функционально-ориентированных технологии, а именно их принципов.

6. Функционально-ориентированные свойства (ФОС) [5].

7.  $Str \{R, D\}$  – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного на ресурсах  $R$  лопаток компрессора, и множества действующих между ними связей  $D$ .

8.  $Str \{M, U\}$  – структура, состоящая из двух множеств, а именно множества необходимых методов  $M$  для обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и множества возникающих между ними связей  $U$ .

Анализ структурной схемы взаимосвязей и обеспечения ФОС, позволил установить, что обеспечение свойств лопаток реализуется в едином комплексе на базе функционально-ориентированного подхода, который позволяет реализовывать свойства всех групп лопаток в зависимости от действующих эксплуатационных функций и с учетом неравномерностей трех родов. Это дает возможность комплексно обеспечивать ресурс всех лопаток, реализовывать их предельных эксплуатационный потенциал и существенно повысить технико-экономические показатели эксплуатации вертолетного двигателя.

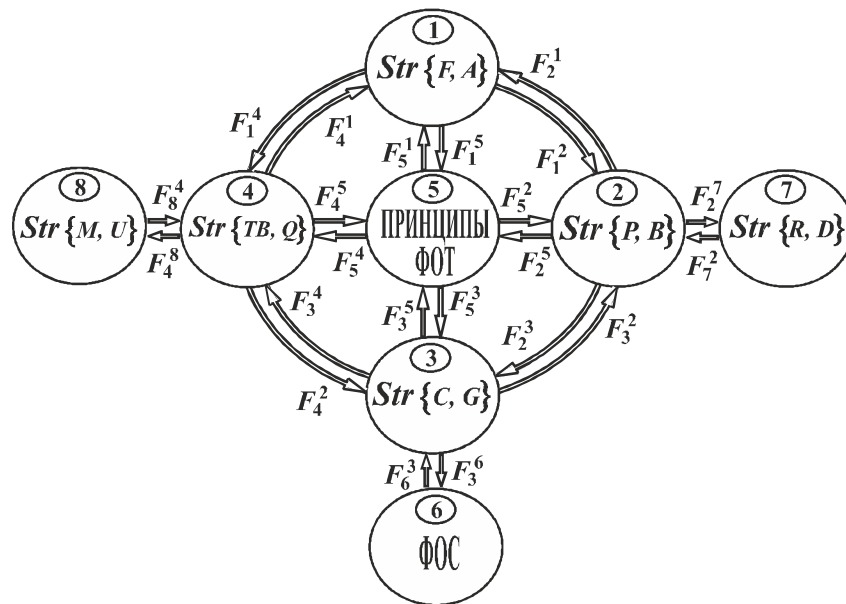


Рис. 5. Структурная схема взаимосвязей и обеспечения ФОС

Одним из перспективных вариантов решения вопроса повышения ресурса лопаток компрес-

сора ГТД, является обеспечение ресурса всех групп лопаток, на основе следующих условий:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$k_{p1}R_{p1} = k_{p2}R_{p2} = k_{p3}R_{p3} = k_{p4}R_{p4} = k_{p5}R_{p5} \rightarrow \max; \quad (2)$$

где  $R_i$  – ресурс лопаток  $i$ -й группы;  $R_{pi}$  – межремонтный ресурс лопаток  $i$ -й группы;  $k_{pi}$  – количество восстановлений лопаток  $i$ -й группы.

Для обеспечения условия (1) или (2) необходимо использовать функционально-ориентированный подход [5]. Это позволяет полностью адаптировать все группы лопаток компрессора к особенностям их эксплуатации и обеспечить их предельный эксплуатационный потенциал [4, 6].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авиинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. – Вып. № 4 (145). – 182 с. Что за статья? Авторы??
2. **Вертолетные** газотурбинные двигатели / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
3. **Михайлов, А.Н., Михайлов, Д.А., Грубка, Р.М., Петров, М.Г.** Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №7(49). – С. 30–39.
4. **Михайлов, Д.А.** Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатаци-

онных функций / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 4 (50). – С. 121 – 127.

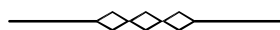
5. **Михайлов, А.Н.** Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

6. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

### REFERENCES

1. Aviainform / Monthly information-analytical journal. – M.: International Association of "Union of Aircraft Engine Manufacturing", 2016. - Issue № 4 (145). – pp. 182.
2. *Helicopter Gas Turbine Engines* / V.A. Grigoriev, V.A. Zrelov, Yu.M. Ignatkin et al. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 491.
3. Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A., Grubka, R.M., Petrov, M.G. Machine parts life increase based on functionally-directed coatings // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №7(49). – pp. 30–39.
4. Mikhailov, D.A. Basic peculiarities of compressor blades operation in gas turbine engines and classification of their operation functions / *Efficient Technologies and Systems of Mechanical Engineering: Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2014. Issue 4 (50). – pp. 121 – 127.
5. Mikhailov, A.N. *Fundamentals of Functionally-directed Technologies Synthesis*. – Donetsk: DonNTU, 2009. – pp. 346.
6. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters of Parts Surface Layers*. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров



Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

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

Сдано в набор 01.08.2017. Выход в свет 29.09.2017.

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

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16