ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УНПК
Научно – технический журнал
Издается с 1995 года
Выходит шесть раз в год
№ 2 (316) 2016
Март – Апрель

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно–научно–производственный комплекс»
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Редакционный совет:
Голенков В.А. *д-р техн. наук, проф., председатель*
Пилипенко О.В. *д-р техн. наук, проф., зам. председателя*
Радченко С.Ю. *д-р техн. наук, проф., зам. председателя*
Борзенков М.И. *канд. техн. наук, доц., секретарь*
Астафичев П.А. *д-р юрид. наук, проф.*
Иванова Т.Н. *д-р техн. наук, проф.*
Колчунов В.И. *д-р техн. наук, проф.*
Константинов И.С. *д-р техн. наук, проф.*
Новиков А.Н. *д-р техн. наук, проф.*
Попова Л.В. *д-р экон. наук, проф.*
Степанов Ю.С. *д-р техн. наук, проф.*

Редколлегия
Главный редактор
Степанов Ю.С. *д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации*

Заместители главного редактора:
Барсуков Г.В. *д-р техн. наук, проф.*
Гордон В.А. *д-р техн. наук, проф.*
Подмастерьев К.В. *д-р техн. наук, проф.*

Члены редколлегии:
Бабичев А.П. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Бухач А. *д-р техн. наук, проф. (Польша)*
Вдовин С.И. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Дьяконов А.А. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Емельянов С.Г. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Зубчанинов В.Г. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Иванов Б.Р. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Киричек А.В. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Клименко С.А. *д-р техн. наук, проф. (Украина)*
Колесников К.С. *д-р техн. наук, проф., академик РАН (Россия)*
Копылов Ю.Р. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Малинин В.Г. *д-р физ-мат. наук проф. (Россия)*
Мирсалимов В.М. *д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)*
Мулюкин О.П. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Осадчий В.Я. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Панин В.Е. *д-р техн. наук, проф., академик РАН (Россия)*
Распопов В.Я. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Смоленцев В.П. *д-р техн. наук, проф. (Россия)*
Старовойтов Э.И. *д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)*
Хейфец М.Л. *д-р техн. наук, проф. (Беларусь)*

Ответственный секретарь:
Тюхта А.В. *канд. техн. наук*

Адрес редакции
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 54-15-19, 55–55–24, 41–98–48,
41–98–03, +7(906)6639898
www.gu–unpk.ru
E–mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77–47351 от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс **29504**
по объединенному каталогу
«**Пресса России**»

© Госуниверситет – УНПК, 2016

Содержание

Естественные науки

Якушина С.И., Ромашин С.Н., Преснецова В.Ю., Мосин Ю.В. **Связь теоретической и реальной прочности упругих материалов** ... 3
Шахбандаев Э.Г. **Рост трещины с концевыми пластическими зонами в трехсвязной кусочно-однородной среде** ... 9
Баранов В.Л., Смирнов Н.П. **Продольное волновое нагружение и поперечная деструкция стволов артиллерийских систем при выстреле** ... 14

Моделирование технологических процессов

Веткасов Н.И., Крупенников О.Г., Улитин С.И., Мотлях Е.С. **Моделирование силовой напряженности процесса плоского шлифования композиционными кругами** ... 19

Конструирование, расчеты, материалы

Картель Н.Т., Бочечка А.А., Лавриненко В.И., Полторацкий В.Г., Девицкий А.А., Лещенко О.В., Билоченко В.А., Панова А.Н., Грищенко Г.С.,Шамраева В.С., Ущаповский Ю.П., Смирнова А.В. **Исследование композиционных порошков на основе алмаза, B_4C, cBN, структуированных углеродной связкой и оценка эффективности их применения в абразивном инструменте** ... 28
Ривас Перес Д.Э., Носенко В.А., Данилов Д.В. **Химическая подготовка карбида кремния для получения самосвязанного карбида кремния** ... 37
Корнеев Ю.С., Гордон В.А., Корнеева Е.Н., Гулидова Т.Ю. **Расчет времени разгона привода с пускозащитной муфтой** ... 41
Лизогуб В.А. **Особенности конструирования шпиндельных узлов на опорах качения металлорежущих станков** ... 44
Коноплев В.И., Анцев В.Ю., Башкин С.А. **Технологическая оснастка для специальных работ** ... 54
Прокошина Т.С. **Определение оптимального радиуса вращательной рукоятки и параметров ее размещения относительно оператора металлообрабатывающего станка** ... 58
Солер Я.И., Нгуен Чи Киен. **Построение моделей и предсказание отклонений от плоскостности поверхностей деталей из сплава 1933Т2 при многопроходном шлифовании** ... 64

Машиностроительные технологии и инструменты

Бабичев А.П., Твердуха А.О., Пастухов Ф.А. **Экспериментальные исследования остаточных напряжений в условиях виброволнового нагружения** ... 74
Барсуков Г.В., Кожус О.Г. **Исследование режущей способности наномодифицированного абразива из отходов цветного производства для гидроабразивного резания материалов** ... 79
Панайоти В.А. **Повышение эффективности и качества при шлифовании быстрорежущих сталей с использованием твердых смазок** ... 87
Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. **Анализ состояния станкоинструментальной промышленности России в период с 2000 по 2015 гг. в разрезе импортозамещения** ... 92
Сухочев Г.А., Сокольников В.Н., Коденцев С.Н. **Технологические аспекты балансировки высокооборотных роторов** ... 99
Матюнин А.Г., Торопцева Е.Л., Большаков А.Н., Косинова О.А., Василенко Ю.В. **Влияние параметров режимов резания на изменение структуры и свойств очага деформации инструментальных сталей** ... 106
Забельян Д.М., Пухальский В.А. **Новый подход к созданию нормативов режимов резания** ... 112

Приборостроение и биотехнические системы

Лабковская Р.Я., Козлов А.С., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И. **Анализ динамических погрешностей мембранных электромеханических элементов систем управления** ... 118

Контроль, диагностика, испытания

Радченко С.Ю., Дуков М.Д. **Особенности тепловизионного контроля электрооборудования и его перспективы** ... 122
Ефремова Е.С. **Имитация воздушных сигналов при наземной отработке и контроле функционирования комплексов бортового оборудования самолета** ... 127
Никитин А.В., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М. **Обеспечение помехоустойчивости системы контроля параметров окружающей среды при эксплуатации вертолета** ... 135
Баженов И.Н., Подмастерьев К.В. **Средства контроля магнетитовых руд методом оценки магнитной восприимчивости** ... 145

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, определенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УНПК

The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 2 (316) 2016
March – April

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Educational Professional Institution
«State University – Education–Scientific–Production Complex»
(State University ESPC)

Editorial council
Golenkov V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof., president*
Pilipenko O.V. *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*
Radchenko S.Y. *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*
Borzenkov M.I. *Candidate Sc. Tech., Assistant Prof, secretary*
Astafichev P.A. *Doc. Sc. Law., Prof.*
Ivanova T.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kolchunov V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Konstantinov I.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Novikov A.N. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Popova L.V. *Doc. Sc. Ec., Prof.*
Stepanov Y.S.*Doc. Sc. Tech., Prof.*

Editorial Commitee
Editor-in-chief
Stepanov Y.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.,honored worker of science of Russian Federation*

Editor-in-chief Assistants
Barsukov G.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Gordon V.A.*Doc. Sc. Tech., Prof.*
Podmasteryev K.V.*Doc. Sc. Tech., Prof.*

Member of editorial board
Babichev A.P. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Buchach A. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)*
Vdovin S.I. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Dyakonov A.A. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Emelyanov S.G. *Doc Sc. Tech., Prof.* (Russia)
Subchaninov V.G. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Ivanov B.R. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Kirichek A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Klimenko S.A. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)*
Kolesnikov K.S. *Doc. Sc. Tech.,Prof., Academician of RAS (Russia)*
Kopylov Y.R. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Malinin V.G. *Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Russia)*
MirsalimovV.M. *Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Azerbaijan)*
Mulyukin O.P. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Osadchy V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Panin V.E. *Doc. Sc. Tech., Prof. Academician of RAS (Russia)*
Raspopov V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Smolenzev V.P. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Starovoitov A.I.*Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Belarus)*
Heifets M.I.*Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)*

Executive secretary:
Tyukhta A.V. *Candidate Sc. Tech.*

Address
302020 Orel,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 54-15-19, 55–55–24, 41–98–48,
41–98–03, +7(906)6639898
www.gu–unpk.ru
E–mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77–47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the **«Pressa Rossii»29504**

© State University ESPC, 2016

Contents

Natural sciences

Yakushina S.I., Romanov S.N., Presnetsova V.Yu., Mosin Yu.V. **Contact of theoretical and actual strength elastic materials** 3
Shahbandaev E.G. **Growth of crack with end plastic zones in three-connected piecewise homogeneous medium** 9
Baranov V.L., Smirnov N.P. **Longitudinal and transverse wave loading destruction trunks when fired artillery systems** 14

Modelling of technological processes

Vetkasov N.I., Krupennikov O.G., Ulitin S.I., Motlyakh Ye.S. **Modeling of power tension surface grinding composite community** 19

Designing, calculations, materials

Kartel N.T., Bochechka A.A., Lavrinenko V.I., Poltoratskiy V.G., Devitskiy A.A., Leshchenko O.V., Bilochenko V.A., Panova A.N., Grishchenko G.S., Shamrayeva V.S., Ushchapovskiy Yu.P., Smirnova A.V. **Research of structured carbon binder composite powders based on diamond, B_4C, cBN and evaluation of their effectiveness application in the abrasive tool** 28
Rivas Peres D.E., Nosenko V.A., Danilov D.V. **Chemical preparations for silicon carbide self-bonded silicon carbide** 37
Korneev Yu.S., Gordon V.A., Korneeva E.N., Gulidova T.Yu. **The calculation of time of dispersal of the drive with the start–protective clutch** 41
Lizogub V.A. **Peculiarities in the design of spindles for rolling bearings of machine tools** 44
Konovalov V.I., Antsev V.Yu., Bashkin S.A. **Production tooling for special works** 54
Prokoshina T.S. **Determination of the optimal rotational arm radius and parameters its location relative to the operator metalworking machine tools** 58
Soler Ya.I., Nguyen Chi Kien **Model building and prediction flatness surfaces of details from 1933T2 alloy at multipass grinding** 64

Machine building technology and toolware

Babichev A.P., Tverdukha A.O., Pastukhov F.A. **Experimental study of residual stress in the vibrowave loading** 74
Barsukov G.V., Kozhus O.G. **Study cutting ability nano modified abrasive from waste color production waterjet cutting of materials** 79
Panayoti V.A. **Improving efficiency and quality in grinding high speed steel using solid lubricants** 87
Istotskiy V.V., Protasev V.B. **The analysis of the condition of russia machine tool industry in the period from 2000 to 2015 in the context of import substitution** 92
Sukhochev G.A., Sokolnikov V.N., Kodenzev S.N. **Technological aspects of balance high–speed rotors** 99
Matyunin A.G., Toroptseva Ye.L., Bolshakov A.N., Kosinova O.A., Vasilenko Yu.V. **Effects of cutting conditions parameters to change the structure and properties of tool steels deformation zone** 106
Zabelyan D.M., Pukhalskiy V.A. **A new approach to creating regulations cutting** 112

Instrument making and biotechnological system

Labkovskaya R.Ya., Kozlov A.S., Tkalich V.L., Pirozhnikova O.I. **Analysis of dinamic inaccuracies of the membrane electromechanical elements of control systems** 118

Control, diagnostics, tests

Radchenko S.Yu., Dukov M.D. **Electrical equipments thermal imagic diagnostics features and prospects** 122
Efremova E.S. **Simulating of air data signals during ground testing and controling function of avionics onboard systems of airplane** 127
Nikitin A.V., Soldatkin V.V., Soldatkin V.M. **Ensuring jam–resistant of control system of surrounding air environments parameters during operation of the helicopter** 135
Bazhenov I.N., Podmasteryev K.V. **Magnetite ore controls by magnetic susceptibility evaluation** 145

The journal is on the List of the peer–reviewed journals and editions, stated by the High Attestation Commission at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, for the publication of the main scientific results of the thesis for the academic degree.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 539.3

С.И. ЯКУШИНА, С.Н. РОМАШИН, В.Ю. ПРЕСНЕЦОВА, Ю.В. МОСИН

СВЯЗЬ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И РЕАЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическая прочность идеальной кристаллической решетки, соответствующая одновременному разрыву всех межмолекулярных связей, очень велика – всего раз в десять меньше модуля Юнга. Прочность реальных твердых тел на несколько порядков меньше. Это объясняется существованием дефектов решетки. Из различных типов дефектов в работе рассматриваются только трещины.

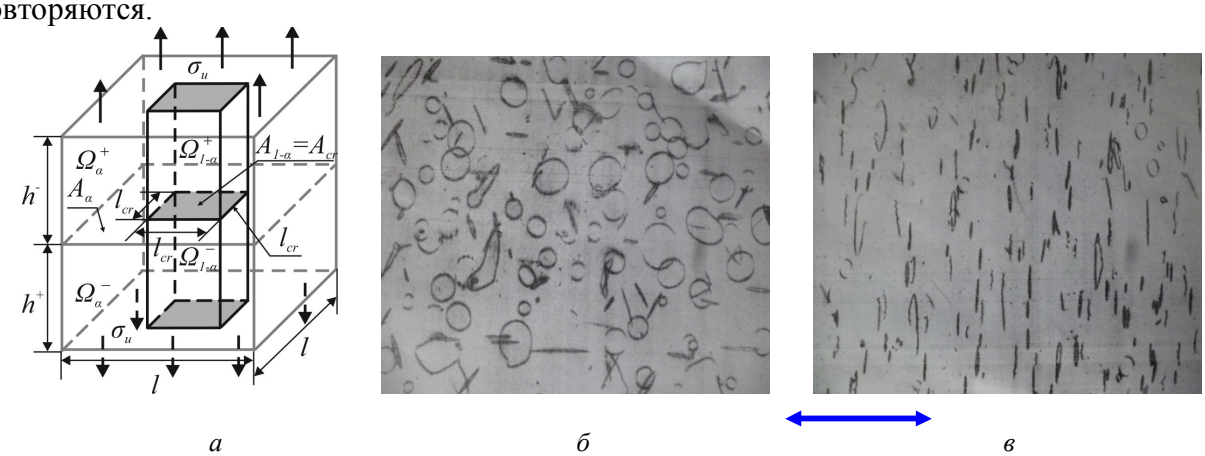
В данной работе предлагается упрощенная модель явления разрушения упругого материала, позволившая установить причины и механизм связи между теоретическим пределом прочности на растяжение и реальным разрушающим напряжением на основе представления о том, что каждая представительная элементарная частица сплошной упругой среды имеет в своем составе микротрещину. Установленные в работе связи между теоретическим пределом прочности и реальным разрушающим напряжением, результаты расчёта, соответствуют известным представлениям и справочным данным.

Ключевые слова: *элементарная представительная область, теоретический предел прочности на растяжение, реальное разрушающее напряжение, размер микротрещины, поврежденность.*

Прочность слоистой структуры определяется прочностью адгезионного соединения ее элементов, а также прочностью самих элементов. Рассматривается только прочность на разрыв как адгезионного соединения элементов структуры, так и ее элементов. Разрыв наступает, если нормальное напряжение σ достигает определенного значения, специфичного для пары материалов при их адгезии или для материала однородного элемента структуры.

В работе предлагается теория, лежащая в основе построения математической модели конечной стадии процесса разрушения адгезионного контакта слоистого композита и его элементов.

Тело B, представлено в виде объединения элементарных частей - ячеек ΔB_n, $n=1,...,N:\ B=\bigcup_{n=1}^{N}\Delta B_n$, $\Delta B_n \bigcap \Delta B_m = \varnothing$, $m \neq n$ (рисунок 1, а). Основой послужили опытные данные, изображенные на рисунке 1 б, в. В каждой из них свойства, характер неоднородности, используемые для макроописания осредненные характеристики материала, повторяются.



а *б* *в*

Рисунок 1 – Модель структуры поврежденного материала

а – схемаячеистой структуры; б – распределение дислокаций в ненапряженном материале [2]; в – та же структура для растягиваемого в направлении стрелки материала [2]

Для учета неоднородности материала при континуальном описании для структурной ячейки вводятся внутренние параметры [1]. Чтобы исключить детальный учет неоднородности состояния в микро области, в описание вводятся осредненные по ней характеристики материала, используется представление о представительной области, когда диаметр области ΔB_n имеет (при заданной точности осреднения) не равную нулю нижнюю границу.

Допускается, что в каждой структурной ячейке ΔB_n в отсутствии внешней нагрузки имеется трещина, но бесконечно малых размеров (рисунок 1, а).

При появлении трещины часть энергии упругих деформаций окружающей ее среды превращается в поверхностную энергию F_{saf} ее берегов, которая распределяется по ним равномерно с интенсивностью W_{saf}:

$$F_{saf} = W_{saf}\left(A_{cr}^{+} + A_{cr}^{-}\right) = 2\,W_{saf}\,A_{cr}\,.$$

Область Ω_D влияния трещины на состояние материала вокруг нее имеет характерный размер D, соизмеримый со своим аналогом l_{cr} для трещины. Область Ω_D в свою очередь условно делится на две не пересекающиеся области Ω_α и $\Omega_{1-\alpha}$. Плоская форма трещины вносит определенную ориентацию в пространство Ω_D. Объемы этих областей V_D, V_α и $V_{1-\alpha}$ относятся точно также как и площади A_D, A_α и $A_{1-\alpha}$, то есть находятся в отношении:

$$V_D : V_\alpha : V_{1-\alpha} = A_D : A_\alpha : A_{1-\alpha} = 1 : \alpha : 1-\alpha\,.$$

где α – относительная площадь части сечения области Ω_D плоскостью трещины, не подвергшаяся разрушению;

$\beta = 1-\alpha$ – поврежденность этого сечения трещиной.

Параметр α вводится как параметр, определяющий состояние упругой среды и подлежит определению: $\alpha = A_\alpha / A_D$

Поврежденность – это относительная площадь микротрещины в сечении характерной элементарной ячейки среды ее плоскостью:

$\beta = A_{1-\alpha} / A_D$.

После образования трещины состояние внутри Ω_D искажается, перестает быть однородным.

Количественной оценкой приходящегося на единицу объема области V_D изменения свободной энергии, вызванного деформациями материала внутри V_D является средняя по ячейке объемная плотность изменения энергии упругих деформаций $[w]$. Истинное значение этой плотности w определяется равенством:

$$w = \mu\,\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij} + \frac{\lambda}{2}\varepsilon_{kk}\varepsilon_{ll} + \frac{2\mu+\lambda}{2}b^{\,2}Z^{(2)}{}_{ijk}Z^{(2)}{}_{ijk} + \pi_0\delta_{ij}E_kZ^{(2)}{}_{ijk}$$

где $\varepsilon_{ij} = \dfrac{1}{2}\left(Z_{ij}^{(1)} + Z_{ji}^{(1)}\right) = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} + \dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$ - тензор малых деформаций;

$Z_{ijk} = u_{k,ij}$ –тензоры деформаций.

Напряженное состояние описывается двумя тензорами напряжений:

$$P_{ij}^{(1)} = \frac{\partial w}{\partial Z^{(1)}{}_{ij}} = \frac{\partial w}{\partial \varepsilon_{ij}} = 2\mu\,\varepsilon_{ij} + \lambda\,\delta_{ij}\,\varepsilon_{kk} = \mu\left(u_{i\,,\,j} + u_{j\,,\,i}\right) + \lambda\,\delta_{ij}\,u_{k\,,\,k}$$

$$P_{ijk}^{(2)} = \frac{\partial w}{\partial Z_{ijk}^{(2)}} = (2\mu+\lambda)\,b^2\,Z_{ijk} + \pi_0\,\delta_{ij}\,E_k = (2\mu+\lambda)\,b^2\,u_{i\,,\,jk} + \pi_0\,\delta_{ij}\,E_k$$

λ, μ, b_1, b_2 – материальные постоянные, характеризующие упругие свойства среды.

Величина $W_s = \dfrac{\pi_0^2}{(2\mu+\lambda)b}$ является известной константой, $\pi_0 = W_s$ $\qquad b = \dfrac{W_s}{2\mu+\lambda}$.

Величина параметра α определяется из условия минимума $[w]$: $\dfrac{\partial[w]}{\partial\alpha}=0$.

Получено:

$$\alpha=\left[1+\frac{[w]_{\alpha\alpha}-[w]_{\alpha(1-\alpha)}}{[w]_{(1-\alpha)(1-\alpha)}-[w]_{\alpha(1-\alpha)}}\right]^{-1}. \qquad (1)$$

Здесь $[w]_{AB}$, $A, B=\alpha, 1-\alpha$, - среднее по ячейке значение объемной плотности работы внутренних сил области Ω_A на соответствующих перемещениях частиц в области Ω_B.

Фрагментация тела B на элементарные ячейки ΔB с описанной структурой обладает трансляционной периодичностью. При этом в плоскости трещины располагается целая сеть периодически повторяющихся трещин. Между краями соседних трещин имеется неповрежденный перешеек. Напряженно-деформированное состояние подобных структур рассматривалось в работах [3, 4].

Выражение (1) свидетельствует о том, что как только в материале возникает напряженное состояние, в нем могут возникать микротрещины, так как необходимое условие их существования – $0<\alpha<1$, будет выполнено.

Стремление параметра α к нулю ($\alpha\to 0$) означает стремление материала к разрушению. Учитывая известный факт, свидетельствующий о том, что значение реального предела прочности (разрушающего напряжения) меньше теоретического из-за наличия микротрещин, далее предлагается механизм разрушения частицы ΔB под действием растягивающего напряжения, устанавливающий связь разрушающего напряжения σ_u с теоретическим пределом прочности σ_t, величиной параметра α и размером трещины l_{cr}.

Далее предполагается следующее.

1. В любой момент времени растягивающее частицу ΔB напряжение вычисляется в предположении об отсутствии в ней микротрещины, хотя она в ней (судя по выражению (1)) может быть. В момент, когда это напряжение достигло значения разрушающего напряжения σ_u, реально на перешейке между трещинами оно достигает теоретического предела прочности σ_t, при этом дополнительных трещин на нем не возникает. При этом поврежденность β достигает своего максимального значения $\beta=\beta_{\max}<1$. В следующий момент времени перешеек разрывается скачком, создается картина, аналогичная представленной на рисунке 1в.

Из-за этого и возникает эффект разрушения материала при меньшем по сравнению с ним напряжении.

2. В предположении, что трещина раскрылась, влияния берегов трещины друг на друга исчезает.

3. Ячейки Ω_D^+ и Ω_D^- (для определенности формы) считаются кубами с длиной стороны, равной l. Так что диаметр сечения A_D: $D=l\sqrt{2}$.

Учитывая изложенные гипотезы можно получить два соотношения между размерами ячейки, значениями напряжений в ней, и размерами трещины внутри нее.

$$\frac{\sigma_u^2}{2E}=(1-\alpha)^2\frac{2W_{saf}}{h}+\alpha^2\frac{\sigma_t^2}{2E}. \qquad (2)$$

В соответствии с определением:

$$\alpha=\frac{l^2-l_{cr}^2}{l^2}. \qquad (3)$$

С учетом сделанных допущений выражение (1) приобретает вид:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_t^2 h}{2 W_{saf} E}}. \quad (4)$$

Соотношения содержит в качестве неизвестных величины σ_u, α, l_{cr}, l. Значения σ_t и W_p могут быть вычислены, например, методами, изложенными в [5,6]. Неопределенность системы уравнений дает основание для того, что бы две из неизвестных величин определялись экспериментально или гипотетически, например, допущением о том, что $\sigma_u \approx 0{,}01\sigma_t$, $l \approx h$.

Из выражения (4) вытекает связь:

$$\frac{2W_{saf}}{l} = \frac{\alpha}{1-\alpha}\left(\frac{\sigma_t^2}{2E}\right).$$

С ее учетом из (2) следует зависимость:

$$\sigma_u = \sigma_t \sqrt{\alpha} = \sigma_t \sqrt{1-\beta}. \quad (5)$$

Учитывая, что $\sigma_u \approx 0{,}01\sigma_t$, можно утверждать, что параметр α имеет малую величину: $\alpha \approx 10^{-4}$. Приняв это за основу и учтя (3) можно получить, что $l \approx l_{cr}$. Тогда

$$l_{cr} \approx \frac{4W_{saf} E}{\alpha \sigma_t^2} = \frac{4W_{saf} E}{\sigma_u^2}. \quad (6)$$

Или

$$\sigma_u = \left(\frac{4W_{saf} E}{l_{cr}}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Выражение (5) устанавливает связь теоретического предела прочности σ_t, разрушающего напряжения σ_u и поврежденности материала рассмотренного типа – сеть параллельных микротрещин.

Сопоставляя полученные теоретические результаты с известными, можно убедиться в том, что с точностью до постоянного множителя, соизмеримого с единицей, выражения для оценки величины разрушающего напряжения, определяемой на основании выражения (6), совпадает с существующими аналогичными выражениями Гриффитса и Орована [7,8].

На основании представленных рассуждений, а также работ [9-13] рассчитаны теоретический и реальный пределы прочности, размеры микротрещин. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчета длины микротрещин и минимальной относительной площади неповрежденного трещиной сечения элементарной ячейки (принято $\sigma_u \approx 0{,}01\sigma_t$)

Материал	$\sigma_t, 10^{10}$ *Па* расчет.	$\sigma_t, 10^{10}$ *Па* справ. [14]	$\sigma_u, 10^9$ *Па* расчет.	$\sigma_u, 10^9$ *Па* справ. [14]	$l_{cr}, 10^{-7}$ *м*	$\alpha, 10^{-5}$
Cr	4,47	3,08	0,37	0,41	2,88	0,8
Ti	1,56	2,05	0,21	0,24	3,31	4,9
Mo	4,05	3,91	0,53	0,80	3,15	3,1

Данные таблицы свидетельствуют об удовлетворительном соответствии расчетных и известных данных.

Работа выполнялась в рамках базовой части государственного задания на 2016 г., код проекта 286.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов, Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Лань. – 2004. – Т. 1. – 528 с.

2. Жирифалько, Л. Статистическая физика твердого тела / Л. Жирифалько. – М.: Мир, 1975. – 384 с.

3. Каштанов, А.В. Энергетический подход к определению уровня мгновенной поврежденности / А.В. Каштанов, Ю.В. Петров // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – Вып. 5. – С. 71 – 75.

4. Zhen-Gong, Zhou Nonlocal theory solution of two collinear cracs in the functionally graded materials / Zhen-Gong Zhou, Biao Wang // International Journal of Solids and Structures. – 2006. – Vol. 43. – I. 5. – P. 887 – 898.

5. Фроленкова, Л.Ю. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 1. – С. 235 – 259.

6. Витковский, И.В. Адгезионно-диффузионное формирование многослойной стенки жидкометаллического проточного тракта бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – Вып. 7. – С. 117 – 122.

7. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. – 1920. – Vol. 221. – P. 163 – 198.

8. Райзер, Ю.П. Физические основы теории трещин хрупкого разрушения / Ю.П. Райзер // Успехи физических наук. – 1970. – Т. 100. – Вып. 2. – С. 329 – 347.

9. Шоркин, В.С. Неполный контакт тел, находящихся в состоянии адгезии / В.С. Шоркин, Якушина С. И. // Известия ТулГУ, серия《Математика, механика, информатика》. – 2005. – Т. 11. – № 3. – С.147-157.

10. Витковский, И.В. Теоретическая оценка несплошности адгезионного контакта элементов жидкометаллического бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин, С.И. Якушина // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – Вып. 6. – С. 28 – 33.

11. Витковский, И.В. Адгезионно-диффузионное формирование многослойной стенки жидкометаллического проточного тракта бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – Вып. 7. – С. 117 – 122.

12. Преснецова, В.Ю. Вариант учета нелокального взаимодействия частиц среды в рамках локальной теории упругости / В.Ю. Преснецова, С.Н. Ромашин, Сами аль Шатеби, С. И. Якушина// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 4 (307). – С. 3-13.

13. Фроленкова, Л.Ю. Вариант подхода к моделированию линейной упругой среды / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин, С.И. Якушина // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – Вып. 2. – Ч. 2. – С. 284-296.

14. Бабичев А.П. Физические величины: Справочник. / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Якушина Светлана Ивановна
Приокский государственный университет, г. Орел
Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

Ромашин Сергей Николаевич
Приокский государственный университет, г. Орел
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

Преснецова Виктория Юрьевна
Приокский государственный университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

Мосин Юрий Викторович
Приокский государственный университет, г. Орел
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

S.I. YAKUSHINA, S.N. ROMANOV, V.Yu. PRESNETSOVA, Yu.V. MOSIN

CONTACT OF THEORETICAL AND ACTUAL STRENGTH ELASTIC MATERIALS

The theoretical strength of a perfect crystal lattice, which corresponds to the simultaneous breaking of intermolecular bonds, is very high - only ten times less than the Youngs modulus. Strength of real solids is several orders of magnitude smaller. This is linked with the existence of lattice

defects. In the work of the various types of defects are considered only crack.

In this paper we propose a simplified model of the phenomenon of destruction of elastic material, which allows to establish a connection between the theoretical tensile strength and the actual breaking stress. The model is based on the idea that each representative elementary particle continuum elastic medium incorporates the microcrack. Installed in the connection between the theoretical tensile strength and the real destructive voltage calculation results correspond to known concepts and reference data.

Keywords: *elementary representative area, the theoretical tensile strength, the actual breaking stress, the size of microcracks damage.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sedov, L.I. Mekhanika sploshnoy sredy / L.I. Sedov. – M.: Lan. – 2004. – T. 1. – 528 s.

2. Zhirifalko, L. Statisticheskaya fizika tverdogo tela / L. Zhirifalko. – M.: Mir, 1975. – 384 s.

3. Kashtanov, A.V. Energeticheskiy podkhod k opredeleniyu urovnya mgnovennoy povrezhdennosti / A.V. Kashtanov, YU.V. Petrov // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2006. – T. 76. – Vyp. 5. – S. 71 – 75.

4. Zhen-Gong, Zhou Nonlocal theory solution of two collinear cracs in the functionally graded materials / Zhen-Gong Zhou, Biao Wang // International Journal of Solids and Structures. – 2006. – Vol. 43. – I. 5. – P. 887 – 898.

5. Frolenkova, L.YU. Metod vychisleniya poverkhnostnoy energii i energii adgezii uprugikh tel / L.YU. Frolenkova, V.S. Shorkin // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. – 2013. – № 1. – S. 235 – 259.

6. Vitkovskiy, I.V. Adgezionno-diffuzionnoye formirovaniye mnogosloynoy stenki zhidkometallicheskogo protochnogo trakta blanketa termoyadernogo reaktora / I.V. Vitkovskiy, L.YU. Frolenkova, V.S. Shorkin // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2012. – T. 82. – Vyp. 7. – S. 117 – 122.

7. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. – 1920. – Vol. 221. – P. 163 – 198.

8. Rayzer, YU.P. Fizicheskiye osnovy teorii treshchin khrupkogo razrusheniya / YU.P. Rayzer // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 1970. – T. 100. – Vyp. 2. – S. 329 – 347.

9. Shorkin, V.S. Nepolnyy kontakt tel, nakhodyashchikhsya v sostoyanii adgezii / V.S. Shorkin, Yakushina S. I. // Izvestiya TulGU, seriya «Matematika, mekhanika, informatika». – 2005. – T. 11. – № 3. – S.147-157.

10. Vitkovskiy, I.V. Teoreticheskaya otsenka nesploshnosti adgezionnogo kontakta elementov zhidkometallicheskogo blanketa termoyadernogo reaktora / I.V. Vitkovskiy, A.N. Konev, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2007. – T. 77. – Vyp. 6. – S. 28 – 33.

11. Vitkovskiy, I.V. Adgezionno-diffuzionnoye formirovaniye mnogosloynoy stenki zhidkometallicheskogo protochnogo trakta blanketa termoyadernogo reaktora / I.V. Vitkovskiy, L.YU. Frolenkova, V.S. Shorkin // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2012. – T. 82. – Vyp. 7. – S. 117 – 122.

12. Presnetsova, V.YU. Variant ucheta nelokalnogo vzaimodeystviya chastits sredy v ramkakh lokalnoy teorii uprugosti / V.YU. Presnetsova, S.N. Romashin, Sami al Shatebi, S. I. Yakushina// Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 4 (307). – S. 3-13.

13. Frolenkova, L.YU. Variant podkhoda k modelirovaniyu lineynoy uprugoy sredy / L.YU. Frolenkova, V.S. Shorkin, S.I. Yakushina // Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennyye nauki. – 2013. – Vyp. 2. – CH. 2. – S. 284-296.

14. Babichev A.P. Fizicheskiye velichiny: Spravochnik. / A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovskiy i dr. Pod red. Grigoryeva I.S., Meylikhova Ye.Z. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 s.

Yakushina Svetlana Ivanovna
Prioksky State University, Orel
Senior lecturer of the department «Higher Mathematics»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

Romashin Sergey Nikolayevich
Prioksky State University, Orel
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of «Physics»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

Presnetsova Viktoriya Yuryevna
Prioksky State University, Orel
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Information systems»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

Mosin Yuriy Viktorovich
Prioksky State University, Orel
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of «Physics»
E-mail: Jakushina@rambler.ru

УДК 539.375

Э.Г. ШАХБАНДАЕВ

РОСТ ТРЕЩИНЫ С КОНЦЕВЫМИ ПЛАСТИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ В ТРЕХСВЯЗНОЙ КУСОЧНО-ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Решена плоская задача механики упруго-пластического разрушения для многосвязной кусочно-однородной среды, ослабленной одной прямолинейной трещиной с концевыми пластическими зонами. На основе деформационного критерия разрушения получено предельное условие роста трещины в кусочно-однородной среде.

Ключевые слова: *трехсвязная кусочно-однородная среда, прямолинейная трещина с концевыми зонами пластических деформаций, рост трещины.*

Пусть имеется упругая пластина с двумя круговыми отверстиями. В круговые отверстия пластины путем запрессовки вставлены две шайбы в виде круглого кольца из других упругих материалов. Пластина и включения (шайбы) характеризуются соответственно упругими постоянными: $\kappa_1 = (3 - \nu_1)/(1 + \nu_1)$ (ν_1 – коэффициент Пуассона материала пластины); μ_1 – модуль сдвига материала пластины; κ_2, μ_2 и κ_3, μ_3 .Кроме того, считается, что сопрягаемые детали имеют одинаковую толщину и центр тяжести включения не смещаются относительно центра отверстий при посадке, а скачок вектора смещений одинаков по величине во всех контактных точках окружности L_2 и L_4, а их направления совпадают с направлениями радиусов R_2 и R_4 включений.

Область составной пластины состоит из трех частей S_1, S_2, S_3. Область S_1 представляет собой трехсвязную и ограничена извне гладким контуром L_1, а изнутри – двумя несимметрично расположенными круглыми отверстиями. Кроме того, область S_1 ослаблена прямолинейной трещиной длины 2ℓ в центре координат.

Границы круговых отверстий обозначим через L_2 и L_4, а радиусы соответственно через R_2 и R_4 .В отверстия L_2 и L_4 путем запрессовки вставлены круглые включения в виде круглого кольца с внешними радиусами R_2 и R_4 и внутренними – R_3 и R_5 .Область S_2 извне ограничена окружностью L_2, а изнутри – окружностью L_3, а область S_3 извне ограничена окружностью L_4, а изнутри окружностью L_5.

Рассматриваемая пластина подвержена внешней p_1 и внутренней $p_j\ (j = 3, 5)$ нагрузкам.

Начало декартовой системы координат поместим в центре кривой L_1. Высокая концентрация напряжений вблизи вершин трещины в некоторых случаях вызывает разупрочнение материала, окружающего трещину. Это будет проявляться в образовании зон пластического течения. Анализ опытных данных, а также условий равновесия и роста трещин с учетом взаимодействия ее берегов и зон разупрочнения приводит к модели трещины с концевой зоной (зоной предразрушения), в которой имеет место пластическое течение при постоянном напряжении. В ряде исследований рассматриваются модели трещин, в которых принимается, что в концевых зонах, размер которых соизмерим с длиной трещины, имеет место пластическое течение при постоянном напряжении (см. обзор [1], а также [2 – 6]).

Выделим концевые зоны трещины $d_1 = b - \ell$ и $d_2 = \ell - a$, примыкающие к ее вершинам, в которых для материала данной пластины имеет место пластическое течение при постоянном напряжении. Взаимодействие берегов трещины в концевых зонах моделируется путем введения между ее берегами линий пластического скольжения (вырожденных зон пластических деформаций). Размеры концевых зон d_1 и d_2 зависят от вида материала пластины и заранее не известны. Вне концевых зон берега трещины свободны от нагрузок.

На основании комплексных представлений Колосова-Мусхелишвили [7] определение напряженно-деформированного состояния в рассматриваемой кусочно-однородной среде сводится к нахождению аналитических функций $\varphi_j(z)$ и $\psi_j(z)\ \left(j = \overline{1,3}\right)$, соответственно в областях $S_j\ \left(j = \overline{1,3}\right)$ и удовлетворяющих следующим краевым условиям:

$$\varphi_1(t) + t\overline{\varphi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} = -p_1 t + C_1 \qquad \text{на } L_1, \tag{1}$$

$$\varphi_2(t) + t\overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)} = -p_3(t - \ell_1) + C_3 \qquad \text{на } L_3, \tag{2}$$

$$\varphi_3(t) + t\overline{\varphi_3'(t)} + \overline{\psi_3(t)} = -p_5(t + \ell_2) + C_3 \qquad \text{на } L_5, \tag{3}$$

$$\Phi_1(t) + \overline{\Phi_1(t)} + t\overline{\Phi_1'(t)} + \overline{\Psi_1(t)} = \begin{cases} 0 & \textit{на берегах трещины}, \\ \sigma_s & \textit{на берегах концевых зон трещины} \end{cases} \tag{4}$$

$$\varphi_1(t) + t\overline{\varphi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} = \varphi_2(t) + t\overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)} \quad \text{на } L_2, \tag{5}$$

$$\frac{1}{\mu_1}\left[\kappa_1\varphi_1(t) - t\overline{\varphi_1'(t)} - \overline{\psi_1(t)}\right] - \frac{1}{\mu_1}\left[\kappa_2\varphi_2(t) - t\overline{\varphi_2'(t)} - \overline{\psi_2(t)}\right] =$$

$$= 2\delta R_2\left(\frac{t - \ell_1}{R_2}\right) + 2\ell_1\left(\frac{\delta R_2}{R_2}\right) \qquad \text{на } L_2 \tag{6}$$

$$\varphi_1(t) + t\overline{\varphi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} = \varphi_3(t) + t\overline{\varphi_3'(t)} + \overline{\psi_3(t)} \quad \text{на } L_4, \tag{7}$$

$$\frac{1}{\mu_1}\left[\kappa_1\varphi_1(t) - t\overline{\varphi_1'(t)} - \overline{\psi_1(t)}\right] - \frac{1}{\mu_3}\left[\kappa_3\varphi_3(t) - t\overline{\varphi_3'(t)} - \overline{\psi_3(t)}\right] =$$

$$= 2\delta R_4\left(\frac{t + \ell_2}{R_4}\right) - 2\ell_2\left(\frac{\delta R_4}{R_4}\right) \qquad \text{на } L_4, \tag{8}$$

где t – аффикс точки $L_j\ \left(j = \overline{1,5}\right)$;

$C_j\ (j = 1, 3, 5)$ – неизвестные постоянные; одну из них можно фиксировать произвольно, а остальные определяются в ходе решения краевой задачи.

Решение краевой задачи (1) – (8) ищем в виде:

$$\varphi_1(z) = \varphi_{10}(z) + \varphi_{11}(z); \qquad \psi_1(z) = \psi_{10}(z) + \psi_{11}(z); \tag{9}$$

$$\varphi_{10}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k^{(1)}\left(\frac{z}{R_1}\right)^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k^{(1)}\left(\frac{R_2}{z - \ell_1}\right)^k + \sum_{k=1}^{\infty} d_k^{(1)}\left(\frac{R_4}{z + \ell_2}\right)^k; \tag{10}$$

$$\varphi_{11}'(z) = \frac{1}{2\pi}\int_a^b \frac{g(t)dt}{t - z};$$

$$\psi_{11}'(z) = \frac{1}{2\pi}\int_a^b \left[\frac{g(t)}{t - z} - \frac{t\,g(t)}{(t - z)^2}\right]dt, \tag{11}$$

где $g(x) = \dfrac{2\mu_1}{1 + \kappa_1}\dfrac{\partial}{\partial x}\left[\upsilon^+(x, 0) - \upsilon^-(x, 0)\right]$ – искомая функция, характеризующая раскрытие берегов трещины;

$$\varphi_2(z)=\sum_{k=0}^{\infty}a_k^{(2)}\left(\frac{z-\ell_1}{R_2}\right)^k+\sum_{k=1}^{\infty}b_k^{(2)}\left(\frac{R_3}{z-\ell_1}\right)^k, \tag{12}$$

$$\psi_2(z)=\sum_{k=0}^{\infty}A_k^{(2)}\left(\frac{z-\ell_1}{R_2}\right)^k+\sum_{k=1}^{\infty}B_k^{(2)}\left(\frac{R_3}{z-\ell_1}\right)^k,$$

$$\varphi_3(z)=\sum_{k=0}^{\infty}a_k^{(3)}\left(\frac{z+\ell_2}{R_4}\right)^k+\sum_{k=1}^{\infty}b_k^{(3)}\left(\frac{R_5}{z+\ell_2}\right)^k, \tag{13}$$

$$\psi_3(z)=\sum_{k=0}^{\infty}A_k^{(3)}\left(\frac{z+\ell_2}{R_4}\right)^k+\sum_{k=1}^{\infty}B_k^{(3)}\left(\frac{R_5}{z+\ell_2}\right)^k$$

Так как ось абсцисс является осью симметрии составной области *S*, то на основе силовой симметрии коэффициенты разложения $a_k^{(j)}$, $b_k^{(j)}$, $A_k^{(j)}$, $B_k^{(j)}$ $\left(j=\overline{1,3}\right)$ и $d_k^{(1)}$, $D_k^{(1)}$ $\left(k=\overline{1,\infty}\right)$ будут действительными.

Эти коэффициенты и искомая функция $g(t)$ определяются удовлетворением краевым условиям (1) – (8). Подставляя представления (9) – (13) в краевые условия (1) – (8) после некоторых преобразований получим совокупность четырнадцати групп бесконечных систем линейных алгебраических уравнений и одно сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции $g(x)$.

Для построения решения сингулярного интегрального уравнения использовали метод [8 – 10] прямого решения сингулярных интегральных уравнений. Так как напряжения в пластине ограничены, то решение сингулярного интегрального уравнения ищем в классе всюду ограниченных функций. Решение интегрального уравнения представим в виде:

$$g(\eta)=g_0(\eta)\sqrt{1-\eta^2},$$

где $g_0(\eta)$ – новая неизвестная ограниченная функция.

Использование квадратурных формул Чебышева-Гаусса [8 – 10] позволило сингулярное интегральное уравнение свести к системе *M* + 2 алгебраических уравнений. Полученная алгебраическая система из *M* + 2 уравнений, служащая для определения неизвестных $g_0(\tau_1)$, $g_0(\tau_2)\ldots$, $g_0(\tau_M)$ и d_1, d_2, обеспечивает выполнения дополнительного условия, при котором существует единственное решение в классе ограниченных функций (см. Н.И. Мусхелишвили [11, с. 326]).

Из-за неизвестных размеров концевых зон пластического течения объединенная алгебраическая система является нелинейной. Для ее решения использовали метод последовательных приближений [9]. В каждой бесконечной алгебраической системе оставляли семь уравнений, а число чебышевских узлов было принято равным *M* = 20.

В результате численного расчета найдены зависимость длины концевых зон трещины, величина раскрытия противоположных берегов трещины с концевыми зонами от величины параметра нагружения.

Для определения предельно-равновесного состояния составной пластины, при котором происходит рост трещины, использовали критерий критического раскрытия берегов трещины у основания пластических зон:

$$\upsilon^+-\upsilon^-=\delta_c,$$

где υ^+ и υ^- – граничные значения перемещений на верхнем и нижнем берегах трещины соответственно;

δ_c – характеристика трещиностойкости материала пластины.

С помощью полученного решения найдем раскрытие $\upsilon(x,0)$ на берегах концевой зоны трещины:

$$\upsilon(x,0)=-\frac{1+\kappa_1}{2\mu_1}\int_a^x g(x)\,dx$$

Раскрытие берегов концевой зоны при $x=-\ell$ (у основания пластической зоны) будет:

$$\upsilon(x,0)=-\frac{1+\kappa_1}{2\mu_1}\int_a^{-\ell} g(x)\,dx$$

Таким образом, условие, определяющее предельную нагрузку, при которой происходит рост трещины в точке $x=-\ell$, можно представить в виде:

$$-\frac{1+\kappa_1}{2\mu_1}\int_a^{-\ell} g(x)\,dx=\delta_c$$

Используя замену переменной и заменяя интеграл суммой, получим:

$$-\frac{1+\kappa_1}{2\mu_1}\frac{\pi(b-a)}{M}\sum_{m=1}^{M_1} g_0(\tau_m)=\delta_c,$$

где M_1 – число узловых точек в интервале $(a,-\ell)$.

Аналогично записывается предельное условие для точки $x=\ell$.

Совместное решение объединенной алгебраической системы и предельного условия дает возможность определить критическую величину внешней нагрузки и размеры зон пластических деформаций для состояния предельного равновесия, при котором происходит рост трещины в составной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витвицкий, П.М. Пластические деформации в окрестности трещин и критерии разрушения. Обзор / П.М. Витвицкий, В.В. Панасюк, С.Я. Ярема // Проблемы прочности. – 1973. – № 2. – С. 3–19.

2. Мирсалимов, В.М. Предельно равновесное состояние тепловыделяющего перфорированного массива при наличии трещин с пластическими концевыми зонами / В.М. Мирсалимов // Деформация и разрушение материалов. – 2007. –№ 4. – С. 2–9.

3. Мирсалимов, В.М. Предельное равновесие тепловыделяющей среды с периодической системой отверстий и прямолинейных трещин / В.М. Мирсалимов, Э.Г. Шахбандаев // Вестник. ЧПГУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2008. – № 1. – С. 98–107.

4. Шахбандаев, Э.Г. Упругопластическое равновесие тепловыделяющей среды с периодической системой отверстий и трещинами, выходящими на контур отверстий, заполненных линейно-сжимаемой жидкостью / Э.Г. Шахбандаев // Механика. Машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 25–27.

5. Мир-Салим-заде, М.В. Влияние пластических деформаций на рост периодической системы трещин в стрингерных панелях / М.В. Мир-Салим-заде // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 3. – 49–56.

6. Мир-Салим-заде, М.В. Упругопластическое разрушение перфорированной стрингерной пластины / М.В. Мир-Салим-заде // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2012. – № 3. – С. 41–47.

7. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

8. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин – Киев: Наукова думка, 1976. – 443 с.

9. Мирсалимов, В.М. Неодномерные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.

10. Ladopoulos, E.G. Singular integral equations: linear and non-Linear theory and its applications in science and engineering / E.G. Ladopoulos. – Springer, 2000. – 376 p.

11. Мусхелишвили, Н.И. Сингулярные интегральные уравнения / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1968. – 512 с.

ШахбандаевЭльмеддин Гусейн оглы
Институт математики и механики НАН Азербайджана, г. Баку
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
E-mail: mir-vagif@mail.ru

E.G. SHAHBANDAEV

GROWTH OF CRACK WITH END PLASTIC ZONES IN THREE-CONNECTED PIECEWISE HOMOGENEOUS MEDIUM

A plane mechanics problem of elastic-plastic fracture for multiply connected piecewise-homogeneous medium weakened by a rectilinear crack with plastic end zones was solved. On basis of the deformation criterion of fracture limit condition of crack growth in a piecewise-homogeneous medium was obtained.

Keywords: *three-connected piecewise-homogeneous medium, rectilinear crack with end zones of plastic deformation, crack growth.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vitvitskiy, P.M. Plasticheskiye deformatsii v okrestnosti treshchin i kriterii razrusheniya. Obzor / P.M. Vitvitskiy, V.V. Panasyuk, S.YA. Yarema // Problemy prochnosti. – 1973. – № 2. – S. 3–19.

2. Mirsalimov, V.M. Predelno ravnovesnoye sostoyaniye teplovydelyayushchego perforirovannogo massiva pri nalichii treshchin s plasticheskimi kontsevymi zonami / V.M. Mirsalimov // Deformatsiya i razrusheniye materialov. – 2007. –№ 4. – S. 2–9.

3. Mirsalimov, V.M. Predelnoye ravnovesiye teplovydelyayushchey sredy s periodicheskoy sistemoy otverstiy i pryamolineynykh treshchin / V.M. Mirsalimov, E.G. Shakhbandayev // Vestnik. CHPGU im. I.YA. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predelnogo sostoyaniya. – 2008. – № 1. – S. 98–107.

4. Shakhbandayev, E.G. Uprugoplasticheskoye ravnovesiye teplovydelyayushchey sredy s periodicheskoy sistemoy otverstiy i treshchinami, vykhodyashchimi na kontur otverstiy, zapolnennykh lineyno-szhimayemoy zhidkostyu / E.G. Shakhbandayev // Mekhanika. Mashinostroyeniye. – 2008. – № 2. – S. 25–27.

5. Mir-Salim-zade, M.V. Vliyaniye plasticheskikh deformatsiy na rost periodicheskoy sistemy treshchin v stringernykh panelyakh / M.V. Mir-Salim-zade // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 2007. – № 3. – 49–56.

6. Mir-Salim-zade, M.V. Uprugoplasticheskoye razrusheniye perforirovannoy stringernoy plastiny / M.V. Mir-Salim-zade // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 2012. – № 3. – S. 41–47.

7. Muskhelishvili, N.I. Nekotoryye osnovnyye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti / N.I. Muskhelishvili. – M.: Nauka, 1966. – 707 s.

8. Panasyuk, V.V. Raspredeleniye napryazheniy okolo treshchin v plastinakh i obolochkakh / V.V. Panasyuk, M.P. Savruk, A.P. Datsyshin – Kiyev: Naukova dumka, 1976. – 443 s.

9. Mirsalimov, V.M. Neodnomernyye uprugoplasticheskiye zadachi / V.M. Mirsalimov. – M.: Nauka, 1987. – 256 s.

10. Ladopoulos, E.G. Singular integral equations: linear and non-Linear theory and its applications in science and engineering / E.G. Ladopoulos. – Springer, 2000. – 376 p.

11. Muskhelishvili, N.I. Singulyarnyye integralnyye uravneniya / N.I. Muskhelishvili. – M.: Nauka, 1968. – 512 s.

Shahbandaev Elmeddin Huseyn oglu
Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan, Baku
PhD, Senior researcher
E-mail: mir-vagif@mail.ru

УДК 539.374

В.Л. БАРАНОВ, Н.П. СМИРНОВ

ПРОДОЛЬНОЕ ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ И ПОПЕРЕЧНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ СТВОЛОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

Получена полная система квазилинейных дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа, описывающая распространение продольных волн растягивающих напряжений в стволах артиллерийских систем, свойства материалов которых моделируются конституционными уравнениями Малверна–Соколовского–Кристеску, для случаев непрерывной негладкой неоднородности геометрических характеристик поперечных сечений по длине. Сформулирована краевая задача Гурса, соответствующая условиям нагружения стволов давлением пороховых газов при выстреле. Обсуждается влияние геометрической неоднородности стержней, моделирующих стволы, на неоднородность и на нестационарность параметров напряженно–деформированного состояния их материалов.

Ключевые слова: *давление пороховых газов, волны напряжений, конституционные уравнения, упруго–вязкопластический материал, поперечная деструкция.*

Стремление конструкторов стволов артиллерийских систем уменьшить их массово–габаритные характеристики за счет уменьшения толщины стенок в окрестностях плоскости дульного среза приводит, как показывает опыт полигонных испытаний, к возникновению продольных неупругих деформаций и даже к поперечной деструкции материала ствола в зоне плоскости дульного отверстия при выстреле, что недопустимо. Причем, наблюдались, на первый взгляд, парадоксальные ситуации, когда разрушение материала начиналось в некотором поперечном сечении ствола значительно раньше того момента времени, когда этого сечения достигал движущийся по стволу метаемый элемент. Это значит, что материал в сечении еще не был нагружен радиальным давлением пороховых газов – основным внешним силовым фактором, вызывающим разрушение ствола в общепринятом смысле. И все это более вероятно, когда одновременно предпринимались попытки, с одной стороны, уменьшить время достижения давлением пороховых газов в зарядной каморе его максимального значения, с другой, – увеличить амплитудные значения давления [1]. Ниже проведено физическое и математическое моделирование этого недопустимого по условиям эксплуатации явления с позиций механики деформируемого твердого тела.

Ствол моделируется прямолинейным стержнем конечной длины *L,* свойства материала которого описываются конституционными уравнениями Малверна–Соколовского–Кристеску, хорошо известными и широко апробированными для случаев ударного и динамического внешнего нагружения [2]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{1}{E}\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \left[\frac{\sigma - f(\varepsilon)}{\beta(\varepsilon)}\right]^{\alpha(\varepsilon)}, \qquad (1)$$

где $f(\varepsilon)$ – диаграмма квазистатического нагружения материала;

$\alpha(\varepsilon)$, $\beta(\varepsilon)$ – аппроксимирующие функции, характеризующие его вязкопластические свойства;

E – модуль упругости материала.

Момент времени $t = 0$ к затвору и, через его жесткую связь со стволом, – к стволу прикладывается импульс растягивающих напряжений, аппроксимирующий изменение давления пороховых газов в канале ствола при выстреле [3]:

$$\sigma_z(0,t) = a(t + t_*)^b exp(c(t + t_*))\, H(t)\,, \qquad (2)$$

где a, b, c, t_* – константы, определяемые обработкой экспериментальных кривых изменения давления методом наименьших квадратов;

$H(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Наличие разрыва первого рода у функции (2) при $t = 0$ объясняет волновой характер нагружения материала ствола импульсом растягивающих напряжений (скорость распространения волны в материале ствола значительно превышает реальные максимальные скорости движения метаемых элементов, что качественно объясняет возможность возникновения вышеупомянутого раннего начала разрушения материала).

Начальные условия задачи соответствуют первоначально ненапряженному, недеформированному и неподвижному материалу:

$$\sigma_z(z,0) = \varepsilon_z(z,0) = V_z(z,0) = 0 \ , \tag{3}$$

где z — лагранжева координата, совпадающая с продольной осью ствола с началом в точке приложения внешнего импульса давления пороховых газов, которая соответствует зеркальной плоскости затвора.

Ствол является полым, имеет круговое поперечное сечение, образующие его наружной и внутренней поверхностей описываются заданными непрерывными невозрастающими негладкими функциями $y = y_1(z)$ и $y = y_2(z)$ соответственно**.**

Полная система уравнений, описывающая распространение продольных волн растягивающих или сжимающих напряжений в стержне в общем случае, соответствующем упруго–вязкопластической модели материала и геометрической неоднородности стержня, включает в себя уравнение движения материала, уравнение совместности деформаций, конституционное уравнение (1) и является квазилинейной системой трех дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка:

$$\begin{gathered}
\rho[{y_1}^2(z) - {y_2}^2(z)]\frac{\partial V(z,t)}{\partial t} = \\
= \pm 2\left[y_1(z)\frac{dy_1(z)}{dz} - y_2(z)\frac{dy_2(z)}{dz}\right]\sigma(z,t) \pm \\
\pm \frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial z}[{y_1}^2(z) - {y_2}^2(z)] \ , \\
\frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial V(z,t)}{\partial z} \ , \\
\frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t} - \frac{1}{E}\frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial t} = \Phi(\sigma,\varepsilon)H\big(\sigma - f(\varepsilon)\big) \ ,
\end{gathered} \tag{4}$$

где $\Phi(\sigma,\varepsilon)$ – условное обозначение правой части конституционного уравнения (1); знак $(+)$ в правой части уравнения движения соответствует волне растягивающих напряжений, знак $(-)$ – случаю напряжений сжатия (в дальнейшем будет анализироваться первый случай);

$H\big(\sigma - f(\varepsilon)\big)$ – функция Хевисайда, отражающая в данном случае упругий характер разгрузки материала [4];

$f(\varepsilon)$ — функция, аппроксимирующая диаграмму статического нагружения материала.

Система (4) является квазилинейной системой трех дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. Если положить в ней материал стержня линейно упругим, то есть обнулить правую часть уравнения (1) и, соответственно, – последнего уравнения системы (4), и рассматривать стержень геометрически однородным, то есть считать $y_1(z) = const$ и $y_2(z) = const$, то система уравнений (4) вырождается в классическую линейную систему волновых уравнений, имеющую аналитическое решение в форме Даламбера [4]. При этом изменение каждого параметра напряженно–деформированного и кинематического состояний материала стержня во времени в различных поперечных сечениях будут описываться функциями, не зависящими от лагранжевой координаты z.

Рассмотрим менее частный по отношению к предыдущему вариант формулировки волновой задачи, имеющий важное практическое приложение: пусть параметры начальных условий и геометрия нагружаемого торца стержня таковы, что на торце формируется волна упругих напряжений, которая распространяется в геометрически неоднородный стержень ($y_1(z) = const$ и $y_2(z) = const$). При этом упругое состояние материала ограничено сверху,

то есть существуют некоторое предельное напряжение или, в общем случае, некоторое формализованное условие, при превышении или невыполнении которых материал переходит в упруго–вязкопластическое состояние, соответствующее конституционному уравнению (1), а при выполнении некоторых дополнительных условий – разрушается. Наиболее приемлемые и апробированные для широкой группы металлов их сплавов варианты записи уравнений предельного состояния приведены в работах [1, 2].

В этом случае общая система уравнений (4) принимает вновь квазилинейный вид:

$$\begin{gathered}\rho[{y_1}^2(z)-{y_2}^2(z)]\frac{\partial V(z,t)}{\partial t}= \\ =\ 2\left[y_1(z)\frac{dy_1(z)}{dz}-\ y_2(z)\frac{dy_2(z)}{dz}\right]\sigma(z,t)+ \\ +\ \frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial z}[{y_1}^2(z)-{y_2}^2(z)]\ \ , \\ \frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t}=\frac{\partial V(z,t)}{\partial Z}\ \ , \\ \frac{\partial\varepsilon(z,t)}{\partial t}-\frac{1}{E}\frac{\partial\sigma(z,t)}{\partial t}=0\ \ ,\end{gathered} \tag{5}$$

но в процессе ее решения необходимо непрерывно, на каждом шаге численного интегрирования, отслеживать изменение значений напряжений и деформаций в материале и производить сравнение их с критерием предельного состояния, соответствующим выходу материала из зоны упругости. И физической причиной этого перехода в такой постановке задачи будет являться геометрическая неоднородность стержня, что отражает первое слагаемое в правой части уравнения движения. Такая постановка волновой задачи, как показал проведенный анализ, является новой.

Следуя [5], определим, к какому типу дифференциальных уравнений в частных производных относится система (4). Для этого дополним ее тремя соотношениями для полных дифференциалов искомых функций $\sigma(z,t)$, $\varepsilon(z,t)$, $V(z,t)$, в результате чего получим систему шести уравнений, которая по отношению к шести первым частным производным искомых функций будет являться линейной алгебраической. Потребуем ее неопределенности, которая впоследствии позволит найти искомые решения, удовлетворяющие начальным и граничному условиям. Неопределенность линейной алгебраической системы уравнений реализуется, когда ее главный и любой неглавный определители тождественно равны нулю.

Равенство нулю главного определителя системы позволяет получить в дифференциальной форме уравнения характеристических направлений системы (4) в плоскости независимых переменных $z-t$:

$$[{y_1}^2(z)-{y_2}^2(z)]dz\left(dz^2-\frac{E}{\rho}\,dt^2\right)=0\ ,$$

откуда

$$dz_1=0\ ,\quad dz_{2,3}=\pm\sqrt{\frac{E}{\rho}}\,dt\ , \tag{6}$$

где $c=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения продольной волны упругих напряжений в материале стержня.

Таким образом, система уравнений (4) имеет три действительные характеристики, то есть по–прежнему, как и классическая система волновых уравнений, упоминавшаяся выше, является системой гиперболического типа. Следовательно, геометрическая неоднородность стержня не влияет на тип соответствующей ей системы уравнений, что является, как будет показано в дальнейшем, важным практическим обстоятельством, определяющим методологию ее решения.

Приравнивая любой из шести неглавных определителей системы нулю и подставляя последовательно в полученное уравнение дифференциальные уравнения характеристик (6), получаем рабочие уравнения, устанавливающие связь между полными дифференциалами искомых функций вдоль соответствующих характеристических направлений:

– вдоль характеристического направления $dz = 0$:

$$d\varepsilon(z,t) - \frac{1}{E} d\sigma(z,t) = \Phi(\sigma,\varepsilon)\, H\big(\sigma - f(\varepsilon)\big) \quad , \tag{7}$$

– вдоль характеристических направлений $dz = \pm c dt$:

$$\begin{gathered}\sqrt{\frac{\rho}{E}}[{y_1}^2(z) - {y_2}^2(z)]dV(z,t) \mp \\ \mp \frac{[{y_1}^2(z) - {y_2}^2(z)]}{E}\, d\sigma(z,t) = \\ = \pm[{y_1}^2(z) - {y_2}^2(z)]\,\Phi(\sigma,\varepsilon)H\big(\sigma - f(\varepsilon)\big)dt + \\ + \frac{2}{\sqrt{E\rho}}\left[y_1(z)\frac{dy_1(z)}{dz} - y_2(z)\frac{dy_2(z)}{dz}\right]\sigma(z,t)dt \ .\end{gathered} \tag{8}$$

Теперь интегрирование квазилинейной гиперболической системы дифференциальных уравнений в частных производных (4) можно заменить с точностью до линейного преобразования интегрированием систем обыкновенных дифференциальных уравнений (7) – (8), записанных вдоль прямолинейных характеристических направлений (6). Причем, для последней системы с помощью начальных (2) и граничных (3) условий сформулирована краевая задача Гурса [5]. Для ее численного решения разработан и апрбирован программный комплекс Plarit [6].

В случае невыхода параметров волны в процессе распространения по стержню за пределы упругого состояния материала системы уравнений (5) и (7) – (8) видоизменяются, так как в правой части конституционного уравнения обнуляется функция $\Phi(\sigma,\varepsilon)$, описывающая вязкопластические свойства материала. Программный комплекс омплекс [6] позволяет решать и эту задачу.

При этом возможны два полностью исчерпывающих ситуацию качественно различных исхода волнового нагружения и волновой деструкции материала ствола:

– если параметры напряженно–деформированного и кинематического состояний материала в волне, возрастая (последнее вызвано более интенсивным убыванием функции $y_1(z)$ по отношению к функции $y_2(z)$, что характерно для большинства современных конструкций стволов артиллерийских орудий), остаются упругими, но при этом выводят материал за пределы критерия или условия разрушения (эффект скоростного охрупчивания [4]), то потенциально разрушение материала принципиально возможно в зоне его упругого волнового деформирования;

– если параметры напряженно–деформированного и кинематического состояний материала изменяются в волне на участке ее упругого состояния таким образом, что не выводят материал за пределы критерия или условия разрушения, а упругая волна при этом трансформируется в волну упруго–вязкопластических напряжений, то потенциальное разрушение материала ствола принципиально возможно на более удаленном от зарядной каморы участке уже в зоне его неупругого волнового деформирования.

Таким образом, в данной работе сформулирована и доведена до уровня возможности ее практической реализации с помощью программного комплекса [6] актуальная задача прогнозирования последствий продольного волнового нагружения давлением пороховых газов при выстреле стволов артиллерийских и стрелковых систем из упругих и упруго–вязкопластических материалов с геометрической неоднородностью. Это позволяет, рационально изменяя геометрическую неоднородность наружной поверхности ствола (варьируя видом или параметрами функции $y = y_1(z)$), уже на стадиях проектирования и отработки исключать, как недопустимые, неупругие продольные деформации и, тем более, поперечное разрушение материала ствола при выстреле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов, В.Л. Поведение стержневых и оболочечных конструкций из упруго–вязкопластических материалов в условиях высокоскоростного импульсного нагружения / В.Л. Баранов, И.В. Дунаева, И.Б. Литус, В.Л. Руденко и др. – Н.Тагил: НТИИМ. – Тула: ТулГУ, 2013. – 323 с.

2. Баранов, В.Л. Некоторые вопросы проектирования и отработки пуль патронов стрелкового оружия / В.Л. Баранов, М.А. Кудряшов, В.Л. Руденко, Н.П. Смирнов, и др. – Тула: ТулГУ, 2015. – 192 с.

3. Баранов, В.Л. Проблема численной неустойчивости при аппроксимации кривых изменения давления в канале ствола при выстреле методом наименьших квадратов / В.Л. Баранов, В.Л. Руденко // «Известия ТулГУ. Проблемы специального машиностроения». – Тула: ТулГУ. – 2004. – Вып. 7 (часть 1) – С. 27–32.

4. Новацкий, В.С. Волновые задачи теории пластичности / В.С. Новацкий. – М.: Мир, 1978. – 312 с.

5. Березин, И.С. Методы вычислений / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – М: Физматгиз, 1960. – Т. 2. – 620 с.

6. Плахов П.В., Баранов В.Л. Plarit // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (РФ) № 201161 3373 от 29. 04. 2011 г.

Баранов Виктор Леопольдович
Тульский государственный университет, г. Тула
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры стрелково–пушечного вооружения
300012, Тула, проспект Ленина д. 92
Тел. (4872) 35–18–69
E–mail ivts.tulgu@rambler.ru

Смирнов Николай Павлович
ФКП «Нижнетагильский институт испытания металлов» (Уральский боеприпасный полигон), г. Нижний Тагил
Генеральный директор
622015, Нижний Тагил, ул. Гагарина д. 29
Тел. (3435) 47–51–10
E–mail web@ntiim.ru

V.L. BARANOV, N.P. SMIRNOV

LONGITUDINAL AND TRANSVERSE WAVE LOADING DESTRUCTION TRUNKS WHEN FIRED ARTILLERY SYSTEMS

A complete system of quasi–linear differential equations in private derivatives of hyperbolic type describing a diffusion of longitudinal waves of stretching tensions in the artillery systems barrels for the cases of an uninterrupted non–facile non–uniformity of geometric characteristics of cross–sections along the length is proved. Gursas edge problem corresponded to the conditions of barrels loading by the powder gases pressure at a shot is formulated. An influence of geometric non–uniformity of pivots modeling the non–uniformity and on the non–stationarity of the parameters of their materials stretched deformed condition is discussed.

Keywords: *powder gases pressure; waves of tensions; constitutional equation; elastic–ductiloplastic material; cross–destruction.*

BIBLIOGRAPHY

1. Baranov, V.L. Povedeniye sterzhnevykh i obolochechnykh konstruktsiy iz uprugo–vyazkoplasticheskikh materialov v usloviyakh vysokoskorostnogo impulsnogo nagruzheniya / V.L. Baranov, I.V. Dunayeva, I.B. Litus, V.L. Rudenko i dr. – N.Tagil: NTIIM. – Tula: TulGU, 2013. – 323 s.

2. Baranov, V.L. Nekotoryye voprosy proyektirovaniya i otrabotki pul patronov strelkovogo oruzhiya / V.L. Baranov, M.A. Kudryashov, V.L. Rudenko, N.P. Smirnov, i dr. – Tula: TulGU, 2015. – 192 s.

3. Baranov, V.L. Problema chislennoy neustoychivosti pri approksimatsii krivykh izmeneniya davleniya v kanale stvola pri vystrele metodom naimenshikh kvadratov / V.L. Baranov, V.L. Rudenko // «Izvestiya TulGU. Problemy spetsialnogo mashinostroyeniya». – Tula: TulGU. – 2004. – Vyp. 7 (chast 1) – S. 27–32.

4. Novatskiy, V.S. Volnovyye zadachi teorii plastichnosti / V.S. Novatskiy. – M.: Mir, 1978. – 312 s.

5. Berezin, I.S. Metody vychisleniy / I.S. Berezin, N.P. Zhidkov. – M: Fizmatgiz, 1960. – T. 2. – 620 s.

6. Plakhov P.V., Baranov V.L. Plarit // Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM (RF) № 201161 3373 ot 29. 04. 2011 g.

Baranov Viktor Leopoldovich
Tula State University, Tula
Doctor of Technical Sciences, full professor, professor at the department of gun armament
92 Lenin Prospect, Tula, 300012
Phone: (4872) 35–18–69
E–mail: ivts.tulgu@rambler.ru

Smirnov Nicolay Pavlovich
FSE «Nizhny Tagil Institute of Metal Testing (Ural ammunition testing field) «, Nizhny Tagil
General Director (CEO)
29 Gagarin Street, Nizhny Tagil, 622015
Phone: (3435) 47–51–10
E–mail: web@ntiim.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.923

Н.И. ВЕТКАСОВ, О.Г. КРУПЕННИКОВ, С.И. УЛИТИН, Е.С. МОТЛЯХ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫМИ КРУГАМИ

В статье предложена математическая модель силовой напряженности плоского маятникового шлифования периферией композиционного круга с конструктивными элементами в виде радиальных пазов или прорезей, заполненных твердым смазочным материалом. Приведен анализ влияния числа, размеров и материала смазочных элементов (СЭ) композиционного круга на радиальную и тангенциальную составляющие силы шлифования.

Ключевые слова: *плоское маятниковое шлифование, композиционный шлифовальный круг, сила резания, смазочный элемент.*

Повышение технологической эффективности плоского маятникового шлифования периферией композиционного шлифовального круга (КШК) возможно на основе анализа и ранжирования факторов, влияющих на силовую напряженность процесса шлифования, и последующего управляющего воздействия на них. Эффективность управляющего воздействия может быть повышена при наличии информационного обеспечения в виде математических моделей составляющих силы при шлифовании КШК, позволяющих связать выходные параметры – значения радиальной P_y и тангенциальной (касательной) P_z составляющих силы шлифования – с такими входными параметрами, как зернистость и связка КШК, количество и геометрические размеры СЭ, режимы шлифования, физико–механические свойства материала СЭ и заготовки [1 – 3]. Исследования, проведенные с использованием математических моделей, позволят выявить влияющие технологические факторы и определить резерв повышения эффективности процесса плоского шлифования КШК.

Известны эмпирические и аналитические зависимости для расчёта составляющих силы шлифования кругом и силы резания – царапания единичным абразивным зерном, в частности. Чаще всего в справочной литературе составляющие силы шлифования представлены в виде регрессионных зависимостей [4, 5]. Основной недостаток таких эмпирических зависимостей состоит в том, что они являются узкодиапазонными и не устанавливают физических связей между всеми основными параметрами процесса обработки, определяющими составляющие силы шлифования [6, 7].

Значительное влияние на силовую напряженность процесса плоского шлифования оказывает конструкция ШК (стандартные (СК), прерывистые (ПШК) и композиционные (КШК) круги). В связи с этим целесообразно разработать математическую модель силовой напряженности шлифования, которая позволяла бы объективно и всесторонне оценивать влияние различных факторов, в том числе и конструкции круга, на силовые параметры шлифования композиционными кругами.

Известны, например, математические модели для определения радиальной P_y и касательной P_z составляющих силы шлифования СК, представленные в работах В.В. Ефимова [6] и А.Н. Унянина [8]. Следует заметить, что силовые зависимости, полученные авторами, не учитывают дополнительные (силовое и ударное) воздействия, оказываемые на заготовку при её шлифовании ПШК или КШК. Поэтому необходимо внести соответствующие преобразования в известные математические модели для расчета P_y и P_z.

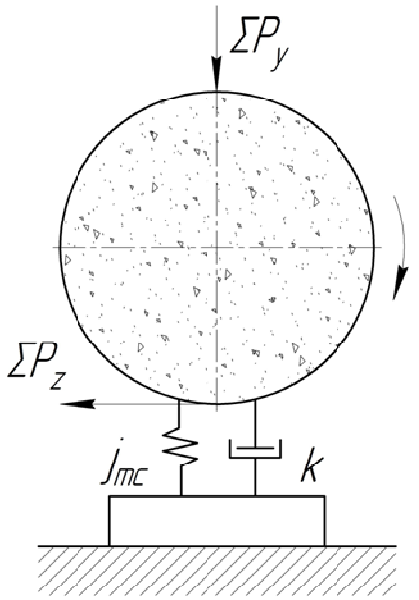


Рисунок 1 – Схема колебательной системы «станок – шлифовальный круг – заготовка – СОЖ»

Для этого представили технологическую систему «станок – шлифовальный круг (ШК) – заготовка – смазочно–охлаждающая жидкость (СОЖ)» в виде линейной системы с одной степенью свободы при наличии сил сопротивления (рисунок 1). При этом сопротивление действию внешних сил ($\sum P_y$ и $\sum P_z$) оказывают жесткость технологической системы $j_{\text{тс}}$ и вязкое сопротивление k [2].

В математической модели, предложенной В.В. Ефимовым [6], сила P_y представлена в виде двух составляющих: механической силы от резания–царапания абразивными зернами (АЗ) и гидродинамической силы от расклинивающего действия технологической среды. Для адаптации данной модели к условиям шлифования КШК выполнили ряд преобразований. В результате получили математическую модель, позволяющую рассчитывать силу P_y для всех рассматриваемых типов ШК (стандартных, прерывистых и композиционных) [1, 2]. При этом ПШК и КШК могут иметь как радиальные пазы, так и прорези. В общем виде данную модель представили следующим образом:

$$P_y = K_{\text{пс}} \cdot \left[P_{y\text{м}} \cdot \left(1 + \frac{S_{\text{сэ}}}{S_{\text{к}}} \right) + P_{y\text{г}} \cdot \left(1 + \frac{H_{\text{сэ}}}{H_{\text{к}}} \right) \right],$$

где $P_{y\text{м}}$ – механическая составляющая радиальной силы резания, Н;

$P_{y\text{г}}$ – гидродинамическая составляющая радиальной силы резания, Н [10];

$K_{\text{пс}}$ – коэффициент передачи силы, определяющий долю силы, передаваемой от ШК заготовке;

$H_{\text{сэ}}$ – высота смазочного элемента на периферии круга, м;

$H_{\text{к}}$ – высота СК, м;

$S_{\text{к}}$ – площадь периферии СК, м^2;

$S_{\text{сэ}}$ – площадь периферии круга, занимаемая смазочными элементами, м^2:

$$S_{\text{сэ}} = N_{\text{сэ}} \cdot L_{\text{сэ}} \cdot H_{\text{сэ}},$$

где $N_{\text{сэ}}$ – число СЭ в КШК, шт.;

$L_{\text{сэ}}$ – длина СЭ по периферии КШК, м.

Итоговая зависимость после всех преобразований [2] имеет следующий вид:

$$P_y = \left[\mu_{\text{д}} \cdot \sqrt{1 + \left(2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{p^2} \right)^2} \right] \cdot \left[\frac{\pi \cdot \sigma_{\text{т}} \cdot \xi^{\lambda} \cdot C \cdot Z_{\text{к}}}{8} \cdot \left(1 + \frac{S_{\text{сэ}}}{S_{\text{к}}} \right) + \frac{\alpha \cdot \mu_{\text{сотс}} \cdot V_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}} \cdot H \cdot K_{\text{пр}}}{\Delta_0} \cdot \left(1 + \frac{H_{\text{сэ}}}{H_{\text{к}}} \right) \right], \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести материала заготовки, Н/мм^2;

ξ – коэффициент усадки стружки (при шлифовании ξ = 1,1 – 2,0);

λ – показатель политропы сжатия (при шлифовании λ = 1,25);

C – параметр, определяющий геометрические характеристики участвующих в шлифовании АЗ, мм^2;

$Z_{\text{к}}$ – число АЗ, одновременно контактирующих с заготовкой, шт;

α – эмпирический коэффициент (α= 1,5 – 2,5);

$\mu_{сотс}$ – динамическая вязкость смазочно–охлаждающего технологического средства (СОТС), Па·с;

$V_к$ – окружная скорость ШК, м/с;

$R_к$ – радиус ШК, мм;

$K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий применимость гидродинамической теории смазки к процессу шлифования ($K_{пр}$ = 0,6);

Δ_0 – минимальный зазор в контакте «ШК – заготовка» при подведении круга до касания с поверхностью заготовки, мм;

$\mu_д$ – коэффициент динамичности;

ω – угловая частота колебаний ШК, $с^{-1}$;

p – собственная частота колебаний ШК, $с^{-1}$;

n – коэффициент демпфирования, $с^{-1}$:

$$n = \frac{K}{2 \cdot m} \ ,$$

где K – коэффициент сопротивления, Н·с/м;

m – масса ШК, кг.

В свою очередь, коэффициент сопротивления K можно вычислить по формуле:

$$K = \frac{P_y}{V_д} \ ,$$

где $V_д$ – скорость демпфирования, м/с.

При этом значения коэффициента сопротивления для ШК на керамической $K_{кер}$, металлической или вулканитовой $K_{мет,вулк}$ связках будут различны. Это связано с тем, что скорость демпфирования $V_д$ при шлифовании кругами на рассматриваемых связках понимается по–разному. Если ШК имеет керамическую связку, которая представляет собой стекловидную или фарфороподобную массу, то под скоростью демпфирования $V_д$ понимают скорость фильтрации СОЖ через поры круга. Если ШК имеет металлическую или вулканитовую связку, которые представляют собой твердую и эластичную массу с небольшой пористостью, тогда $V_д$ – это скорость прохождения СОЖ сквозь межзеренное пространство. Зависимости для определения коэффициента сопротивления K имеют следующий вид:

$$K_{кер} = \frac{L_к \cdot \mu_{сотс} \cdot K_п \cdot S_к}{K_{прон}} \ ; \ K_{мет,вулк} = \frac{L_к \cdot \mu_{сотс} \cdot S_к}{1 - K_\nu} \ ,$$

где $L_к$ – длина дуги контакта круга с заготовкой, мм;

$K_п$ – коэффициент пористости ШК;

$S_к$ – площадь контакта ШК с заготовкой, $м^2$;

$K_{прон}$ – коэффициент проницаемости, $м^2$:

$$K_{прон} = \frac{r_п^2}{8} \ ,$$

где $r_п$ – радиус пор, м.

K_ν – коэффициент, учитывающий объем, занимаемый абразивными зернами, выступающими из связки, $м^2$:

$$K_\nu = 1 - K_{прон} \, .$$

А.Н. Унянин, исследуя шлифование заготовок СК, представил в работе [8] силу P_z в виде суммы соответствующих составляющих от всех зерен, контактирующих с заготовкой:

$$P_z = P_{z\text{р}} + P_{z\text{д}} ,$$

где $P_{z\text{р}}$ и $P_{z\text{д}}$ – составляющие силы соответственно от режущих и пластически деформирующих зерен, Н.

При этом каждая из составляющих сил $P_{z\text{р}1}$ и $P_{z\text{д}}$ имеет по два слагаемых [8]:

$$P_{z\text{р}} = P_{z\text{р}1} + P_{z\text{р}2} \ ; \ P_{z\text{д}} = P_{z\text{д}1} + P_{z\text{д}2} ,$$

где $P_{z\text{р}1}$ – сила, обусловленная микрорезанием материала заготовки, Н;

$P_{z\text{р}2}$ – сила трения режущих АЗ о заготовку, Н;

$P_{z\text{д}1}$ – сила, обусловленная пластическим деформированием материала заготовки, Н;

$P_{z\text{д}2}$ – сила трения пластически деформирующих АЗ о заготовку, Н.

Таким образом, получаем:

$$P_z = P_{z\text{р}1} + P_{z\text{р}2} + P_{z\text{д}1} + P_{z\text{д}2}$$

Окончательная зависимость для определения силы P_z после адаптации математической модели А.Н. Унянина к условиям процесса шлифования КШК, проведенной авторами, и всех вычислений и преобразований, выполненных в [8], имеет следующий вид:

$$P_z = B_\text{д} \cdot \left(\mu_0 \cdot \sin\gamma + \cos\gamma\right) \cdot l_\text{к} \cdot a_\text{кр} \cdot \left(\frac{a_\text{кр}^2}{3} - h_\text{идср}^2\right) + \mu_0 \cdot c \cdot \sigma_\text{т} \cdot D_\text{д} \cdot l_\text{к} \cdot a_\text{кр} + \tau_s \cdot B_\text{р} \cdot D \times$$

$$\times D_\text{р} \cdot \tau_s \cdot \mu_0 \cdot \left(h_\text{и} \cdot l_\text{к} + \frac{A \cdot l_\text{к}^2}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{S_\text{сэ}}{S_\text{к}}\right) \cdot K_\text{пс} , \qquad (2)$$

где τ_s – напряжение сдвига при микрорезании зерном материала заготовки, Па;

μ_0 – коэффициент трения АЗ о заготовку;

$h_\text{и}$ – суммарная величина скалывания зерен при правке и размерного износа ШК, м;

$l_\text{к}$ – длина дуги контакта ШК и заготовки, м;

γ – половина угла при вершине АЗ, град;

c – коэффициент [8];

$a_\text{кр}$ – критическая глубина микрорезания, м;

$h_\text{идср}$ – износ АЗ, осуществляющих пластическое деформирование, м;

D, $B_\text{р}$, A, $D_\text{р}$, $B_\text{д}$, $D_\text{д}$ – составляющие зависимости [8]:

$$D = 2 \cdot h_\text{и}^2 \cdot C_\text{р} \cdot l_\text{к} + \left(6 \cdot h_\text{и} \cdot C_\text{р} + 7 \cdot h_\text{и}^2 + C_\text{р}^2\right) \cdot A \cdot \frac{l_\text{к}^2}{2} + h_\text{и} \cdot C_\text{р}^2 \cdot l_\text{к} + \left(h_\text{и} + C_\text{р}\right) \cdot h_\text{и}^2 \cdot l_\text{к} + \frac{h_\text{и}^3 \cdot l_\text{к}}{3} \ ;$$

$$B_\text{р} = \text{tg}\gamma \cdot n_\text{зк1} \cdot c_\text{к} \ ; \ A = \frac{V_{s\text{пр}} \cdot \sin\alpha_\text{max} \cdot l_m}{\pi \cdot D_\text{к} \cdot n_\text{к} \cdot l_\text{к}} \ ; D_\text{р} = \frac{\pi \cdot l_{2\text{р}}^2 \cdot k_z \cdot n_\text{зк1} \cdot c_\text{к}}{12 \cdot \mu_s} \ ; \ B_\text{д} = \frac{c \cdot \sigma_\text{т} \cdot n_\text{зк1} \cdot c_\text{к} \cdot \text{tg}\gamma}{2} ;$$

$$D_\text{д} = \frac{k_z \cdot \pi \cdot l_{2\text{д}}^2 \cdot n_\text{зк} \cdot c_\text{к}}{12} ,$$

где $n_\text{зк1}$ – число зерен на поверхности ШК в сечении его плоскостью, параллельной оси круга, $1/\text{м}^2$;

$c_\text{к}$ – коэффициент [8];

$V_{s\text{пр}}$ – скорость продольной подачи, м/с;

α_{max} – угол, соответствующий длине дуги контакта АЗ с заготовкой, град;

l_m – среднее расстояние между режущими АЗ, м;

$D_к$ – диаметр ШК, м;

$n_к$ – частота вращения ШК, 1/с;

$l_{2р}$ – размер площадки затупления режущего АЗ, м;

$l_{2д}$ – размер площадки затупления пластически деформирующего АЗ, м;

$n_{зк}$ – число зерен на поверхности круга, ограниченной размерами контактной зоны;

$n_{зк1}$ – число зерен на поверхности круга в сечении его плоскостью, параллельной оси круга;

k_z – коэффициент, определяемый по формуле [6]:

$$k_z = \frac{\sin(\beta+\varphi_s)}{\sin(\beta)\cdot\sin(\varphi_s)},$$

где β – угол сдвига при диспергировании материала налипа, град.;

φ_s – угол внутреннего трения, град.

Для выявления влияния характеристики абразивной части КШК, количества и размеров его конструктивных элементов для размещения ТСМ, состава последнего и режимов обработки на силовую напряженность процесса шлифования на основании разработанных математических моделей [1] и [2] провели компьютерное моделирование процесса плоского маятникового шлифования образцов из сталей разных групп обрабатываемости КШК с различными характеристиками.

При моделировании в качестве выходных параметров оценки технологической эффективности шлифования КШК использовали показатели силовой напряженности:

1) радиальная составляющая силы резания P_y, Н;

2) тангенциальная составляющая силы резания P_z, Н.

Входными параметрами моделирования варьировали следующим образом [1, 3]:

1. Материал заготовки – сталь 45; Р6М5; 08Х18Н9Т;
2. Зернистость КШК – F60; F90 мкм;
3. Связка КШК – керамическая; бакелитовая;
4. Материал СЭ (таблица 1);
5. Число СЭ в КШК $N_{сэ}$ = 8; 16; 24 шт;
6. Длина СЭ по периферии $L_{сэ}$ = 8; 16; 24 мм;
7. Требуемая шероховатость обработанной поверхности по параметру *Ra* = 0,2; 0,4; 0,63; 0,8; 1,6 мкм;
8. Врезная подача S_{2x} = 0,002; 0,004; 0,008 мм/дв. ход;
9. Припуск, снимаемый при шлифовании с врезной подачей, *Z* = 0,02; 0,04; 0,08 мм.

Таблица 1 – Номенклатура ТСМ для проведения исследований

ОБОЗНАЧЕНИЕ ТСМ	СВЯЗУЮЩЕЕ	НАПОЛНИТЕЛЬ	$\mu_{тр}$
ТСМ1	Фенольные смолы	Нитрид бора	0,148
ТСМ2		Иодид кадмия	0,088
ТСМ3	Фенолэпоксидная смола	Дисульфид молибдена	0,063
ТСМ4	Фенолалкиды		0,074
ТСМ5	ЛИТОЛ–24 + омедненный графит [9]		0,030

Анализируя значительный объем результатов проведенных численных исследований и результаты технологической эффективности применения различных кругов, можно отметить, что по параметрам силовой напряженности КШК, в основном, занимает

промежуточное положение относительно СК и ПШК для радиальной силы P_y и превосходит данные круги в случае касательной силы P_z (рисунки 2, 3).

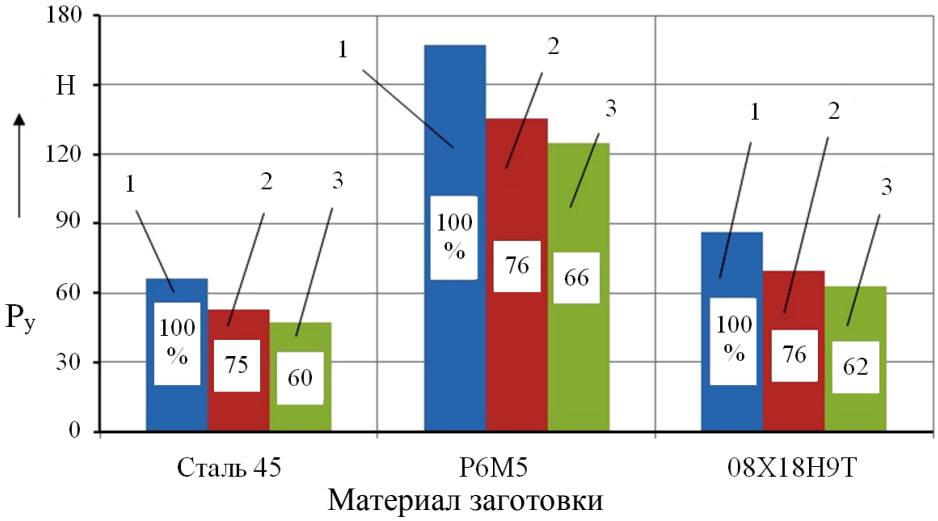


Рисунок 2 – Зависимость радиальной P_y составляющей силы шлифования при переходе на выхаживание от вида ШК:
1, 2, 3 – соответственно ПШК, КШК, СК; круг – 1 – 250´20´76 24А F90 К 7 В; $N_{сэ}$ = 24; $L_{сэ}$ = 10 мм; материал СЭ – ТСМ4; $V_з$ = 8 м/мин; S_{2x} = 0,004 мм/дв. ход

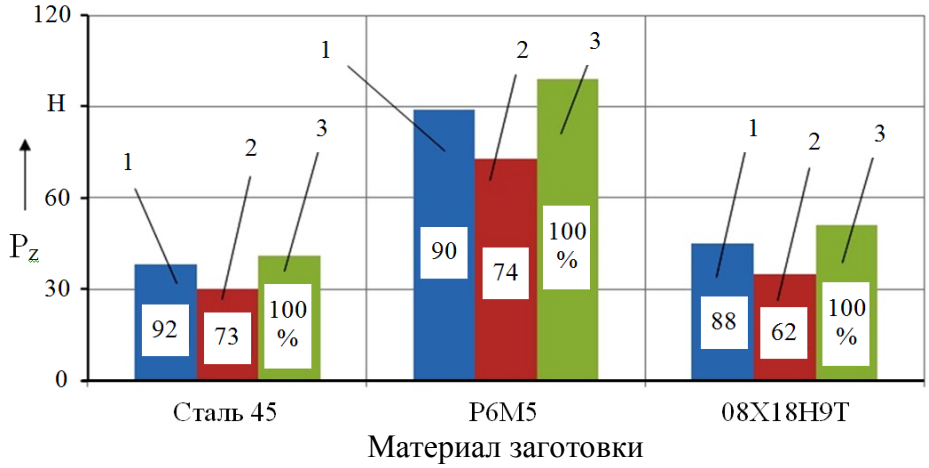


Рисунок 3 – Зависимость касательной P_z составляющей силы шлифования при переходе на выхаживание от вида ШК:
условия см. в надписи к рисунку 2

Как показывает анализ полученных данных путем грамотного подбора состава ТСМ и конструктивных параметров КШК можно уменьшить составляющую силы шлифования КШК P_y до уровня СК и даже превзойти его (рисунки 4, 5).

Это связано со следующими особенностями шлифования КШК:

1) благодаря наличию СЭ КШК по сравнению с СК обеспечивают гарантированное проникновение ТСМ в зону резания. Реализация ТСМ своих функций в контактной зоне способствует уменьшению коэффициента трения $\mu_{тр}$ взаимодействующих поверхностей круга и заготовки;

2) заполнение ТСМ конструктивных элементов КШК благоприятно сказывается на работе данных кругов в присутствии СОЖ.

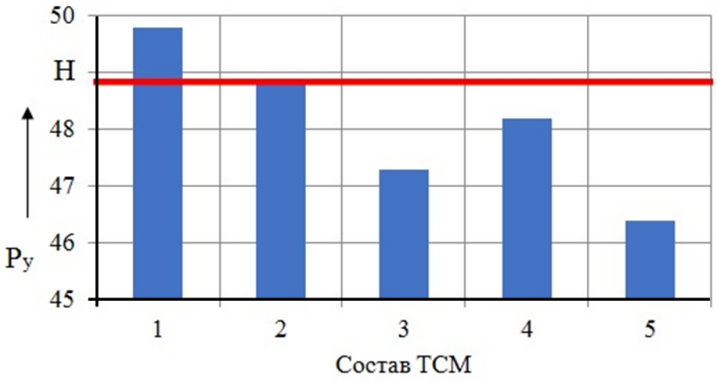


Рисунок 4 – Значение радиальной P_y составляющей силы шлифования при переходе на выхаживание в зависимости от материала СЭ КШК:
1 – 5 – КШК со СЭ, заполненными соответственно ТСМ1–ТСМ5 (таблица 1); красная линия – P_y шлифования СК при аналогичных условиях; материал заготовки – сталь Р6М5; круг – 1 – 250´20´76 24А F90 К 7 V; $N_{СЭ}$ = 8; $L_{СЭ}$ = 10 мм; $V_З$ = 8 м/мин; врезная подача S_{2X} = 0,002 мм/дв. ход

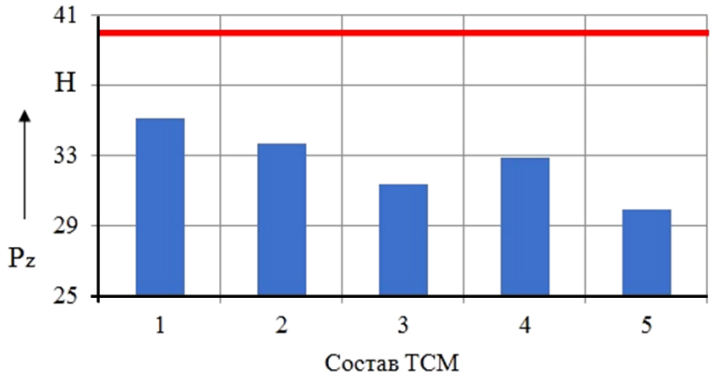


Рисунок 5 – Значение касательной P_z составляющей силы шлифования при переходе на выхаживание в зависимости от материала СЭ КШК:
красная линия – P_z при переходе на выхаживание для шлифования СК при аналогичных условиях (см. в надписи к рисунку 4)

В ходе моделирования рассматривали трехэтапный цикл плоского маятникового шлифования, рабочий часть которого включала в себя два этапа: шлифование и выхаживание [1 – 3].

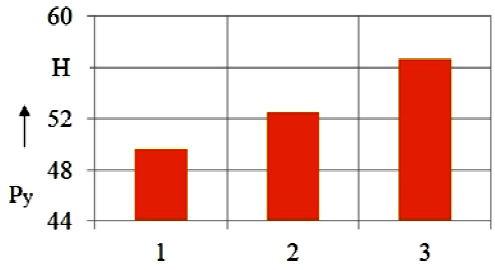


Рисунок 6 – Зависимость радиальной P_y составляющей силы шлифования от $L_{СЭ}$:
1-3 – соответственно $L_{СЭ}$ = 8; 16; 24 мм; материал заготовки – 08Х18Н9Т; $N_{СЭ}$ = 16; круг – 24А F90 К 7 V; материал СЭ – ТСМ1 (таблица 1); остальные условия см. в надписи к рисунку 4

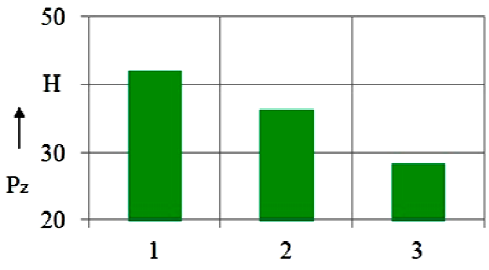


Рисунок 7 – Зависимость касательной P_z составляющей силы шлифования от $N_{СЭ}$:
1-3 – соответственно $N_{СЭ}$ = 8; 16; 24 шт; $L_{СЭ}$ = 10 мм; остальные условия см. в надписи к рисункам 4, 6

Исследуя возможность повышения технологической эффективности шлифования КШК за счет изменения его конструкции, провели серию опытов, варьируя поочередно числом СЭ в КШК $N_{\text{сэ}}$ и их длиной по периферии $L_{\text{сэ}}$ (рисунки 6, 7).

При этом остальные условия (характеристика ШК, материал заготовки, врезная подача и др.) принимали постоянными.

В настоящее время коллективом авторов ведется работа по получению математической модели теплосиловой напряженности процесса плоского шлифования периферией КШК с радиальными пазами и прорезями.

Заключение.

1. Разработанные математические модели (1) и (2) позволяют рассчитать значения соответственно радиальной P_y и тангенциальной (касательной) P_z составляющих силы резания при шлифовании заготовок СК, ПШК или КШК на керамической, металлической или вулканитовой связках. При этом существует возможность изменения конструктивных параметров КШК и материала СЭ в целях поиска такого их сочетания, которое обеспечит максимальное повышение технологической эффективности процесса шлифования композиционными кругами.

2. В ходе численных исследований при компьютерном моделировании выявлена различная степень влияния исследуемых параметров моделирования на силовую напряженность процесса шлифования КШК. Показано, что варьированием числа и геометрических размеров СЭ можно достигнуть изменения силы P_y до 15 %, а силы P_z – до 35 %. Варьированием материала СЭ показало его незначительное влияние на силовую напряженность шлифования КШК (P_y и P_z уменьшаются в среднем на 5 %).

3. В ходе анализа результатов компьютерного моделирования установлено, что грамотный подбор материала и конструкции СЭ и КШК обеспечивает заметное повышение эффективности применения композиционных кругов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веткасов, Н.И. Исследование процесса шлифования композиционными кругами / Веткасов Н.И., Крупенников О.Г., Улитин С.И. // Сборник статей «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь – 2015»: Материалы Международной научно–технической конференции. 14–15 сентября 2015 г. – Севастополь ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». – 2015. – С. 15 – 22.

2. Крупенников, О.Г. Разработка математической модели силовой напряженности процесса шлифования заготовок абразивными кругами / Крупенников О.Г., Улитин С.И. // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. науч. тр. I международной заочной научно–технической конференции, под ред. В.И. Гузеева и А.А. Дьяконова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2014. – С. 551 – 555.

3. Крупенников, О.Г. Исследование влияния конструкций смазочных элементов и композиционного шлифовального круга на производительность процесса шлифования / Крупенников О.Г., Улитин С.И. // Символ науки: международный научный журнал, под ред. Агафоновой Е.В. – Уфа: редакционно–издательский отдел ООО «ОМЕГА САЙНС». – 2015. – С. 42 – 44.

4. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

5. Маслов, Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

6. Ефимов, В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ / В.В. Ефимов. – Саратов: изд–во Сарат. ун–та, 1992. – 132 с.

7. Худобин, Л.В. Шлифование композиционными кругами / Л.В. Худобин, Н.И. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 256 с.

8. Унянин, А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов. Дисс. … д–р. техн. наук: 05.03.01 / Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 503 с.

9. Мельников, В.Г. Исследование триботехнических свойств пластичных смазочных материалов, наполненных порошками твердых смазок / В.Г. Мельников, Х.А. Аль–Сабти // Совеременные наукоемкие материалы. – Иваново: ИГХТУ. – 2007. – № 4. – С. 62 – 67.

10. Худобин, Л.В. Шлифование заготовок из коррозионностойких сталей с применением СОЖ / Л.В. Худобин, М.А. Белов. – Саратов: Изд. Сарат. унив., 1989. – 148 с.

Веткасов Николай Иванович
Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), г. Ульяновск
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
E–mail: nppwt@ulstu.ru

Крупенников Олег Геннадьевич
Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), г. Ульяновск
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
E–mail: krupennikov_oleg@mail.ru

Улитин Сергей Игоревич
Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), г. Ульяновск
аспирант кафедры «Технология машиностроения»
E–mail: ulitinserega91@mail.ru

Мотлях Екатерина Сергеевна
Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), г. Ульяновск
магистрант кафедры «Технология машиностроения»
E–mail: motlyakh1993@mail.ru

N.I. VETKASOV, O.G. KRUPENNIKOV, S.I. ULITIN, Ye.S. MOTLYAKH

MODELING OF POWER TENSION SURFACE GRINDING COMPOSITE COMMUNITY

The article proposes mathematical model of power intensity of flat pendular grinding by the periphery of composite wheel with constructive elements in the form of the radial grooves or cuts filled with solid lubricant. The analysis of influence of number, the sizes and material of the lubricant elements (LE) of a composite wheel on radial and the tangential components of the grinding force is provided.

Keywords: *flat pendular grinding, composite grinding wheel, cutting force, lubricant element.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vetkasov, N.I. Issledovaniye protsessa shlifovaniya kompozitsionnymi krugami / Vetkasov N.I., Krupennikov O.G., Ulitin S.I. // Sbornik statey «Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii. Sevastopol – 2015»: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii. 14–15 sentyabrya 2015 g. – Sevastopol FGAOU VO «Sevastopolskiy gosudarstvennyy universitet». – 2015. – S. 15 – 22.

2. Krupennikov, O.G. Razrabotka matematicheskoy modeli silovoy napryazhennosti protsessa shlifovaniya zagotovok abrazivnymi krugami / Krupennikov O.G., Ulitin S.I. // Tekhnologicheskoye obespecheniye mashinostroitelnykh proizvodstv: sb. nauch. tr. I mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno–tekhnicheskoy konferentsii, pod red. V.I. Guzeyeva i A.A. Dyakonova. – Chelyabinsk: Izdatelskiy tsentr YUUrGU. – 2014. – S. 551 – 555.

3. Krupennikov, O.G. Issledovaniye vliyaniya konstruktsiy smazochnykh elementov i kompozitsionnogo shlifovalnogo kruga na proizvoditelnost protsessa shlifovaniya / Krupennikov O.G., Ulitin S.I. // Simvol nauki: mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal, pod red. Agafonovoy Ye.V. – Ufa: redaktsionno–izdatelskiy otdel OOO «OMEGA SAYNS». – 2015. – S. 42 – 44.

4. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov: spravochnik / Pod red. A.N. Reznikova. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 391 s.

5. Maslov, Ye.N. Teoriya shlifovaniya metallov / Ye.N. Maslov. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 320 s.

6. Yefimov, V.V. Model protsessa shlifovaniya s primeneniyem SOZH / V.V. Yefimov. – Saratov: izd–vo Sarat. un–ta, 1992. – 132 s.

7. Khudobin, L.V. Shlifovaniye kompozitsionnymi krugami / L.V. Khudobin, N.I. Vetkasov. – Ulyanovsk: UlGTU, 2004. – 256 s.

8. Unyanin, A.N. Nauchnoye i tekhnologicheskoye obespecheniye shlifovaniya zagotovok iz plastichnykh staley i splavov s predotvrashcheniyem zasalivaniya abrazivnykh krugov. Diss. … d–r. tekhn. nauk: 05.03.01 / Ulyanovsk: UlGTU, 2006. – 503 s.

9. Melnikov, V.G. Issledovaniye tribotekhnicheskikh svoystv plastichnykh smazochnykh materialov, napolnennykh poroshkami tverdykh smazok / V.G. Melnikov, KH.A. Al–Sabti // Soveremennyye naukoyemkiye materialy. – Ivanovo: IGKHTU. – 2007. – № 4. – S. 62 – 67.

10. Khudobin, L.V. Shlifovaniye zagotovok iz korrozionnostoykikh staley s primeneniyem SOZH / L.V. Khudobin, M.A. Belov. – Saratov: Izd. Sarat. univ., 1989. – 148 s.

Vetkasov Nikolay Ivanovich
Ulyanovsk State Technical University (UlSTU) Ulyanovsk
Doctor of Technical Sciences, Head of Department «Mechanical Engineering»
E-mail: nppwt@ulstu.ru

Krupennikov Oleg Gennadyevich
Ulyanovsk State Technical University (UlSTU) Ulyanovsk
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor «Mechanical Engineering»
E-mail: krupennikov_oleg@mail.ru

Ulitin Sergey Igorevich
Ulyanovsk State Technical University (UlSTU) Ulyanovsk
graduate student of «Mechanical Engineering»
E-mail: ulitinserega91@mail.ru

Motlyakh Yekaterina Sergeyevna
lyanovsk State Technical University (UlSTU) Ulyanovsk
graduate student of the department «Mechanical Engineering»
E-mail: motlyakh1993@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 546.26–162:620.22–419.8

Н.Т. КАРТЕЛЬ, А.А. БОЧЕЧКА, В.И. ЛАВРИНЕНКО, В.Г. ПОЛТОРАЦКИЙ, А.А. ДЕВИЦКИЙ, О.В. ЛЕЩЕНКО, В.А. БИЛОЧЕНКО, А.Н. ПАНОВА, Г.С. ГРИЩЕНКО, В.С. ШАМРАЕВА, Ю.П. УЩАПОВСКИЙ, А.В. СМИРНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА, B_4C, CBN, СТРУКТУИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНОЙ СВЯЗКОЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

Представлены результаты рентгено– и дериватографических исследований композиционного материала на основе синтетического алмаза, карбида и кубического нитрида бора, созданного газофазным методом при низких давлениях. Показано наличие соединения $B_{13}C_2$ – икосаэдрического субкарбида бора. Испытания композиционного материала в инструменте показали повышение работоспособности инструмента: шлифовальных кругов – в 1,7–2,0 раза – за счет стойкости к нагреву термостабильных соединений $B_{13}C_2$ и cBN, шлифовальных паст – в 1,7–1,9 раза.

Ключевые слова: *алмаз, карбид бора, икосаэдрический субкарбид бора, кубический нитрид бора, компакты, композиционный порошок, рентгенография, дериватография, шлифовальный инструмент.*

В целях создания инструментального абразивного композиционного материала на основе синтетического алмаза, карбида и кубического нитрида бора, обладающего повышенной термостойкостью, предназначенного для шлифовального инструмента и паст, были проведены исследования по определению термохимических и эксплуатационных свойств порошков композиционных материалов, полученных методом физико–химического синтеза при низких давлениях [1–3].

Рентгенографический и термогравиметрический методы исследования материала, являющиеся одними из наиболее точных методов анализа, позволили определить наличие в композиционном материале икосаэдрического субкарбида бора $B_{13}C_2$ и оксида бора B_2O_3, наряду с имеющимся кубическим нитридом бора cBN.

Наличие в составе композиционного материала синтетического алмаза, кубического нитрида бора и карбида бора B_4C в виде икосаэдров субкарбида бора $B_{12}C_2$ и $B_{13}C_2$, которые являются основными структурными блоками аллотропных модификаций элементарного бора, обусловливает необычное сочетание физических свойств материала: низкой плотности, высокой твердости и термостойкости, что открывает интересные перспективы создания новых сверхтвердых и несжимаемых материалов [4–10].

Объект исследования.

Образцы композиционного материала (компакты) были получены газофазным методом при низких давлениях [1] из смесей, состоящих из:

- порошка синтетических алмазов марки АС6 125/100;
- порошка карбида бора марки F120 (зернистость 125/100);
- микропорошка кубического нитрида бора (кубонита) марки КМ 3/2.

Порошок алмазный синтетический соответствует ДСТУ 3292–95, порошок кубического нитрида бора соответствует ТУ У 88.090.018–96; порошок карбида бора соответствует стандарту FEPA, химический состав карбида бора F120 (125/100): B_4C – 96 %, B_2O_3 – 0,2 %, остальное – примеси (Si, Fe, N).

Состав синтезированных композиционных материалов (компактов) и порошков, изготовленных из них, приведен в таблице 1.

Методика исследования.

Стойкость образцов к термоокислению на воздухе исследовали дериватографическим методом на дериватографе Q–1500D (МОМ, Венгрия) в интервале температур 20–1000ºС с линейной скоростью нагрева 10ºС/мин.

Таблица 1 – Состав исследуемых образцов

№ обр.	Материал
1	Компакт из смеси: алмаз АС6 125/100 – 50%, карбид бора 125/100 – 35%, кубический нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 15%
2	Образец 1 после термообработки при температуре 900ºС в течение 20 мин на воздухе
3	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 1
4	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 2
5	Компакт из смеси: кубический нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 85% алмаз АС6 125/100 – 15% (без карбида бора)
6	Кубический нитрид бора (cBN)

Фазовый состав образцов до и после термообработки исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ДРОН–4–07 в отфильтрованном излучении CuK_α линии анода (λ=0,15418 нм) в интервале углов дифракции 2θ 10–100 град.

Исследование процесса шлифования инструментальных материалов кругами с композиционным материалом в абразивном слое проводили на стенде, созданном на базе модернизированного универсально–заточного станка модели 3В642.

При исследовании эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов определяли следующие показатели:

- режущую способность кругов Q, мм^3/мин (производительность шлифования);
- относительный расход СТМ в кругах q_p, мг/г (относительный расход – отношение массы израсходованных СТМ к массе снятого материала – согласно ГОСТ 16181–82).

При исследовании измеряли напряженность электростатического поля шлама: бесконтактно, прибором – измерителем параметров электростатического поля ИПЭП–1 (Республика Беларусь), устанавливаемым на постоянном расстоянии до измеряемого объекта, на котором накапливаются заряды.

Результаты исследований

Термогравиметрические кривые (ТГ) окисления образцов синтезированных композиционных материалов (компактов) показаны на рисунке 1.

Для образцов № 1, № 3 и № 6 (мономатериал – cBN) характерно увеличение массы при окислении за счет образования оксида бора B_2O_3 [2, 3]. Синтезированные композиционные материалы (образцы № 1, № 3, № 5) являются менее термостойкими, чем исходный материал cBN (образец № 6). Температура начала окисления образцов № 1 и № 3 – 700ºС, тогда как cBN – 890ºС. Это обусловлено тем, что другие составляющие композиционных компактов имеют более низкую температуру начала окисления и меньшую энергию активации. Соответственно, их термическое разрушение может привести к внутреннему перегреванию образцов, и, как следствие, понизить температуру начала окисления, повысить скорость этого процесса. На термо–гравиметрической кривой температура начала окисления образца № 5 – 600ºС. Но при достижении температуры 790ºС

изменения массы этого образца не наблюдается – вследствие уравнивания скоростей окисления алмаза (образование летучих веществ) и cBN (образование B_2O_3).

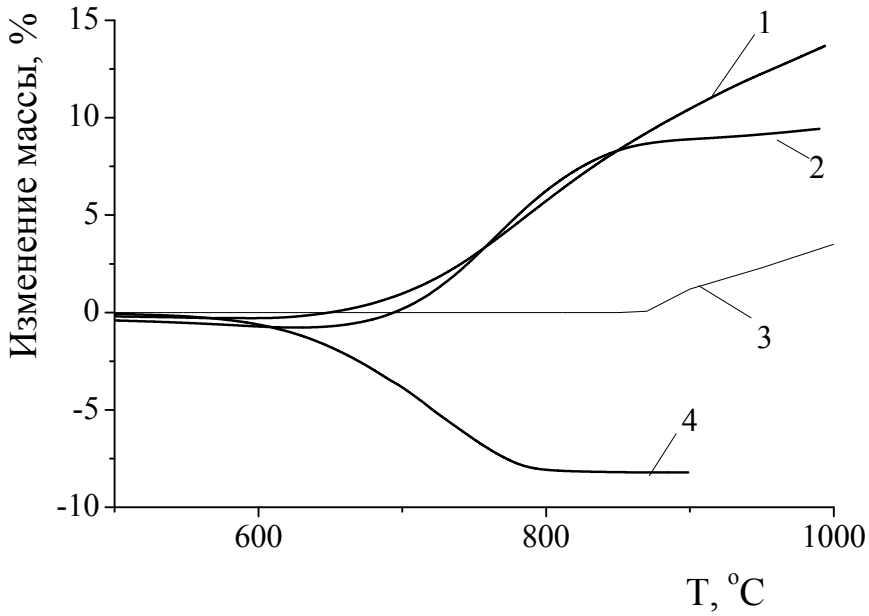


Рисунок 1 – Термогравиметрические кривые окисления образцов композиционных материалов:
1 – № 1; 2 – № 3; 3 – № 6; 4 – № 5 (см. табл. 1)

Дифрактограммы образцов композиционного материала (компактов) показаны на рисунке 2. Фазовый состав образцов приведен в таблице 2.

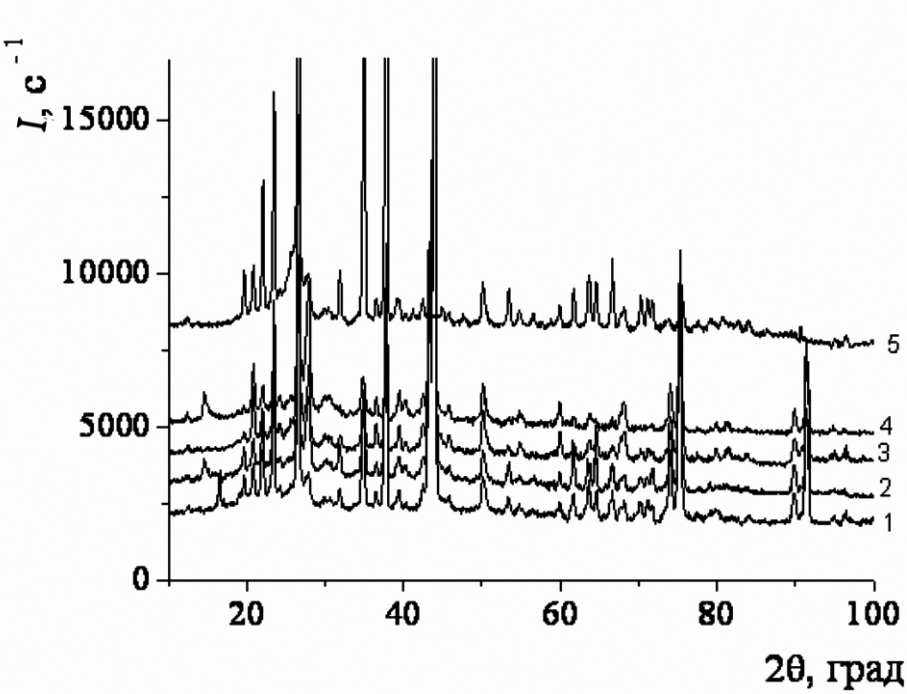


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов исходных материалов и композиционногоматериала (компактов):
1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

В образцах №№ 1–4 рентгенофазовым анализом определено наличие $B_{13}C_2$ – икосаэдрического субкарбида бора, обладающего особыми структурными и механическими свойствами [3].

В образцах №№ 3 и 5, подвергшихся окислению, рентгенофазовый анализ показал повышенное содержание оксида бора по сравнению с неокисленными образцами №№ 2 и 4.

Содержание оксида бора в исходном карбиде бора очень незначительное – до 0,2 % (согласно данным производителя). Наличие SiO_2 обусловлено окислением примеси кремния, содержащегося в исходном порошке карбида бора.

Из полученных данных следует, что при термоокислении на воздухе порошков компактов (синтезированных в среде углеродсодержащего газа), содержащих карбид и кубический нитрид бора, образуется оксид бора, который с икосаэдрическим субкарбидом бора $B_{13}C_2$ образует защитный слой, препятствующий дальнейшему окислению компактов.

Таблица 2 – Фазовый состав компактов на основе алмаза, карбида и кубического нитрида бора

№ обр.	Образец	Фазовый состав	Примеч.
1	Компакт из смеси: алмаз АС6 125/100 – 50%, карбид бора 125/100 – 35%, кубич.нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 15%	С – алмаз cBN – кубич.нитрид бора SiO_2 – кварц $B_{13}C_2$ – субкарбид бора B_2O_3 – оксид бора	–
2	Образец 1 после термообработки при температуре 900ºС в течение 20 мин на воздухе	С – алмаз cBN – кубич.нитрид бора SiO_2 – кварц $B_{13}C_2$ – субкарбид бора B_2O_3 – оксид бора	Содержание B_2O_3 выше чем в обр. 2
3	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 1	С – алмаз SiO_2 – кварц $B_{13}C_2$ – субкарбид бора cBN – кубич.нитрид бора B_2O_3 – оксид бора	Содержание SiO_2 выше чем в обр. 2
4	Порошок зернистости 160/125 – 315/250, изготовленный из образца 2	С – алмаз SiO_2 – кварц $B_{13}C_2$ – субкарбид бора cBN – кубич.нитрид бора B_2O_3 – оксид бора	Содержание B_2O_3 выше чем в обр. 4
5	Компакт из смеси: кубич.нитрид бора КМ 3/1, КМ3/2 – 85 % алмаз АС6 125/100 –15 % (без карбида бора)	cBN – кубич.нитрид бора С – графит	–

При шлифовании труднообрабатываемых материалов не всегда удается обеспечить необходимую режущую способность алмазно–абразивного инструмента и одновременно избежать значительного расхода сверхтвердых материалов (СТМ). Учитывая это, важно изготовлять и применять инструмент с измененными характеристиками рабочего слоя, что будет способствовать повышению износостойкости шлифовальных кругов. Одним из путей модификации абразивного слоя шлифовальных кругов является добавление в материал абразивного слоя композиционных порошков СТМ [11].

Для определения влияния порошков, изготовленных из компактов СТМ и введенных в абразивный слой, на износостойкость алмазно–абразивного инструмента проведено шлифование образцов твердого сплава Т15К6 кругом типоразмера 12А2–45º 125х5х3х32 с зернами АС6 125/100, а также кругами того же типа и габаритных размеров с комбинированным содержанием в абразивном слое алмазного порошка АС6 125/100 и абразивных компактов зернистости 160/125 (К160/125) и 315/250 (К315/250), содержащих

субкарбид бора $B_{13}C_2$ и оксид бора B_2O_3, как чистых, так и металлизированных никелем, при производительности шлифования 500 мм^3/мин.

Из данных таблицы 3 следует, что введение композиционных порошков СТМ в абразивный слой шлифовальных кругов способствует повышению износостойкости кругов в 1,7–2 раза, что подтверждает эффективность применения порошков при высоких производительностях обработки. Уменьшению относительного расхода зерен СТМ также способствует повышение концентрации композита в рабочем слое кругов.

Таблица 3 – Относительный расход зерен СТМ и напряженность электростатического поля шлама после шлифования твердого сплава Т15К6 кругами с различными характеристиками рабочего слоя

№ п/п	Характеристики СТМ	q_p, мг/г	E, кВ/м
1	АС6 125/100 – В2–08 – 100%	20,37	–2,1
2	АС6 125/100 – 75% + К160/125 ($B_{13}C_2$+B_2O_3) – 25% – В2–08	12,23	–2,0
3	АС6 125/100 – 50% + К160/125 ($B_{13}C_2$+B_2O_3) – 50% – В2–08	10,78	–1,8
4	АС6 125/100 – 25% + К160/125 ($B_{13}C_2$+B_2O_3) – 75% – В2–08	9,32	–1,6
5	АС6 125/100 – 50% + К315/250 ($B_{13}C_2$+B_2O_3) – 50% – В2–08	10,56	–1,7

Следует отметить, что в процессе шлифования в результате фрикционного контакта поверхностей круга и обрабатываемого материала возникает электризация трением (трибоэлектризация), которая, как свидетельствуют результаты предварительных исследований, непосредственно связана с алмазно–абразивной обработкой и оказывает влияние на нее. При шлифовании кругами на полимерном связующем в результате накопления избыточного заряда наблюдается повышенный износ алмазно–абразивного инструмента.

При выполнении исследований измеряли напряженность электростатического поля продуктов шлифования (шлама), поскольку шлам содержит микрочастицы как обрабатываемого материала, так и элементов рабочего слоя алмазно–абразивного инструмента [12].

Результаты исследований показывают (см. табицу. 3), что более высокой напряженности электростатического поля шлама соответствует больший относительный расход зерен СТМ. Следовательно, об износостойкости кругов из СТМ можно судить непосредственно по значению напряженности электростатического поля, используя его как оценочный критерий.

Из данных также следует, что увеличение концентрации композиционных порошков СТМ в рабочем слое шлифовальных кругов способствует снижению интенсивности процессов, связанных с электризацией, следовательно, износостойкость шлифовальных кругов повышается.

Одним из способов борьбы с возникновением избыточных зарядов при шлифовании является не только внесение в рабочий слой шлифовальных кругов дополнительных примесей, но и применение покрытий зерен СТМ, что приводит к изменению фрикционного контакта инструмента с деталью и, как следствие, снижению интенсивности процессов, связанных с электризацией при обработке. Для этого в рабочий слой кругов вводили композиционные порошки на основе кубического нитрида бора зернистости 160/125, содержащие $B_{13}C_2$ и B_2O_3, предварительно металлизированные никелем $(КМ3/1 + B_{13}C_2 + B_2O_3)_{металл}$. Исследования проводили при шлифовании твердого сплава ВК6 и быстрорежущей стали Р6М5 соответственно алмазными и кубонитовыми кругами формы 12А2–45º габаритных размеров 125х5х3х32 на полимерном связующем В2–08 с заменой 25% зерен от общей концентрации на указанные компакты и кругами со 100%–ной концентрацией алмазных или кубонитових зерен.

Из данных таблицы 4 следует, что при шлифовании твердого сплава ВК6 алмазными кругами с введением композиционного материала в рабочий слой кругов напряженность электростатического поля шлама, которая характеризует электризацию при обработке, снижается. Наоборот, при шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 кубонитовимы кругами введение компактов в рабочий слой кругов способствует повышению напряженности электростатического поля.

Таблица 4 – Взаимосвязь напряженности электростатического поля шлама и эксплуатационных характеристик процесса шлифования

Характеристика СТМ	Q, мм^3/хв	$\|E\|$, кВ/м	$q_в$, мг/г
АС6 125/100 – 100%	106,5	2,0	2,90
	177,5	1,9	8,15
	266,25	1,7	5,64
	355	2,2	8,67
	532,5	2,1	21,72
	710	2,5	23,04
АС6 125/100 – 75% + + (КМ 3/1+$B_{13}C_2$+ B_2O_3)$_{металл}$ – 25%	106,5	1,7	1,40
	177,5	1,1	2,82
	266,25	1,4	3,60
	355	1,9	6,05
	532,5	1,9	15,14
	710	2,2	19,79
КР 125/100 – 100%	120	1,3	3,62
	200	1,0	7,48
	300	1,6	4,75
	400	1,6	17,39
	600	2,4	27,19
КР 125/100–75% + + (КМ 3/1+$B_{13}C_2$+B_2O_3)$_{металл}$ – 25%	120	1,8	8,93
	200	1,6	10,65
	300	1,7	14,52
	400	2,3	28,03
	600	2,6	38,10

Известно, что износ алмазно–абразивного инструмента непосредственно связан с электризацией, сопровождающей обработку. Для уточнения этой зависимости был определен относительный расход СТМ в кругах (см. таблицу 4).

Согласно полученным результатам введение композиционного материала в абразивный слой алмазных кругов способствует снижению напряженности электростатического поля шлама и, соответственно, уменьшению относительного расхода СТМ.

Для кубонитовых кругов замена режущих зерен на композиционный материал неуместна, поскольку при этом повышаются напряженность электростатического поля

шлама и износ инструмента. Следует заметить, что с повышением напряженности электростатического поля шлама относительный расход алмазно–абразивных зерен увеличивается как для алмазных, так и кубонитоых кругов, что свидетельствует о возможности применения этой величины для оценки эксплуатационных параметров процесса шлифования.

Подытожив результаты исследований эффективности шлифования кругами, содержащими компакты микропорошков СТМ в рабочем слое, следует отметить, что при таком решение проблемы износостойкость шлифовального инструмента повышается в 1,7–2 раза за счет термостабильных соединений $B_{13}C_2$ и cBN.

Выводы.

Рентгенофазовый анализ показал наличие $B_{13}C_2$ – икосаэдрического субкарбида бора, обладающего особыми структурными и механическими свойствами.

Показано, что наиболее термостойкими являются образцы, состоящие из алмаза, карбида бора и кубического нитрида бора.

Из полученных данных следует, что при термоокислении на воздухе порошков компактов (синтезированных в среде углеродсодержащего газа), содержащих карбид и кубический нитрид бора, образуется оксид бора, который с икосаэдрическим субкарбидом бора $B_{13}C_2$ образует защитный слой, препятствующий дальнейшему окислению компактов.

Испытания композиционного материала в инструменте показали повышение работоспособности инструмента в 1,7–2 раза – за счет стойкости к нагреву термостабильных соединений $B_{13}C_2$ и cBN.

Показана возможность применения величины напряженности электростатического поля в качестве оценочного критерия эксплуатационных показателей процесса шлифования.

Таким образом, показана взаимосвязь физико–химических свойств новых композиционных материалов и эксплуатационных характеристик, изготовленных на их основе абразивного инструмента и паст.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. України № 63614. Спосіб виготовлення інструментального композиційного надтвердого матеріалу / В.Г. Полторацький, Г.П. Богатирьова, Г.С. Грищенко, В.І. Лавріненко, І.В. Лєщук, Ю.І. Нікітін, О.О. Пасічний, Б.В. Ситник. – Заявл. 04.04.2011; Опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19. – 3 с.

2. Полторацкий, В.Г. Изучение термостойкости и абразивных свойств шлифпорошков из композиционных материалов, полученных при низких давлениях, на основе CBN и синтетических алмазов с углеродной связкой / В.Г. Полторацкий, А.А. Бочечка, А.Н. Панова, В.А. Билоченко, Г.С. Грищенко, В.С. Шамраева, О.В. Лещенко, Л.Д. Чуйко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2013. – Вып. 16. – С. 295–304.

3. Еняшин, А.Н. Структурные, упругие и электронные свойства икосаэдрических субкарбидов ($B_{13}C_3$, $B_{13}C_2$), субнитрида ($B_{12}N_2$) и субоксида бора ($B_{12}O_2$) по данным SCC–DFTB–расчетов. / А.Н. Еняшин, А.Л. Ивановский // Физика твердого тела. – 2011. – том 53. – вып. 8. – С. 1493–1497.

4. Oganov A.R., Solozhenko V.L. // J. Superhard Mater. – 2009. – 31. – 285.

5. Albert B., Hillebrecht H. // Angew. Chem. Int. Ed. – 2009. – 48. –8640.

6. Riedel R. // Adv. Mater. – 1994. – 6. – 549.

7. Cook B.A., Harringa J.L., Lewis T.L., Russell A.M. // Srcipta Mater. – 2000. – 42. – 597.

8. Russell A.M., Cook B.A., Harringa J.L., Lewis T.L. // Srcipta Mater. – 2002. – 46. – 629.

9. Jiang X., Zhao J., Wu A., Bai Y., Jiang X. // J. Phys.: Cond. Matter. – 2010. – 22. – 315–503.

10. Zhang, F.X. Crystal structure of new rare–earth boron–rich solids: $REB_{28.5}C_4$ (Re = Y, Ho, Er, Tm and Lu). / F.X. Zhang, F.F. Xu, T. Mori et al. // J. Alloys Compounds. – 2001. – Vol. 329. – Is. 1–2. – 2001. – P. 168–172.

11. Лавриненко, В.И. Вплив функціональних домішок у робочому шарі кругів з надтвердих матеріалів та покриттів зерен на процеси електризації при шліфуванні / В.І. Лавріненко, О.А. Дєвицький, Б.В. Ситник та ін. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. пр. ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – Вип. 9. – С. 92.

12. Лавриненко, В.И. Выбор характеристик рабочего слоя абразивного инструмента из сверхтвердых материалов с учетом электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования / В.И. Лавриненко, А.А. Девицкий, О.О. Пасичный, и др. // Інструмент. світ. – 2013. – № 3–4 (59–60). – С. 17–22.

Картель Николай Тимофеевич
Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины, г. Киев
Академик НАН Украины, доктор химических наук, профессор, директор Института химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины
E–mail: nikar@kartel.kiev.ua

Бочечка Александр Александрович
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины по научным вопросам, заведующий отделом исследования физико–химических процессов синтеза материалов и их структуры
E–mail: bochechka@ism.kiev.ua

Лавриненко Валерий Иванович
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом технологии алмазно–абразивной и физико–технической обработки
E–mail: ceramic@ism.kiev.ua

Полторацкий Владимир Григорьевич
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследований поверхностных явлений и синтеза наноструктурированных материалов

Девицкий Александр Анатольевич
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Кандидат технических наук, научный сотрудник отдела физико–химии и технологии композиционных абразивных материалов, разработки и применения инструментов из них
E–mail: devitsky@mail.ua

Лещенко Ольга Владимировна
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Ведущий инженер лаборатории исследований поверхностных явлений и синтеза наноструктурированных материалов
E–mail: olesh@ism.kiev.ua

Билоченко Василий Афанасьевич
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Ведущий инженер лаборатории исследований поверхностных явлений и синтеза наноструктурированных материалов

Панова Анна Николаевна
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследований поверхностных явлений и синтеза наноструктурированных материалов

Грищенко Григорий Степанович
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Ведущий инженер лаборатории исследований поверхностных явлений и синтеза наноструктурированных материалов

Шамраева Валентина Сергеевна
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Ведущий инженер лаборатории исследований поверхностных явлений и синтеза наноструктурированных материалов

Ущаповский Юрий Павлович
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Заместитель директора по техническим вопросам

Смирнова Анжела Викторовна
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев
Ведущий инженер отдела технологии твердых сплавов и композиционных структурированных материалов

N.T. KARTEL, A.A. BOCHECHKA, V.I. LAVRINENKO, V.G. POLTORATSKIY, A.A. DEVITSKIY, O.V. LESHCHENKO, V.A. BILOCHENKO, A.N. PANOVA, G.S. GRISHCHENKO, V.S. SHAMRAYEVA, Yu.P. USHCHAPOVSKIY, A.V. SMIRNOVA

RESEARCH OF STRUCTURED CARBON BINDER COMPOSITE POWDERS BASED ON DIAMOND, B_4C, CBN AND EVALUATION OF THEIR EFFECTIVENESS APPLICATION IN THE ABRASIVE TOOL

The results of X–ray and derivatografic studies of composite material based on synthetic diamond, boron carbide and cubic boron nitride produced by gas–phase method at subatmospheric pressures are presented. The presence of the $B_{13}C_2$ – icosahedral boron subcarbide is showed. Working tests of composite material in abrasive tools showed that efficiency of grinding wheels increased by 1.7–2.0 times due to the heat resistance of thermostable compounds $B_{13}C_2$ and cBN, efficiency of grinding pastes increased by 1.7–1.9 times.

Keywords: *diamond, boron carbide, icosahedral boron subcarbide, cubic boron nitride, compacts, composite powders, X–ray diffraction, derivatography, grinding tools.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pat. Ukraí□ni № 63614. Sposíb vigotovlennya ínstrumentalnogo kompozitsíynogo nadtverdogo materíalu / V.G. Poltoratskiy, G.P. Bogatirova, G.S. Grishchenko, V.Í. Lavrínenko, Í.V. Lêshchuk, YU.Í. Níkítín, O.O. Pasíchniy, B.V. Sitnik. – Zayavl. 04.04.2011; Opubl. 10.10.2011, Byul. № 19. – 3 s.

2. Poltoratskiy, V.G. Izucheniye termostoykosti i abrazivnykh svoystv shlifporoshkov iz kompozitsionnykh materialov, poluchennykh pri nizkikh davleniyakh, na osnove SVN i sinteticheskikh almazov s uglerodnoy svyazkoy / V.G. Poltoratskiy, A.A. Bochechka, A.N. Panova, V.A. Bilochenko, G.S. Grishchenko, V.S. Shamrayeva, O.V. Leshchenko, L.D. Chuyko // Porodorazrushayushchiy i metaloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnologiya yego izgotovleniya i primeneniya: sb. nauch. tr. – Kiyev: ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy, 2013. – Vyp. 16. – S. 295–304.

3. Yenyashin, A.N. Strukturnyye, uprugiye i elektronnyye svoystva ikosaedricheskikh subkarbidov (B13C3, B13C2), subnitrida (B12N2) i suboksida bora (B12O2) po dannym SCC–DFTB–raschetov. / A.N. Yenyashin, A.L. Ivanovskiy // Fizika tverdogo tela. – 2011. – tom 53. – vyp. 8. – S. 1493–1497.

4. Oganov A.R., Solozhenko V.L. // J. Superhard Mater. – 2009. – 31. – 285.

5. Albert B., Hillebrecht H. // Angew. Chem. Int. Ed. – 2009. – 48. –8640.

6. Riedel R. // Adv. Mater. – 1994. – 6. – 549.

7. Cook B.A., Harringa J.L., Lewis T.L., Russell A.M. // Srcipta Mater. – 2000. – 42. – 597.

8. Russell A.M., Cook B.A., Harringa J.L., Lewis T.L. // Srcipta Mater. – 2002. – 46. – 629.

9. Jiang X., Zhao J., Wu A., Bai Y., Jiang X. // J. Phys.: Cond. Matter. – 2010. – 22. – 315–503.

10. Zhang, F.X. Crystal structure of new rare–earth boron–rich solids: REB28.5C4 (Re = Y, Ho, Er, Tm and Lu). / F.X. Zhang, F.F. Xu, T. Mori et al. // J. Alloys Compounds. – 2001. – Vol. 329. – Is. 1–2. – 2001. ¬– P. 168–172.

11. Lavrinenko, V.I. Vpliv funktsíonalnikh domíshok u robochomu sharí krugív z nadtverdikh materíalív ta pokrittív zeren na protsesi yelektrizatsií□ pri shlífuvanní / V.Í. Lavrínenko, O.A. Dêvitskiy, B.V. Sitnik ta ín. // Protsesi mekhaníchnoí□ obrobki v mashinobuduvanní: zb. nauk. pr. ZHDTU. – Zhitomir: ZHDTU, 2010. – Vip. 9. – S. 92.

12. Lavrinenko, V.I. Vybor kharakteristik rabochego slova abrazivnogo instrumenta iz sverkhtverdykh materialov s uchetom elektricheskikh yavleniy, soprovozhdayushchikh protsess shlifovaniya / V.I. Lavrinenko, A.A. Devitskiy, O.O. Pasichnyy, i dr. // Ínstrument. svít. – 2013. – № 3–4 (59–60). – S. 17–22.

Kartel Nikolay Timofeyevich
nstitute of Surface Chemistry. AA Chuyko National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Chemistry, Professor, Director of the Institute of Chemistry of the surface. AA Chuyko NAS
E–mail: nikar@kartel.kiev.ua

Bochechka Aleksandr Aleksandrovich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Deputy Director of the Institute of superhard materials them. VN Bakul NAS Scientific Affairs, Head of Department study of physical and chemical processes of materials synthesis and their structure
E–mail: bochechka@ism.kiev.ua

Lavrinenko Valeriy Ivanovich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Doctor of Technical Sciences, professor, head of the technology department of the diamond–abrasive and physical–technical processing
E–mail: ceramic@ism.kiev.ua

Poltoratskiy Vladimir Grigoryevich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
PhD, Researcher, Laboratory studies of surface phenomena, and the synthesis of nanostructured materials

Devitskiy Aleksandr Anatolyevich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
PhD, researcher at the Department of Physics and Chemistry and technology of composite abrasives, development and application of these instruments
E–mail: devitsky@mail.ua

Leshchenko Olga Vladimirovna
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Lead Engineer Laboratory of surface phenomena research and synthesis of nanostructured materials
E–mail: olesh@ism.kiev.ua

Bilochenko Vasiliy Afanasyevich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Lead Engineer Laboratory of surface phenomena research and synthesis of nanostructured materials

Panova Anna Nikolayevna
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
PhD, Researcher, Laboratory studies of surface phenomena, and the synthesis of nanostructured materials

Grishchenko Grigoriy Stepanovich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Lead Engineer Laboratory of surface phenomena research and synthesis of nanostructured materials

Shamrayeva Valentina Sergeyevna
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Lead Engineer Laboratory of surface phenomena research and synthesis of nanostructured materials

Ushchapovskiy Yuriy Pavlovich
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Deputy Director for Technical Issues

Smirnova Anzhela Viktorovna
Institute for Superhard Materials. VN Bakul National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
Leading engineer of technology of hard alloys and composite structured materials

УДК 621.92

Д.Э. РИВАС ПЕРЕС, В.А. НОСЕНКО, Д.В. ДАНИЛОВ

ХИМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОСВЯЗАННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Показана возможность получения карбида кремния необходимого химического состава, используемого в качестве исходного сырья для самосвязанного карбида кремния. Объектами исследования выбраны карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F120, фракция карбида кремния черного с размерами зерен менее 63 мкм и карбид кремния зелёный марки 64С зернистостью F120 производства ОАО «Волжский абразивный завод». Химический состав исходных шлифовальных порошков определяли по ГОСТ 26327. Показано соответствие химического состава шлифовальных порошков производства ОАО «Волжский абразивный завод» требованиям ГОСТ 26327 и значимое отличие по химическому составу для изготовления самосвязанного карбида кремния. Приведена краткая технология получения шлифовальных порошков, отмечены основные причины повышенного содержания отдельных компонентов. Для удаления аморфных включений и частиц свободного железа (намол в процессе измельчения) применяется двух-трех стадийная магнитная сепарация общего потока. Для снижения содержания примесей до требуемых значений использован метод химического травления в растворе плавиковой кислоты с концентрациями 10 и 20 %. Исходные шлифовальные порошки помещали в лабораторный реактор. Шлифовальные порошки зернистостью F120 выщелачивали 40 минут, фракцию карбида кремния черного с размером зерен менее 63 мкм – 24 часа, затем промывали деионизированной водой и сушили 8 часов. Приведены результаты выхода продуктов и их химический состав. После обработки в растворе плавиковой кислоты химический состав шлифовальных порошков соответствовал требованию к продуктам для изготовления самосвязанного карбида кремния методом силицирования.

Ключевые слова: *карбид кремния, химический состав, магнитная сепарация, химическое травление, методика, самосвязанный карбид кремния.*

Одним из основных компонентов в составе рецептурной смеси для получения самосвязанного карбида кремния (СКК) являются кристаллы карбида кремния. Под действием высокой температуры в специальной среде происходит сращивание кристаллов карбида кремния образующейся связкой из карбида кремния. В результате такого процесса формируется прочная матрица, способная работать на истирание в экстремальных условиях, выдерживать большие ударные нагрузки, воздействие кислотной и щелочной среды, температуры более 2000 °С [1, 2].

Основным количественным показателем для изделий из ССК является плотность, характеризующая степень силицирования заготовки. Чем меньше в фазовом составе материала изделия свободного кремния, тем ближе плотность изделия из ССК к теоретической плотности монолитного карбида кремния 3,2 г/см^3. Для достижения такой плотности не достаточно просто соблюдать баланс между углеродосодержащим материалом в формовочной шихте и количеством кремния, помещенного в печь. Существенное влияние оказывают процессы окисления и разложения первичного карбида кремния, которые сопровождаются появлением нежелательных пор и образованием дополнительного углерода [3]. Спровоцировать данные реакции может температура, превышающая 1850°С, и примеси, присутствующие на поверхности кристаллов карбида кремния.

Если в качестве исходного сырья для получения СКК использовать шлифовальные порошки из карбида кремния, применяемые для изготовления абразивного инструмента, одним из обязательных требований к данному материалу будет его химический состав.

Наиболее распространенная схема производства классифицированных по размеру зерен карбида кремния включает в себя многостадийное измельчение исходного куска

размером около 50 мм. Для удаления аморфных включений и частиц свободного железа, образующегося в процессе измельчения, применяется двух–трех стадийная магнитная сепарация общего потока. Но магнитная сепарация не позволяет, удалить железо с поверхности кристаллов. Для этого необходима специальная кислотная обработка материала.

С целью получения химического состава, отвечающего требованиям исходного продукта для получения самосвязанного карбида кремния с прочной структурной матрицей в условиях ОАО «Волжский абразивный завод» исследована возможность химического обогащения исходного карбида кремния.

В качестве объектов исследования использованы карбид кремния чёрный марки 54С зернистостью F120, фракция карбида кремния черного марки 54С с размерами зерен 0,063мм и карбид кремния зелёный марки 64С зернистостью F120 производства «Волжского абразивного завода».

Опытным путем в результате многочисленных исследований определен химический состав исходного карбида кремния, обеспечивающий стабилизацию процесса силицирования (таблица 1).

Таблица 1 – Требования к химическому составу карбида кремния

Компоненты	SiC, не менее	Fe, не более	C, не более	$Si+SiO_2$, не более
Для производства СКК	99,5%	0,05%	0,1%	0,4%
54С F120 (ГОСТ 3647)	96,0	0,4	0,4	–
64С F120 (ГОСТ 3647)	98,0	0,2	0,4	–
54С F120, фактический	98,7	0,18	0,15	0,8
54С, менее 63 мкм, фактический	98,0	0,3	0,15	1,4
64С F120, фактический	98,5	0,14	0,21	0,93

Для выделения магнитных продуктов использовали барабанный магнитный сепаратор (МБС–ЛП). Пленочные загрязнения удаляли методом растворения в лабораторном реакторе IKL LR 1000 basic.

Тестирование проб осуществляли в два этапа. Первоначально пробы поступали на магнитный сепаратор для удаления магнитной фракции, затем осуществляли кислотную обработку в растворах плавиковой кислоты 10 и 20 % концентраций.

В результате магнитной сепарации выход обогащенного продукта карбида кремния черного составил около 80 %, карбида кремния зеленого – около 90 %. Химический состав порошков карбида кремния соответствует требованиям к шлифовальным порошкам по ГОСТ 3647, но не отвечает требованиям по химическому составу к исходному материала для производства СКК (таблица 1)

Далее порошки карбида кремния черного и зеленого помещали в лабораторный реактор и подвергали химическому травлению в 10 % раствором плавиковой кислоты. Время выщелачивания составило 40 минут. Затем осуществляли промывку деионизированной водой до pH–6 и проводили сушку на воздухе в течение 8 часов. Аналогичную обработку проводили в 20 % раствором HF.

В связи с достаточно большим содержанием железа в порошке карбида кремния черного фракции менее 0,063 мм, время выщелачивания в растворе плавиковой кислоты увеличено до 24 часов, концентрация HF – 10 %. Условия промывки порошка после химического травления деионизированной водой и последующей сушки соответствовали ранее принятым.

Массовая доля твердой и жидкой фаз при кислотной обработки прията в отношении 3:1. Выход готового продукта порошка из карбида кремния черного 54С F120 при обработке в

различных растворах плавиковой кислоты составил около 95–97 %, карбида кремния зеленого 64С F120 – 94–96 %. Для карбида кремния зеленого наблюдается тенденция снижения выхода готового продукта с увеличением концентрации плавиковой кислоты. Выход готового продукта после химической обработки шлифовального порошка карбида кремния черного с размерами зерен менее 63 мкм составил около 93 %. Наибольшие потери исходного продукта наблюдаются при обработке мелкозернистой фракции и составляют около 7 %.

Химический состав немагнитных проб после химической обработки определяли по ГОСТ 26327 (таблица 2). В результате обработки 10 % раствором плавиковой кислоты химический состав всех проб, кроме карбида кремния черного марки 54С фракции менее 63 мкм, соответствует требованиям к исходному продукту для получения СКК (таблица 1). С увеличением содержания плавиковой кислоты до 20 % все пробы по химическому составу удовлетворяют принятым требованиям.

Таблица 2 – Химический состав немагнитных проб после химической обработки

	HF, %	SiC, %	Fe, %	C, %	Si+SiO2, %
54С F120	10	99,5	0,04	0,06	0,35
	20	99,6	0,05	0,08	0,31
54С менее 63 мкм	10	99,3	0,07	0,06	0,39
	20	99,5	0,05	0,1	0,31
64С F120	10	99,5	0,05	0,1	0,39
	20	99,6	0,03	0,08	0,3

Лабораторные исследования по химическому обогащению карбида кремни черного и карбида кремния зеленого, полученных по технологии производства шлифовального порошка на ОАО «Волжский абразивный завод» показали возможность доведения их химического состава до требований к исходному продукту, предназначенного для получения самосвязанного карбида кремния. Обработку карбида кремния зеленого и черного целесообразно проводить в 10 % растворе, карбида кремния черного фракции менее 63 мкм – в 20 % растворе плавиковой кислоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнесин, Г.Г. Карбидкремниевые материалы / Г.Г. Гнесин. – М.: Металлургия, 1977. – 216 с.

2. Майстренко, А.Л. Формирование высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния / А.Л. Майстренко, В.Г. Кулич, В. Н. Ткач // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 1. – С. 18–35.

3. Дигонсий, С.В. Газофазные процессы синтеза и спекания тугоплавких веществ (карбид кремния, пирографит, алмаз, кубический нитрид бора) / С.В. Дигонсий. – М.: ГЕОС, 2013. – 464 с.

Ривас Перес Даниэль Эрнестович
Волжский абразивный завод, ОАО «ВАЗ»
Начальник производственно–технологического отдела производства карбида кремния и огнеупоров,
404130, г. Волжский, Волгоградская область, ул. Автодорога, 6, стр.18
Тел.: 8443–525325, +7–9026541554
E–mail: rivas–peres_de@ vabz.ru

Носенко Владимир Андреевич
Волжский политехнический институт (ф–л) Волгоградского ГТУ
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительного производства».
Тел.: 8443–386834,
E–mail: nosenko@volpi.ru

Данилов Дмитрий Владимирович
Волжский абразивный завод, ОАО «ВАЗ»,
Инженер–технолог исследовательской лаборатории огнеупоров
404130, г. Волжский, Волгоградская область, ул. Автодорога 6, стр.18
Тел.: 8443–525325, +7–9033158299,
E–mail: danilov_dv@ vabz.ru

D.E. RIVAS PERES, V.A. NOSENKO, D.V. DANILOV

CHEMICAL PREPARATIONS FOR SILICON CARBIDE SELF-BONDED SILICON CARBIDE

This demonstrates a possibility of producing the silicon carbide with the chemical composition parameters suitable to be used as an infeed for the reaction–bonded silicon carbide manufacturing. The following fractions were the subject of research: black silicon carbide grade 54C, F120 grit size; black silicon carbide fraction with particle size below 63 micron; green silicon carbide grade 64C, F120 grit size, manufactured by JSC «Volzhsky Abrasive Works». Chemical composition of the infeed grinding powders has been determined in accordance with GOST 26327. The chemical composition of the grinding powders manufactured by JSC "Volzhsky Abrasive Works" was found to be compliant with the specifications of GOST 26327 but largely unsuitable for the production of reaction–bonded silicon carbide. Brief description of the grinding powders production technology is provided; primary reasons for increased content of the single components are specified. Two– or three–stage magnetic separation of the general material flow is used to eliminate the amorphous inclusions and free iron particles (crushing process contamination). In order to decrease the impurities content and achieve the required composition parameters, the chemical etching method was used, via 10–20% solution of hydrofluoric acid. Original grinding powders were placed into the laboratory reactor. Grinding powders with F120 grit size were subjected to leaching for 40 minutes, black silicon carbide fraction with particle size below 63 micron – for 24 hours, then washed with deionized water and dried for 8 hours. Results of products yield and chemical composition are shown herein. After hydrofluoric acid treatment the chemical composition of grinding powders was found to be suitable for the reaction–bonded silicon carbide production by silicification method.

Keywords: *silicon carbide, chemical composition, magnetic separation, chemical etching, method, reaction–bonded silicon carbide.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gnesin, G.G. Karbidkremniyevyye materialy / G.G. Gnesin. – M.: Metallurgiya, 1977. – 216 s.

2. Maystrenko, A.L. Formirovaniye vysokoplotnoy struktury samosvyazannogo karbida kremniya / A.L. Maystrenko, V.G. Kulich, V. N. Tkach // Sverkhtverdyye materialy. – 2009. – № 1. – S. 18–35.

3. Digonsiy, S.V. Gazofaznyye protsessy sinteza i spekaniya tugoplavkikh veshchestv (karbid kremniya, pirografit, almaz, kubicheskiy nitrid bora) / S.V. Digonsiy. – M.: GEOS, 2013. – 464 s.

Rivas Peres Daniel Ernestovich
Volzhsky Abrasive Works, JSC «VAW»,
Head of Manufacturing Technology department – Silicon carbide and Refractories,
404130, Volzhsky, Volgograd region, Avtodoroga 6, bld.18,
Tel.: 8443–525325, +7–9026541554,
E–mail: rivas–peres_de@ vabz.ru

Nosenko Vladimir Andreevich
Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of FGBOU VO «Volgograd State Technical University»,
D.E., Professor, Director of «Technology and Equipment of Engineering Industry» department.
404118, Volzhsky, Volgograd region, Mira st., 120, apt.129.
Tel.: 8443–386834, 8–9044033174,
E–mail: nosenko@volpi.ru

Danilov Dmitriy Vladimirovich
Volzhsky Abrasive Works, JSC «VAW»,
Technology Engineer – Refractories research laboratory
404130, Volzhsky, Volgograd region, Avtodoroga 6, bld.18,
Tel.: 8443–525325, +7–9033158299,
E–mail: danilov_dv@ vabz.ru

УДК 62–83:621.825

Ю.С. КОРНЕЕВ, В.А.ГОРДОН, Е.Н. КОРНЕЕВА, Т.Ю. ГУЛИДОВА

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ РАЗГОНА ПРИВОДА С ПУСКОЗАЩИТНОЙ МУФТОЙ

Статья посвящена машинному агрегату с пускозащитной муфтой и определению времени разгона ведомой полумуфты вместе с технологической машиной.

Ключевые слова: *привод, муфта, момент, технологическая машина.*

Рассмотрим систему, представленную на рисунке 1, состоящую из электродвигателя и рабочей машины, соединенных пускозащитной муфтой [1,2]. Поскольку особый интерес представляет период, когда происходит разгон ведомой полумуфты вместе с рабочей машиной, то для установления функциональной связи между угловой скоростью ведомой полумуфты вместе с рабочей машиной и временем ее разгона, рассмотрим уравнение движения привода:

$$I_{\text{пр2}} \frac{d\omega_2}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dI_{\text{пр2}}}{d\varphi_2} \omega_2^2 = T_{\text{ф}} - T_{\text{с}}, \quad (1)$$

где: $I_{\text{пр2}}$ – приведенный момент инерции рабочей машины вместе с ведомой полумуфтой;
ω_2 – угловая скорость вала рабочей машины;
$T_{\text{с}}$ – момент сил сопротивления со стороны рабочей машины;
φ_2 – угол поворота ведомой полумуфты.

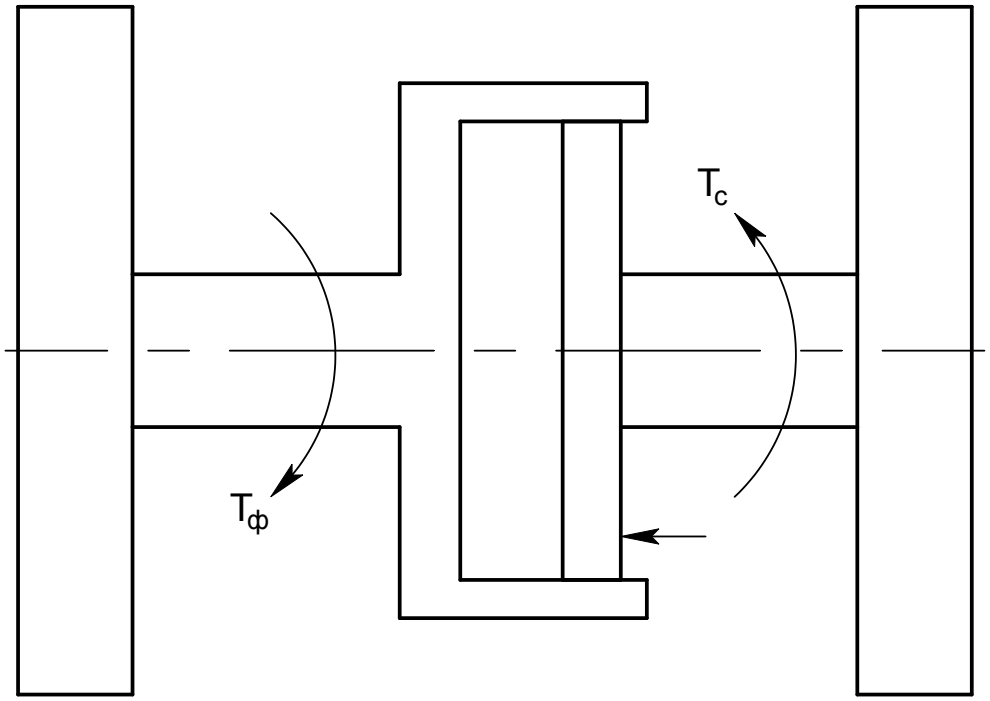


Рисунок 1 – Схема привода с пускозащитной муфтой

Фрикционный момент $T_{\text{ф}}$ на участке от $\omega_2 = 0$ до $\omega_2 = \omega_1$ можно аппроксимировать с некоторым приближением уравнением прямой линии, тогда [3, 4, 5]:

$$T_{\text{ф}} = T_{\text{фп}} + k_1 \omega_2, \quad (2)$$

где: k_1 – постоянный коэффициент, находящийся из следующих условий:
при $\omega_2 = 0$, $T_{\text{ф}} = T_{\text{фп}}$, при $\omega_2 = \omega_1$, $T_{\text{ф}} = T_{\text{ф}max}$, тогда:

$$k_1 = \left(T_{\text{ф}max} - T_{\text{фп}}\right)/\omega_1. \quad (3)$$

Уравнение (1) в общем виде не решается, если не знать функций $T_{\text{с}}$ и $I_{\text{пр2}}$. Решим это уравнение для наиболее часто встречающихся случаев. Пусть $T_{\text{с}} = const$, $I_{\text{пр2}} = const$. Тогда:

$$I_{\text{пр2}} \frac{d\omega_2}{dt} = T_{\text{фп}} + k_1\omega_2 - T_{\text{с}}. \quad (4)$$

Интегрируя последнее выражение, получим продолжительность разгона вала рабочей машины:

$$t = \frac{I_{\text{пр2}}}{k_1} \ln\left|k_1\omega_2 + T_{\text{фп}} - T_{\text{с}}\right|, \quad (5)$$

а связь угловой скорости и времени определяется выражением:

$$\omega_2 = \frac{1}{k_1}\left[e^{\frac{tk_1}{I_{\text{пр2}}}} - \left(T_{\text{фп}} - T_{\text{с}}\right)\right]. \quad (6)$$

Иногда при определении параметров разгона машинного агрегата механическая характеристика исполнительной машины может быть аппроксимирована в виде линейной зависимости момента сил сопротивления от скорости, то есть:

$$T_{\text{с}} = T_{\text{сп}} + \omega_2 k_2, I_{\text{пр2}} = const$$

Тогда уравнение движения рабочей машины имеет вид:

$$I_{\text{пр2}} \frac{d\omega_2}{dt} = T_{\text{фп}} + k_1\omega_2 - T_{\text{сп}} - k_2\omega_2. \quad (7)$$

После интегрирования получим продолжительность разгона рабочей машины:

$$t = \frac{I_{\text{пр2}}}{k_1 - k_2} \ln\left|(k_1 - k_2)\omega_2 + \left(T_{\text{фп}} - T_{\text{сп}}\right)\right|. \quad (8)$$

Угловая скорость вала рабочей машины:

$$\omega_2 = \frac{1}{k_1 - k_2}\left[e^{\frac{t(k_1 - k_2)}{I_{\text{пр2}}}} - \left(T_{\text{фп}} - T_{\text{сп}}\right)\right]. \quad (9)$$

В некоторых случаях момент сил сопротивления технологической машины (например, в текстильном машиностроении, в литейном производстве) изменяется нелинейно с изменением скорости. Тогда момент $T_{\text{с}}$ можно аппроксимировать в виде параболы: $T_{\text{с}} = T_{\text{сп}} + k_2\omega_{22}, I_{\text{пр2}} = const.$

Уравнение движения технологической машины в этом случае примет вид:

$$I_{\text{пр2}} \frac{d\omega_2}{dt} = \left(T_{\text{фп}} + k_1\omega_2\right) - \left(T_{\text{сп}} + k_2\omega_2^2\right), \quad (10)$$

или

$$-I_{\text{пр2}} \frac{d\omega_2}{k_2\omega_2^2 - k_1\omega_2 + T_{\text{сп}} - T_{\text{фп}}} = dt. \quad (11)$$

Тогда время разгона определяется выражением: при $\Delta = 4k_2\left(\text{T}_{\text{сп}} - \text{T}_{\text{фп}}\right) - k_{12} < 0$:

$$t = \frac{-I_{\text{пр2}}}{\sqrt{k_1^2 - 4k_2\left(T_{\text{сп}} - T_{\text{фп}}\right)}} \ln \frac{2k_2\omega_2 - k_1 - \sqrt{k_1^2 - 4k_2\left(T_{\text{сп}} - T_{\text{фп}}\right)}}{2k_2\omega_2 - k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4k_2\left(T_{\text{сп}} - T_{\text{фп}}\right)}}, \quad (12)$$

при $\Delta = 4k_2\left(\text{T}_{\text{сп}} - \text{T}_{\text{фп}}\right) - k_{12} > 0$:

$$t = \frac{-2I_{\text{пр2}}}{\sqrt{4k_2\left(T_{\text{сп}} - T_{\text{фп}}\right) - k_1^2}} \text{arctg} \frac{2k_2\omega_2 - k_1}{\sqrt{4k_2\left(T_{\text{сп}} - T_{\text{фп}}\right) - k_1^2}}. \quad (13)$$

Таким образом, найдено время разгона исполнительного органа технологической машины для типовых случаев изменения момента сил сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев, Ю.С. Исследование машинного агрегата с фрикционной муфтой и центробежным механизмом включения / Ю.С. Корнеев. – М.: Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – № 4. – С. 31 – 35.

2. Корнеев, Ю.С. Метод расчета и проектирования фрикционных муфт с центробежным механизмом включения. Дисс… на соискание ученой степени канд. техн. наук/ Ю.С. Корнеев. – Л.: Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, 1987. – 356 с.

3. Вейц, В.Л. Решение уравнения движения машинного агрегата, основанное на аппроксимации нелинейных зависимостей кусочно–постоянными функциями / В.Л. Вейц. – Механика машин, вып. 9 – 10. – М.: Наука. – 1967. – С. 27 – 38.

4. Вейц, В.Л. Динамика машинных агрегатов/ В.Л. Вейц. – Л.: Машиностроение, 1969. – 370 с.

5. Вейц, В.Л. Динамические расчеты приводов машин / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура, А.М. Мартыненко. – Л.: Машиностроение, 1971. – 352 с.

Корнеев Юрий Степанович
Приокский государственный университет
Кандидат технических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41–98–96

Гордон Владимир Александрович
Приокский государственный университет
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41–98–48

Корнеева Елена Николаевна
Приокский государственный университет
Кандидат технических наук, доцент
Тел.: 41–98–48

Гулидова Татьяна Юрьевна
Приокский государственный университет
Кандидат экономических наук, доцент
Тел.: 41–98–96

Yu.S. KORNEEV, V.A. GORDON, E.N. KORNEEVA, T.Yu. GULIDOVA

THE CALCULATION OF TIME OF DISPERSAL OF THE DRIVE WITH THE START–PROTECTIVE CLUTCH

This article is devoted to the machine unit with the start–protective clutch and to the definition of time of dispersal of the conducted semi–clutch together with the technological machine.

Keywords: *drive gear, clutch, moment, tecnological machine.*

BIBLIOGRAPHY

1. Korneyev, YU.S. Issledovaniye mashinnogo agregata s friktsionnoy muftoy i tsentrobezhnym mekhanizmom vklyucheniya / YU.S. Korneyev. – M.: Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye. – 1986. – № 4. – S. 31 – 35.

2. Korneyev, YU.S. Metod rascheta i proyektirovaniya friktsionnykh muft s tsentrobezhnym mekhanizmom vklyucheniya. Diss… na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk/ YU.S. Korneyev. – L.: Leningradskiy politekhnicheskiy institut im. M.I. Kalinina, 1987. – 356 s.

3. Veyts, V.L. Resheniye uravneniya dvizheniya mashinnogo agregata, osnovannoye na approksimatsii nelineynykh zavisimostey kusochno–postoyannymi funktsiyami / V.L. Veyts. – Mekhanika mashin, vyp. 9 – 10. – M.: Nauka. – 1967. – S. 27 – 38.

4. Veyts, V.L. Dinamika mashinnykh agregatov/ V.L. Veyts. – L.: Mashinostroyeniye, 1969. – 370 s.

5. Veyts, V.L. Dinamicheskiye raschety privodov mashin / V.L. Veyts, A.Ye. Kochura, A.M. Martynenko. – L.: Mashinostroyeniye, 1971. – 352 s.

Korneyev Yuriy Stepanovich
Prioksky State University
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29
Tel.: 41–98–96

Gordon Vladimir Aleksandrovich
Prioksky State University
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of «Higher Mathematics»
302020, Orel, Naugorskoe Highway 29
Tel.: 41–98–48

Korneyeva Yelena Nikolayevna
Prioksky State University
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Tel.: 41–98–48

Gulidova Tatyana Yuryevna
Prioksky State University
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Tel.: 41–98–96

УДК 621.9.06–233.1–233.21

В.А. ЛИЗОГУБ

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

В работе предложен метод проектирования шпиндельных узлов на опорах качения для металлорежущих станков. Метод содержит выбор компоновочной схемы ШУ из различных подшипников и выбор элементов конструкции для различных станков по критериям технологичность, максимальная жёсткость и виброустойчивость с заданной точностью.

Ключевые слова: *шпиндельный узел; подшипники качения; компоновочная схема; металлорежущие станки.*

Хорошо известно, что точность и производительность резания металлорежущих станков существенно зависит от точности, жёсткости, виброустойчивости и быстроходности шпиндельных узлов (ШУ). Так как в мире подавляющее количество станков выпускается с шпинделями на опорах качения, то выбор оптимальной конструкции ШУ задача вполне актуальная.

В настоящее время на станках с диаметром шпинделей 60…100 мм на прецизионных подшипниках качения при чистовом точении можно получить минимальную погрешность обработки (отклонение от круглости) в пределах 1…1,5 мкм., что соответствует станкам классов точности Н, П, В и А. Большое разнообразие применяемых и рекомендуемых разными источниками конструкций ШУ на опорах качения приводит к распылению конструкторского и технологического опыта при создании ШУ (а в ряде случаев и не являются лучшими), что не способствует повышению их качества и их унификации.

В данной работе предлагается рассмотреть выбранные из большого числа возможных компоновочных решений предложенные компоновочные схемы ШУ на опорах качения и области их применения, а также некоторые конструкторские решения по этим компоновочным схемам. Предложенные компоновочные схемы представлены на рисунке 1. Синтез этих схем осуществлялся на основе расчётов, опыта изготовления и эксплуатации ШУ в различных станках и учёта экспертных оценок специалистов [1, 2].

Передняя опора на всех схемах выполнена «запертой», а задняя «плавающей». При такой комбинации подшипников в передней опоре создаётся существенный защемляющий момент, что значительно повышает радиальную жёсткость и виброустойчивость ШУ, уменьшает температурное удлинение переднего конца шпинделя, а так же исключает параметрические колебания и параметрическую неустойчивость.

Так как в процессе резания под действием изменяющейся радиальной и осевой силы резания в ШУ с «плавающей» передней и «запертой» задней опорой появляются параметрические поперечные колебания, а при некоторых сочетаниях параметров может наступить и параметрическая неустойчивость, вследствие того, что под действием радиальной силы шпиндель изгибается, а изменяющаяся осевая сила при этом изменяет параметр – жёсткость ШУ. Следовательно, в конструкциях ШУ, выполненных по схемам рисунка 1, исключается это явление, что повышает точность обработки [3].

Все схемы разбиты на три группы низкоскоростные, среднескоростные и высокоскоростные. Справа для каждой схемы указаны усреднённые значения параметра быстроходности d·n. Первое число с пластичной смазкой опор. Второе для схем 1– 6 с жидкой смазкой опор, для схем 7 –10 с смазкой масляным туманом.

Этот параметр d·n зависит от многих факторов: типа системы смазки, класса точности подшипников, радиального зазора–натяга роликоподшипников, предварительного натяга шарикоподшипников, количества подшипников в опоре, серии подшипников и их предельной частоты вращения, указанной в каталогах. Методика определения d·n приведена в работе [4].

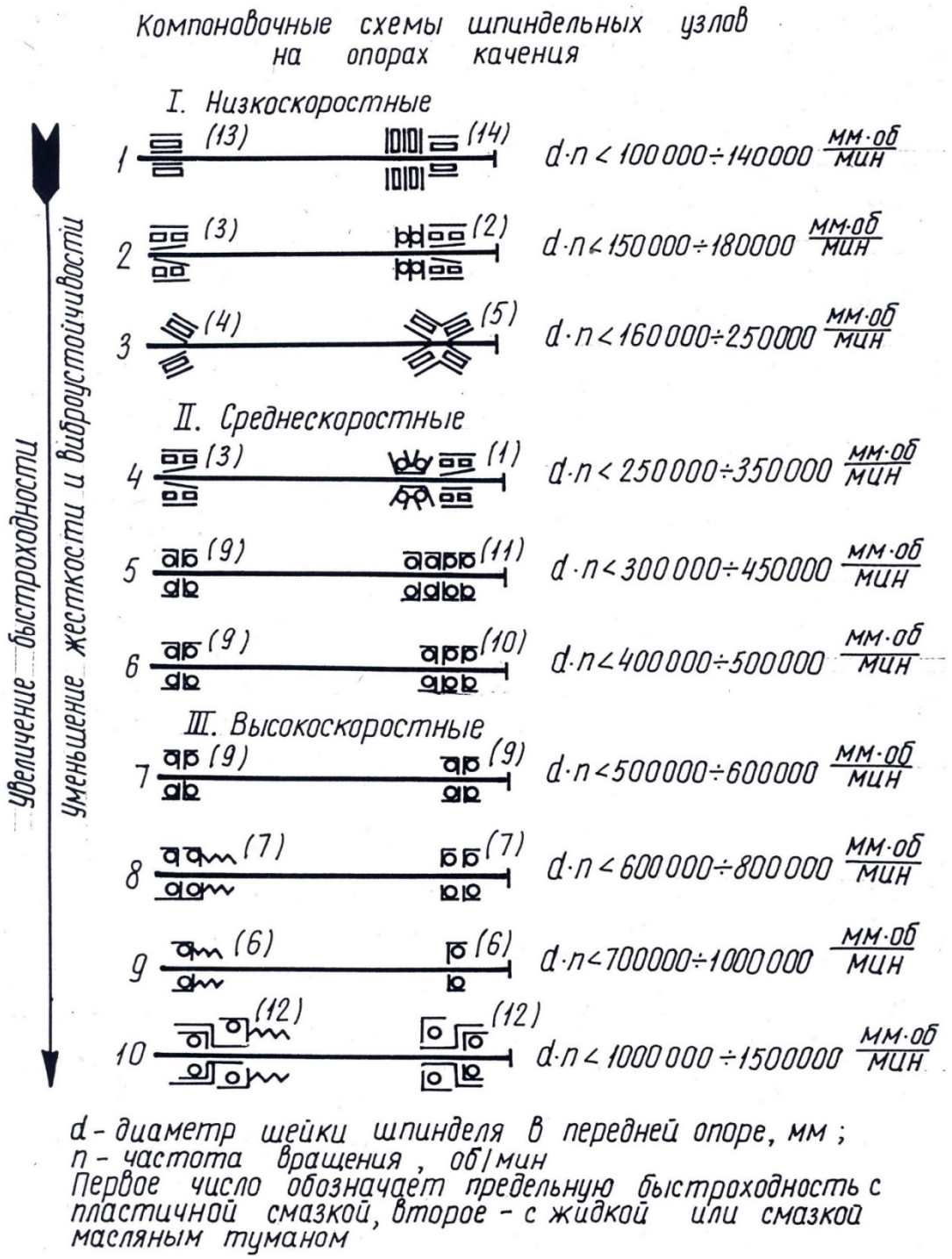


Рисунок 1 – Компоновочные схемы шпиндельных узлов на опорах качения

Низкоскоростные схемы обладают наибольшей радиальной и осевой жёсткостью, в передних опорах которых устанавливаются двухрядные роликоподшипники. Однако в паре с упорными подшипниками они дают наибольшее тепловыделение. Низкоскоростные схемы целесообразно применять в тяжелонагруженных токарных и фрезерных станках. Конструкция ШУ по схеме №1 на игольчатых роликоподшипниках представлена на рисунке 2.

Параметр быстроходности этой схемы на подшипниках типа «Дельта» фирм ИНА (ФРГ) и НАДЕЛЛА (Франция) доходит $d \cdot n \leq 4 \cdot 10^5$ мм·об/мин с жидкой циркуляционной смазкой опор.

Конструкции ШУ по схеме № 2 на двухрядных цилиндрических роликоподшипниках с коническим отверстием (конусность 1:12) типа 3182100 и 4162900 и упорными шарикоподшипниками серии 8100 представлены на рисунках 3 и 4.

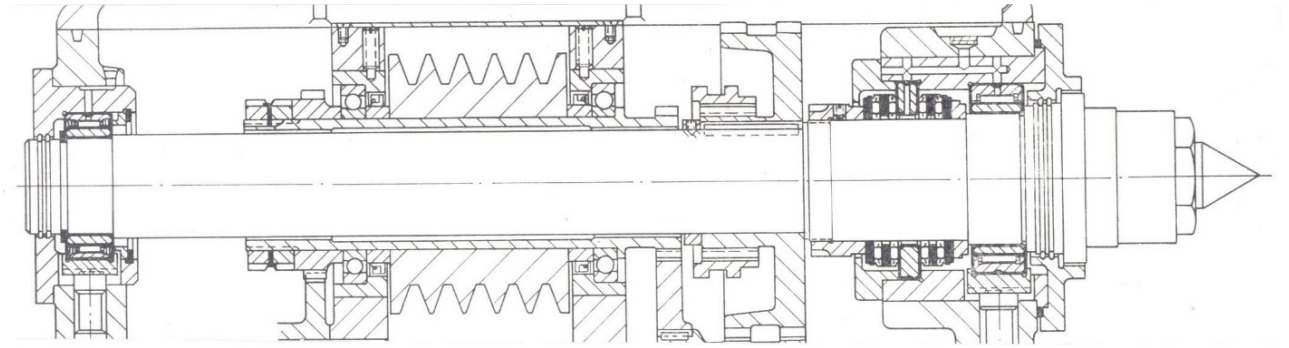


Рисунок 2 – Конструкция шпиндельного узла токарного станка на игольчатых подшипниках

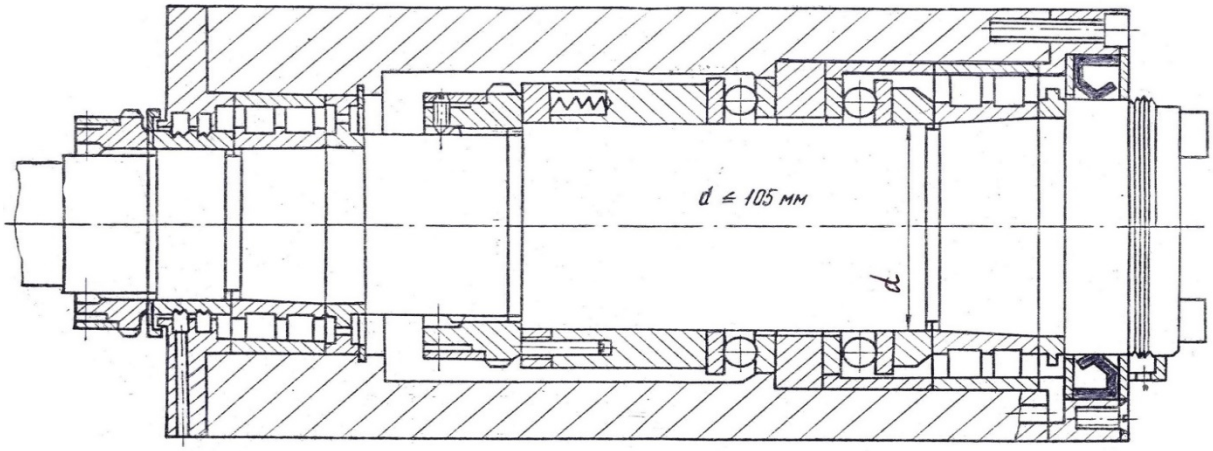


Рисунок 3 – Конструкция ШУ по схеме № 2 с элементами регулировки натяга в упорных подшипниках

На рисунке 3 представлена конструкция с диаметром передней шейки шпинделя $d \leq 105$мм. На рисунке 4 с диаметром передней шейки шпинделя $d \geq 110$мм.

Для создания гарантированного осевого преднатяга в упорных шарикоподшипниках передних опор устанавливаются подшлифовываемые при сборке подпружиненные проставочные кольца. Пружины в стаканах ставятся для сохранения натяга в упорных подшипниках в процессе их приработки и возможного износа. Каждое из колец этих подшипников обязательно должно базироваться по наружной или внутренней поверхности для исключения сползания, что может привести к увеличению тепловыделения. Отклонение от параллельности торцев этих проставочных колец должно быть не более 2 мкм.

В конструкции рисунка 3 при жидкой смазке опор или обильной подачи СОЖ в зону резания (что охлаждает передний конец шпинделя) можно применять, как показано, манжетные уплотнения без упругого кольца и предварительно приработанные по шейке шпинделя. Два варианта установки показаны на рисунке 3.

В конструкции рисунке 4 показано выполнение уплотнений опор при вертикальном расположении оси шпинделя и поддувом воздуха в переднее (нижнее) уплотнение. Для исключения попадания в опору сверху загрязнённого от зубчатых колёс масла и вытекания его опора «накрывается» зонтичным диском с внутренней стороны. Показаны два варианта выполнения конструкции зонтичного диска.

Конструкция ШУ по схеме № 3 на двухрядном коническом роликоподшипнике в передней опоре и однорядном подпружиненном (для создания натяга в передней и задней опорах) коническом роликоподшипнике в задней опоре показана на рисунке 5.

В этих ШУ целесообразно применять подшипники сверхлёгкой или особолёгкой серии с обильной жидкой смазкой опор.

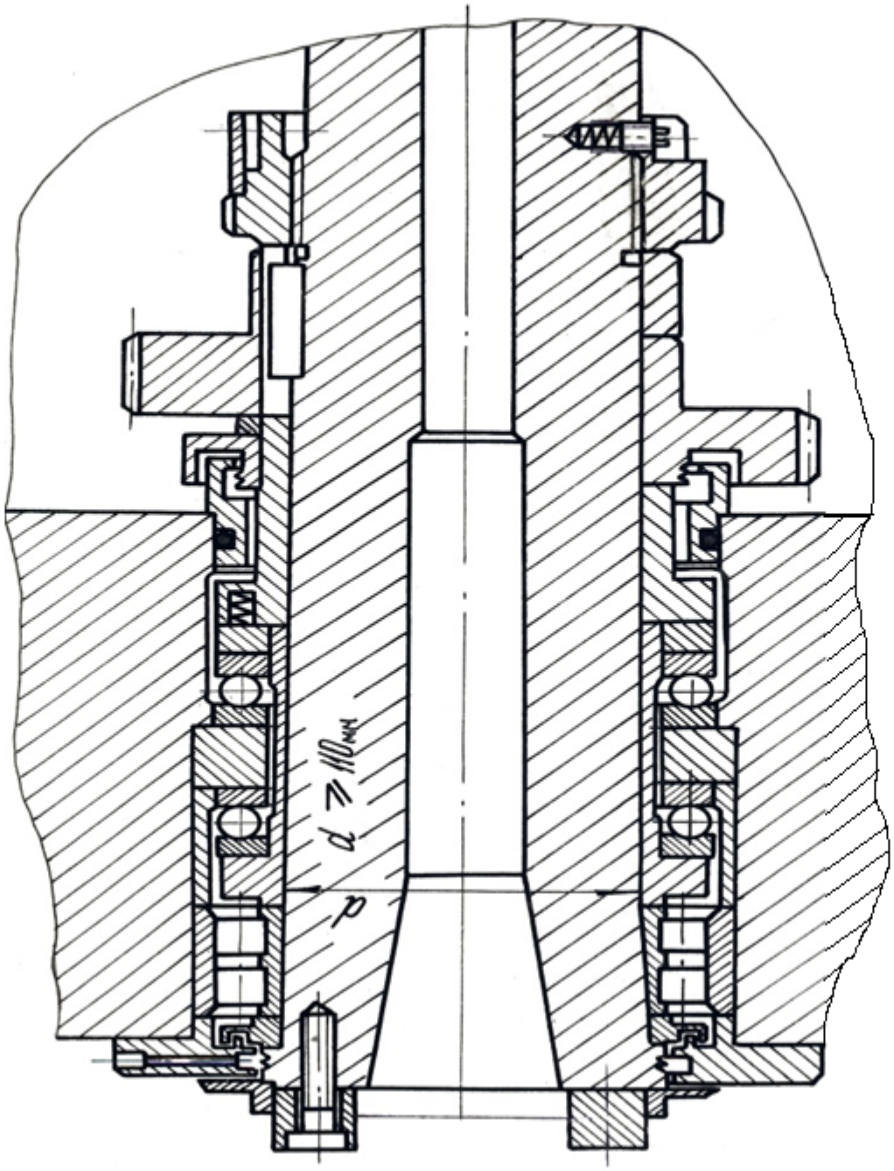


Рисунок 4 – Конструкция ШУ по схеме №2 с диаметром шпинделя в опоре ≥ 110мм. с устройством для регулирования натяга в упорных подшипниках и вариантами уплотнений в вертикальном исполнении

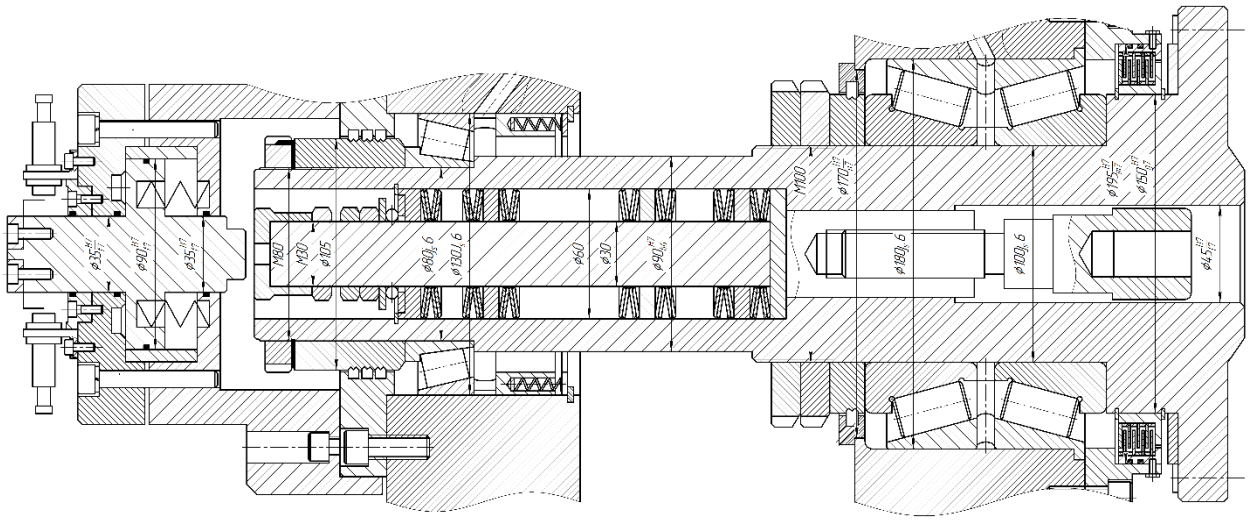


Рисунок 5 – Конструкция ШУ на конических роликоподшипниках

Среднескоростные схемы целесообразно применять в скоростных токарных, фрезерных, расточных станках, а также в шлифовальных с большим диаметром шлифовального круга: круглошлифовальных, плоскошлифовальных, торцешлифовальных станках классов точности П, В, А. Конструкция ШУ, разработанная по схеме № 4 приведена на рисунке 6.

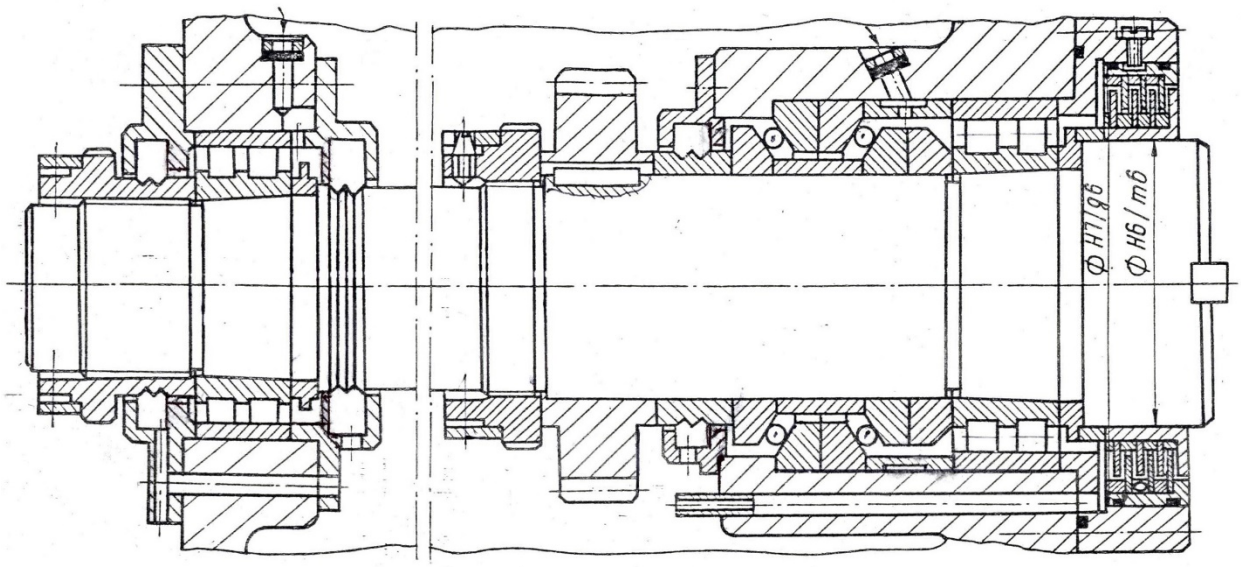


Рисунок 6 – Конструкция ШУ на двухрядных цилиндрических роликоподшипниках и упорно–радиальном шарикоподшипнике серии 178800 с углом контакта 60^0

В этой конструкции с приводным зубчатым колесом, расположенным между опорами, и смазываемым жидкой смазкой, показано как выполнять уплотнения с обеих сторон каждой опоры, для защиты от внешней среды и от попадания в опоры масла, смазывающего приводные зубчатые колёса и содержащего продукты износа этих зубчатых колёс [5]. Поэтому недопустимо смазывать подшипники опор этим загрязнённым маслом. Опоры ШУ нужно смазывать тем же но очищенным маслом. Недопустимо смазывать опоры и зубчатые колёса разными марками масел, так как у них разный химический состав и они могут входить в химическую реакцию в результате чего может выпадать твёрдая фракция на трущиеся поверхности.

Конструкции ШУ на радиально–упорных шарикоподшипниках с разным количеством и расположением подшипников в опорах схемы № 5, 6 целесообразно применять в зависимости от необходимого диаметра шпинделя, частоты вращения и допустимой температуры нагрева опор по параметру d·n. При этом ШУ на подшипниках серии 36100, 36900 с углом контакта 15 град. обеспечивают большую предельную частоту вращения, но воспринимают меньшую осевую силу. ШУ на подшипниках 46100, 46900 с углом контакта 25 град. способны воспринимать большую осевую силу резания. Опоры ШУ, выполненные по схеме 5, изготавливаются по «0»– образной схеме. Передняя опора ШУ по схеме 6 изготавливаются по «Т–0»– образной схеме, а задняя по «0»– образной схеме. Конструкция с «0»– образной схемой обеспечивает большую на 12–15% жёсткость опоры за счёт защемляющего момента по сравнению с «Х»– образной.

Высокоскоростные схемы целесообразно применять в алмазно–расточных, внутришлифовальных и других станках где требуется более высокая частота вращения, но при этом уменьшается жёсткость. Некоторые примеры конструкций ШУ приведены на рис. 7, 8, 9.

В схемах 7, 8, 9, и 10 применяют смазку опор пластичную (меньшие значения d·n) или смазку масляным туманом или смазку впрыскиванием (большие значения d·n на рисунке 1). Уплотнения на рисунке 7 приведены лабиринтные для смазки масляным туманом, который создаёт избыток давления внутри ШУ, смазывает подшипники маслом и препятствует

попаданию стружки, абразива и СОЖ в опоры, а выходя из ШУ загрязняет атмосферу цеха. При пластичной смазке опор целесообразно переднюю опору защищать лабиринтно–дисковыми уплотнениями как показано на рисунках 6, 8, 10.

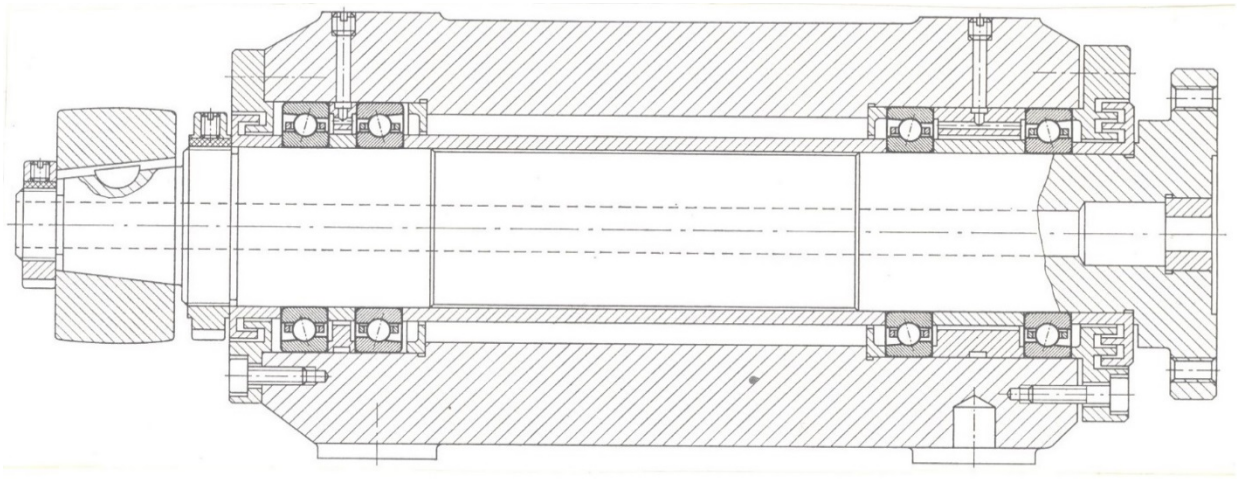


Рисунок 7 – Конструкция ШУ на радиально–упорных шарикоподшипниках (схема №7), собранных по О–образной схеме

На рисунке 8 приведена конструкция высокоскоростной внутришлифовальной головки с пластичной смазкой опор n=40.000 об/мин.(чертёж общего вида), выполненная по схеме № 8 и что особенно ценно для разработчиков приведены технические требования на изготовление и сборку, полученные в результате многолетней научно исследовательской и опытно конструкторской работы выполнявшейся под руководством С.Е. Бондаря (ЭНИМС) и нашим участием. Натяг в передней и задней опорах создаётся прорезной пружиной 16, которая достаточно жёсткая и её достаточно просто прошлифовать по торцам с отклонением от параллельности не более 2 мкм. Винты 9 позволяют регулировать преднатяг в процессе эксплуатации и фиксировать его винтом 10. В передней опоре установлено лабиринтно–дисковое уплотнение [5].

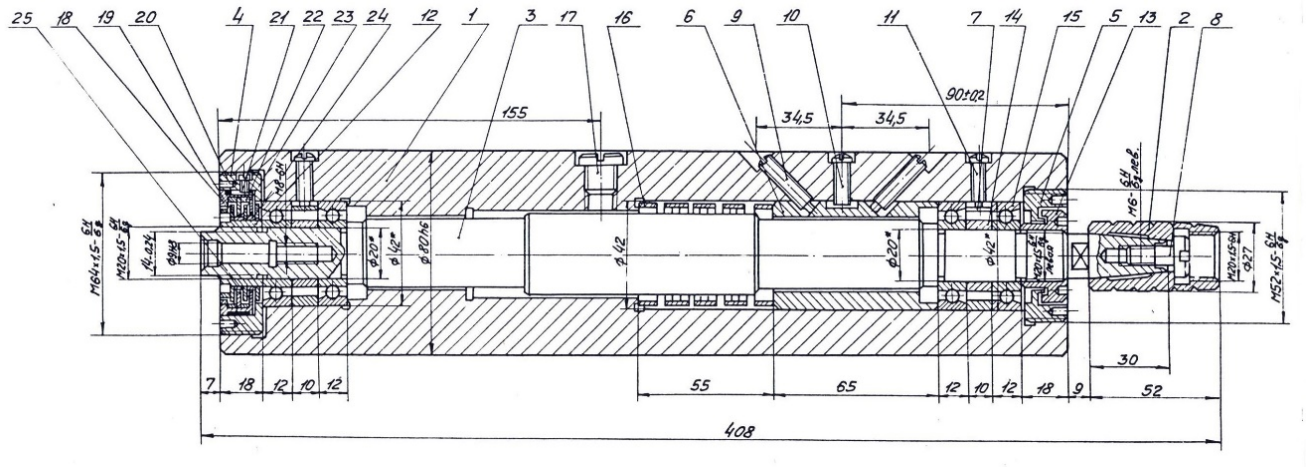


Рисунок 8 – Конструкция ШУ на радиально–упорных шарикоподшипниках (схема №8), собранных по Т–образной схеме в каждой опоре с техническими требованиями

На рисунке 9 приведена конструкция внутришлифовальной головки по схеме № 9, в которой натяг в передней и в задней опорах создаётся двумя тарельчатыми пружинами, установленными в задней опоре по последовательной схеме [8].

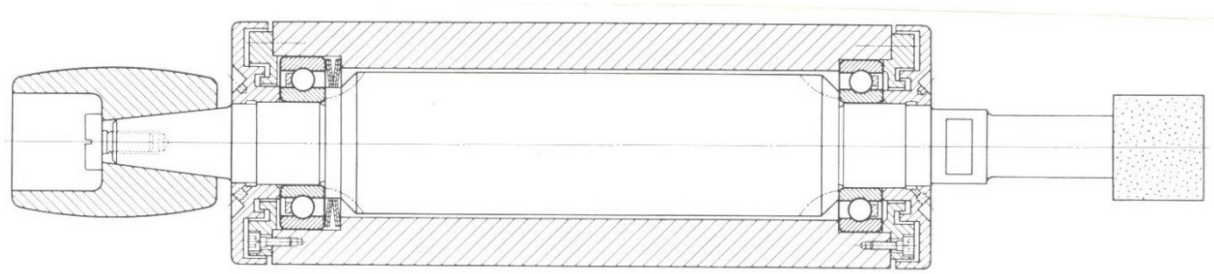


Рисунок 9 – Конструкция ШУ на радиально–упорных шарикоподшипниках (схема №9), собранных по «0»–образной схеме

На рисунке 10. Приведена конструкция внутришлифовальной головки, выполненная по схеме № 10. Эта конструкция позволяет перераспределить скорости вращения между подшипниками в каждой опоре и за счёт этого увеличить частоту вращения в 1,5 – 1,8 раза. Натяг в передней и задней опорах создаётся прорезной пружиной.

Конструкции рисунков 9 и 10 имеют наименьшую жёсткость и виброустойчивость следовательно увеличивается амплитуда вынужденных колебаний, что снижает точность обработки, но они наиболее высокоскоростные особенно со смазкой опор масляным туманом.

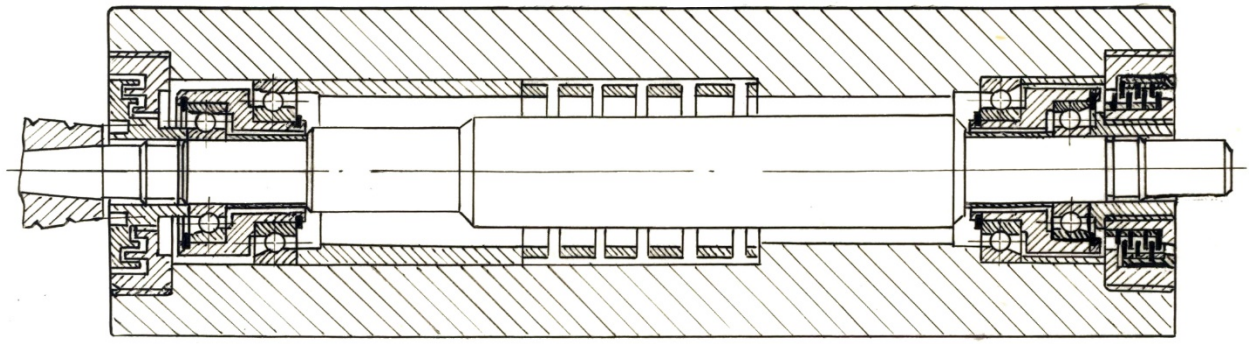


Рисунок 10 – Конструкция ШУ на радиально–упорных шарикоподшипниках (схема №10), собранных по Т–образной схеме, обладающая большей частотой вращения

Если в опорах установлены радиально –упорные шарикоподшипники с телами качения из керамических материалов и системой охлаждения параметры быстроходности d·n повышаются до 30…40%.

Так как при расчёте длины межопорной части шпинделя с учётом защемляющего момента в передней опоре шпиндель получается достаточно коротким и толстым (что существенно повышает его радиальную жёсткость и, следовательно, виброустойчивость). То для определения радиальной жёсткости ШУ с учётом защемляющего момента в передней опоре можно пользоваться достаточно простой зависимостью (1), например, с приводом вращения шпинделя от разгруженного шкива или электрошпинделя [6]. С учётом других типов и расположения приводов вращения можно пользоваться зависимостями из работы [7].

$$C_r = \frac{1}{\left[\frac{a^3}{3\mathring{A}I_2} + \frac{\left[a(1-\varepsilon)\right]^2 l}{3\mathring{A}I_1}\right] + \left\{\left(C_{r1}\right)^{-1}\frac{(a+l)\left[a(1-\varepsilon)+l\right]}{l^2} + \left(C_{r2}\right)^{-1}(1-\varepsilon)\left(\frac{a}{l}\right)^2\right\}}, \qquad (1)$$

где a – длина переднего конца шпинделя;

E – модуль упругости материала шпинделя;

l – расстояние между опорами шпинделя;

$I_1, I_2,$ – приведенные осевые моменты инерции межопорной части и переднего конца шпинделя;

ε – коэффициент, учитывающий действие защемляющего момента в передней опоре шпинделя [4];

C_{r1}, C_{r2} – радиальная жёсткость передней и задней опор ШУ.

Для ориентировочной оценки радиальной жёсткости ШУ в зависимости от номера компоновочной схемы можно пользоваться номограммой (рисунок 11), где по оси ординат справа номера компоновочных схем и радиальный зазор–натяг в подшипниках. По оси абсцисс диаметр шпинделя в передней опоре. Слева по оси ординат радиальная жёсткость ШУ.

Большое значение на работоспособность станков оказывает виброустойчивость ШУ, которая оценивается по предельной стружке. При проектировании при сравнительной оценке виброустойчивости ШУ можно пользоваться результатами расчётов собственных частот колебаний и амплитуд колебаний (особенно первой формы колебаний). С целью оценки разных методик расчетов были просчитаны конструкции ШУ как одномассовые системы и как двухмассовые.

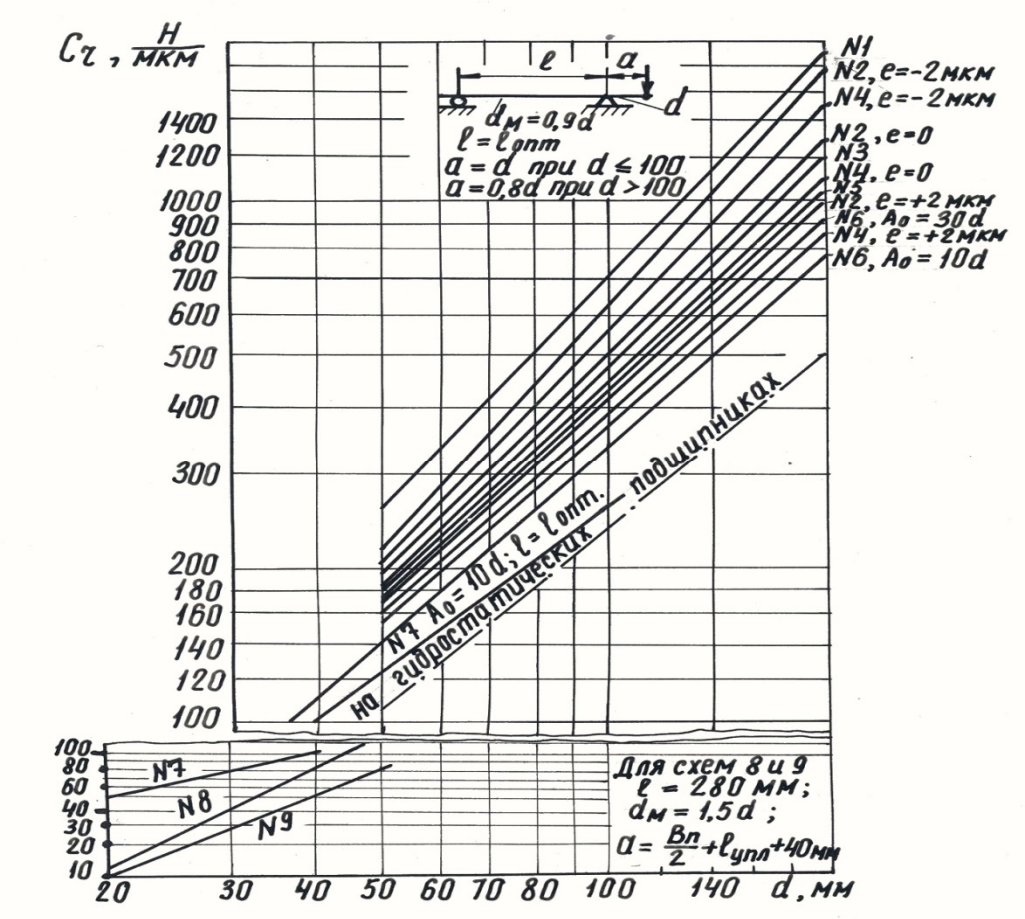


Рисунок 11 – Радиальная жёсткость шпиндельных узлов, выполненных по компоновочным схемам, приведённым на рисунке 1

Было проведено сравнение рассчитанных первой собственной частоты колебаний ШУ как одномассовой системы по зависимости (2) и как двухмассовой системы по зависимости (3).

$$\omega_{1C} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{m_1 K_{11}}}, \text{ Гц} \qquad (2)$$

где m_1 – приведенная масса;

K_{11} – податливость системы в точке приложения массы m_1.

Зависимость (3) была получена для системы с двумя, приведёнными к переднему концу шпинделя массам на основе приближённой формулы Данкерлея с использованием зависимости (1). По ней рассчитываются 1я и 2я собственные частоты колебаний.

$$\omega_{1,2C} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2}{(m_1K_{11}+m_2K_{22}) \pm \sqrt{(m_1K_{11}-m_2K_{22})^2 + 4m_1m_2K_{12}^2}}}\ ,\ \text{Гц}, \qquad (3)$$

где $K_{11} = \frac{b^2(l-b)^2}{3EI_1 \cdot l} + \frac{l-b}{Cr_1 \cdot l} + \frac{b}{l^2}\left(\frac{b}{Cr_2} - \frac{l-b}{Cr_1}\right)$ при $\frac{b}{Cr_2 l} \geq \frac{l-b}{Cr_1 l}$;

$K_{11} = \frac{b^2(l-b)^2}{3EI_1 \cdot l} + \frac{b}{Cr_2 l} + \frac{l-b}{l^2}\left(\frac{l-b}{Cr_1} - \frac{b}{Cr_2}\right)$ при $\frac{b}{Cr_2 l} < \frac{l-b}{Cr_1 l}$;

$$K_{22} = \left[\frac{C^3}{3EI_3} + \frac{C^2 \cdot a}{EI_2} + \frac{C \cdot a^2}{EI_2} + \frac{a^3}{3EI_2} + \frac{(a+C)^2 \cdot l(1-\varepsilon)}{3EI_1}\right] +$$

$$+ \frac{1}{Cr_1}\left[\frac{(a+C)(1-\varepsilon)+l}{l}\right]^2 + \frac{(1-\varepsilon)}{Cr_2} \cdot \left(\frac{a+C}{l}\right)^2 + \frac{a}{GF_K} + \frac{a^2(1-\varepsilon)}{GF_M l_M} + \frac{C}{GF_б},$$

где b – длина от передней опоры до приводного зубчатого колеса, расположенного между опорами;

C – длина борштанги (заготовки);

$F_б$ – площадь сечения борштанги (заготовки);

$$K_{12} = \frac{(a+C) \cdot b \cdot (l-b)}{6EI_1 \cdot l^2}\left[3b(l-b) + b^2 + 2(l-b)^2\right] + \Delta on;$$

$$\Delta_{оп} = \begin{cases} \dfrac{y_n(l-b) - y_з \cdot b}{l} & \text{при } b < C \\ 0 & \text{при } b = C \\ -\dfrac{b(y_n + y_з) - y_n \cdot l}{l} & \text{при } b > C \end{cases};$$

$$C = \frac{y_n \cdot l}{y_n + y_з};\ \ y_n = \frac{a+C+l}{Cr_1 \cdot l};\ \ y_з = \frac{a+C}{Cr_2 \cdot l};$$

m_1 – приведенная масса заднего конца и между опорами шпинделя;

m_2 – приведенная масса переднего конца шпинделя и масса патрона, или фланца, борштанги, шлифовального круга.

Результаты расчётов первой собственной частоты колебаний шпиндельного узла по зависимости (2) и (3) отличаются в пределах 5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лизогуб, В.А. Проектирование компоновочных схем шпиндельных узлов на опорах качения / В.А. Лизогуб, А.Ю. Проворов. – М.: «СТИН». – 1995. – № 12. –С. 13–16.

2. Лизогуб, В.А. Конструирование и расчёт шпиндельных узлов на опорах качения / В.А. Лизогуб // Станки и инструмент.– 1980. – № 5. – С. 18–20.

3. Лизогуб, В.А. Выбор места установки упорных подшипников в шпиндельных узлах шлифовальных станков / В.А. Лизогуб // Обработка материалов резанием. – М.: ВЗМИ. – 1976. – С. 124–132.

4. Лизогуб, В.А. Научные основы конструирования и технологии шпиндельных узлов металлорежущих станков / В.А. Лизогуб. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 127с.

5. Лизогуб В.А., Кушнир А.П. Выбор уплотнений опор качения шпиндельных узлов станков / В.А. Лизогуб, А.П. Кушнир. – М.: Станки и инструмент. – 1991. –№ 5. – С. 18–20.

6. Лизогуб, В.А. Уточнённый расчёт деформаций мехатронного шпиндельного узла с борштангой (заготовкой, установленной в патроне) и их влияние на точность обработки шпинделя / В.А. Лизогуб // Мехатроника, робототехника, автоматизация. Сборник научных трудов 1 Всероссийской научно–технической интернет–конференции. М.: МГУПИ. – 2007. – С. 82–88.

7. Лизогуб, В.А. Уточнённый расчёт деформаций шпиндельного узла с заготовкой, установленной в патроне и заднем центре и их влияние на точность обработки с разным расположением привода вращения

шпинделя / В.А. Лизогуб // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды II международной научной конференции. – М.: ИМАШ РАН. – 2012. – С. 261–267.

8. Каталоги инофирм SKF, FAG, TIMKEN, BARDEN, SNFA, KOUO, FAFNIR.

Лизогуб Вадим Андреевич
МГТУ Информационных технологий,
радиотехники и электроники, д.т.н., профессор кафедры КБ 5
119454, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78
Тел.: 8–495–343–46–29
E–mail:lizogubva@mail.ru

V.A. LIZOGUB

PECULIARITIES IN THE DESIGN OF SPINDLES FOR ROLLING BEARINGS OF MACHINE TOOLS

In this paper we propose a design method of spindle units on rolling bearings for machine tools. The method includes the selection of the layout scheme of SHU from different bearings and choice of design elements for different machines according to the criteria of adaptability, maximum rigidity and vibration resistance with a given accuracy.

Keywords: *spindle Assembly; bearings; configuration; metal cutting machines.*

BIBLIOGRAPHY

1. Lizogub, V.A. Proyektirovaniye komponovochnykh skhem shpindelnykh uzlov na oporakh kacheniya / V.A. Lizogub, A.YU. Provorov. – M.: «STIN». – 1995. – № 12. –S. 13–16.

2. Lizogub, V.A. Konstruirovaniye i raschot shpindelnykh uzlov na oporakh kacheniya / V.A. Lizogub // Stanki i instrument.– 1980. – № 5. – S. 18–20.

3. Lizogub, V.A. Vybor mesta ustanovki upornykh podshipnikov v shpindelnykh uzlakh shlifovalnykh stankov / V.A. Lizogub // Obrabotka materialov rezaniyem. – M.: VZMI. – 1976. – S. 124–132.

4. Lizogub, V.A. Nauchnyye osnovy konstruirovaniya i tekhnologii shpindelnykh uzlov metallorezhushchikh stankov / V.A. Lizogub. – M.: Nauchtekhlitizdat, 2002. – 127s.

5. Lizogub V.A., Kushnir A.P. Vybor uplotneniy opor kacheniya shpindelnykh uzlov stankov / V.A. Lizogub, A.P. Kushnir. – M.: Stanki i instrument. – 1991. –№ 5. – S. 18–20.

6. Lizogub, V.A. Utochnonnyy raschot deformatsiy mekhatronnogo shpindelnogo uzla s borshtangoy (zagotovkoy, ustanovlennoy v patrone) i ikh vliyaniye na tochnost obrabotki shpindelya / V.A. Lizogub // Mekhatronika, robototekhnika, avtomatizatsiya. Sbornik nauchnykh trudov 1 Vserossiyskoy nauchno–tekhnicheskoy internet–konferentsii. M.: MGUPI. – 2007. – S. 82–88.

7. Lizogub, V.A. Utochnonnyy raschot deformatsiy shpindelnogo uzla s zagotovkoy, ustanovlennoy v patrone i zadnem tsentre i ikh vliyaniye na tochnost obrabotki s raznym raspolozheniyem privoda vrashcheniya shpindelya / V.A. Lizogub // Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii. Nauchnyye trudy II mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. – M.: IMASH RAN. – 2012. – S. 261–267.

8. Katalogi inofirm SKF, FAG, TIMKEN, BARDEN, SNFA, KOUO, FAFNIR.

Lizogub Vadim Andreevich
Moscow state technical University of Information technologies,
radio engineering and electronics, doctor of technical Sciences, Professor of the Department KB5
119454, Moscow, prospect Vernadskogo, 78
Tel.: 8–495–343–46–29
E–mail:lizogubva@mail.ru

УДК 69.059.324.5 – 219.3: 69.056.53

В.И. КОНОПЛЕВ, В.Ю. АНЦЕВ, С.А. БАШКИН

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ РАБОТ

Рассмотрено устройство, используемое для временного закрепления и установки в проектное положение стеновых панелей при монтаже крупнопанельных зданий. Предлагаемое устройство позволяет снизить трудоемкость установки и снятия подкоса, по сравнению с инвентарными приспособлениями, применяемыми при закреплении стеновых панелей.

Ключевые слова: *технологическая оснастка, подкос, захват, штанга, муфта.*

При монтаже крупнопанельных зданий широко используются инвентарные приспособления для временного закрепления в проектное положение стеновых панелей [1, 2]. Недостатком таких приспособлений является невозможность быстрого производства монтажа панелей. Поэтому временное крепление стеновых панелей при монтаже крупнопанельных зданий инвентарными приспособлениями малоэффективно. С целью повышения эффективности и снижения трудоемкости при монтаже предложен подкос для временного закрепления стеновых панелей [3], включающий штангу со стяжным устройством, нижние и верхние захваты, закрепленные на штанге.

Общий вид представленного подкоса для временного закрепления стеновых панелей приведен на рисунке 1; на рисунке 2 – вид А на подкос; на рисунке 3 – сечение Б–Б и В–В верхнего захвата (рисунок 2), кулачок и расположение кулачка на штанге подкоса.

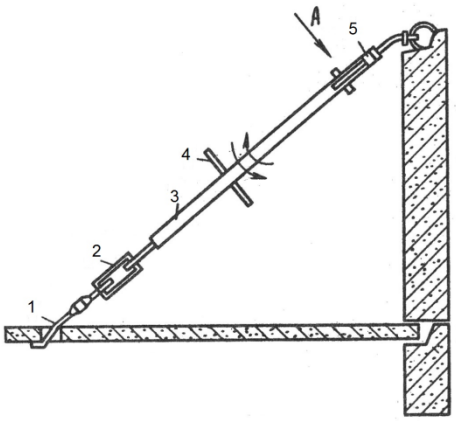


Рисунок 1 – Подкос для временного закрепления стеновых панелей (общий вид)

Подкос состоит из штанги 3 со стяжной муфтой 2, нижнего 1 и верхнего 5 захватов, закрепленных на штанге 3. На штанге закреплена рукоять 4, служащая для управления верхним захватом 5. Верхний захват 5 выполнен в виде клещей 6 с рабочими 7 и свободными концами 11. Свободные концы 11 подпружинены пружинами 8 и шарнирно закреплены в радиусных направляющих 9 штанги 3 сухарями 10. С внутренней стороны свободных концов 11 выполнены клиновые пазы 12 с входящим в них кулачком 13, жестко закрепленным на штанге 3. Кулачок 13 выполнен в виде эллипса, на противоположных концах которого по большей оси выполнены два клиновых обратных профиля 14 и 15.

Для закрепления захвата 5 за подъемную петлю панели заводят рабочие концы 7 клещей 6 и штангу 3 с помощью рукоятки 4 и поворачивают штангу 3 по часовой стрелке относительно продольной оси на четверть оборота. В результате этого свободные концы 11 клещей 6 с помощью кулачка 13 расходятся, кулачок 13 заклинивается профилями 14 и 15 в клиновых пазах 12 клещей, пружины 8 растягиваются, а рабочие 7 концы клещей 6 сходятся и зажимают петлю панели.

Для разъединения захвата штангу 3 с помощью рукоятки 4 поворачивают против часовой стрелки относительно продольной оси на четверть оборота. В результате этого свободные концы 11 клещей 6 с помощью пружин 8 сходятся, а рабочие концы 7, наоборот, расходятся и освобождают захват от петли.

Для изготовления представленного подкоса необходимо разработать инженерную расчетную методику. Расчет сжатых (растянутых) элементов подкосов необходимо производить из условия прочности и устойчивости от ветровой нагрузки (рисунок 4).

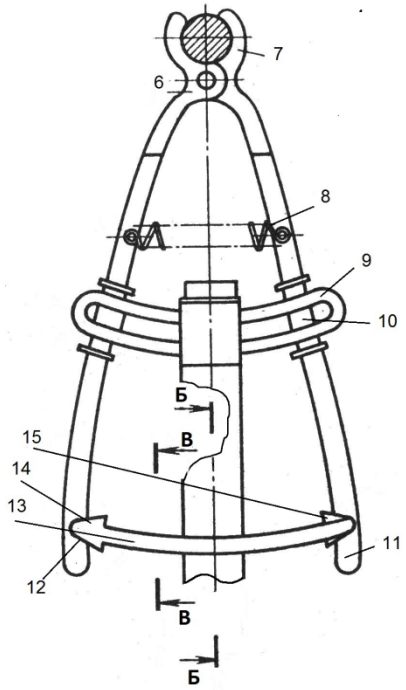


Рисунок 2 – Подкос для временного закрепления стеновых панелей (вид А):
1,5 – захваты; 2 – стяжная муфта; 3 – штанга; 4 – рукоять; 6 – клещи; 7,11 – рабочие и свободные концы клещей; 8 – пружина; 9 – направляющие; 10 – сухари; 12 – клиновые пазы; 13 – кулачок; 14,15– клиновые профили

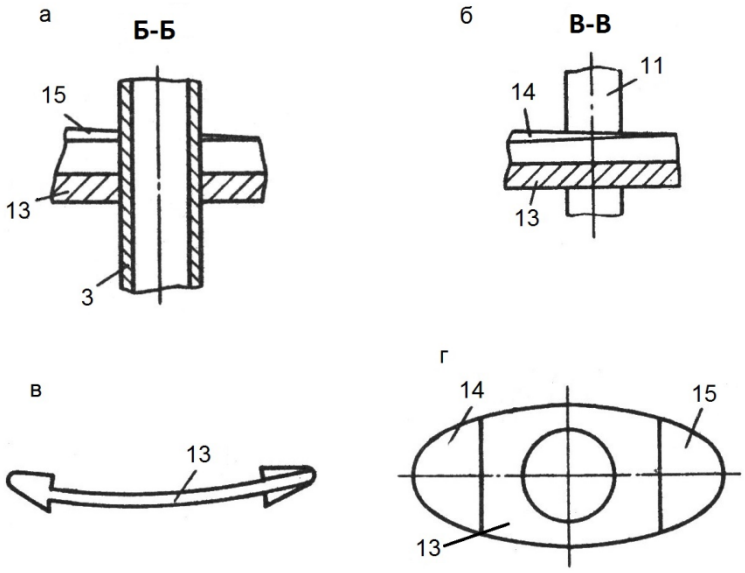


Рисунок 3 – Подкос для временного закрепления стеновых панелей:
а – схема расположения прямого профиля кулачка относительно левого свободного конца клещей (сеч. Б–Б, рисунок 2); б – схема расположения обратного профиля кулачка относительно правого свободного конца клещей (сеч. В–В, рисунок 2); в – кулачек; г – схема расположения кулачка на штанге подкоса

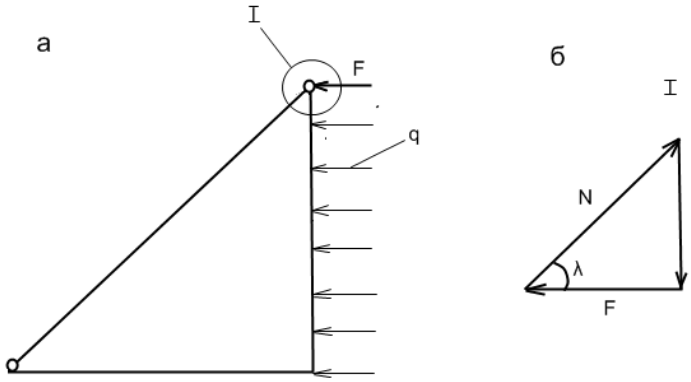


Рисунок 4 – Расчетная схема подкоса для временного закрепления стеновых панелей:
а – ветровая нагрузка, действующая на стеновую панель; б – графическое определение усилия в штанге подкоса от действия ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка (ГОСТ 1451–77) вызвана давлением ветра на стеновые панели, которую воспринимают подкосы. При расчетах учитывают статическую составляющую этого давления.

Ветровая нагрузка определяется по формуле [4]:

$$F = q \cdot k \cdot c \cdot n \cdot A,$$

где q – динамическое давление ветра, МПа;

k – коэффициент, учитывающий изменение динамического давления по высоте;

c – коэффициент аэродинамической силы (аэродинамический коэффициент);

A – расчетная площадь стеновой панели, м^2;

n – коэффициент перегрузки крана, равный для нерабочего состояния крана $n = 1{,}1$; для рабочего – $n = 1{,}0$.

Значения q соответствуют давлению и температуре воздуха соответственно 0,1 МПа и 15°С.

Расчетные сопротивления металлоконструкций из проката или труб для различных видов напряженного состояния и в зависимости от коэффициента неоднородности материала γ_m при растяжении–сжатии:

$$R_y = R_{yn} / \gamma_m ,$$

где R_{yn} – предел текучести стали разрыву.

При расчете на прочность элементов металлоконструкций, подверженных центральному растяжению или сжатию под действием силы *N*, следует выполнять следующее условие:

$$\frac{N}{A_н} \le R_y \gamma_c ,$$

где $A_н$ – площадь сечения элемента с учетом местных ослаблений, м^2;

γ_c – коэффициент условий работы металлоконструкций.

При расчете на устойчивость сплошностенчатых элементов, нагруженных центральной силой *N,* следует выполнять следующее условие:

$$\frac{N}{\varphi A_{бр}} \le R_y \gamma_c ,$$

где $A_{бр}$ – площадь сечения элемента без учета местных ослаблений, м^2;

φ – коэффициент устойчивости (снижения расчетного сопротивления при центральном сжатии).

Значения φ принимают по данным СНиП 11–23–81 или по рисунку 5 с учетом расчетного сопротивления материала и гибкости элемента

$$\lambda_{ef} = \frac{l_{ef}}{i} ,$$

где l_{ef} – расчетная длина элемента, м;

i – радиус инерции сечения элемента, м.

Для элементов трубчатого сечения при $l_{ef} < 95 \ldots 115$ значения φ следует умножить на поправочный коэффициент k, определяемый по рисунку 5.

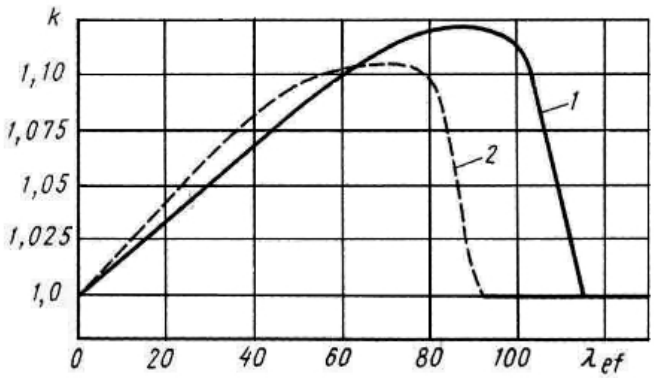


Рисунок 5 – Поправочный коэффициент φ для трубчатых элементов:
1 – при R_y= 200…240 МПа; 2 – при R_y= 280 МПа

При определении l_{ef} следует учитывать характер изменения сечения элемента по его длине, а также степень податливости концевых креплений элемента.

Использование устройства позволит снизить трудоемкость установки и снятия подкоса по сравнению с инвентарными приспособлениями, применяемыми при закреплении стеновых панелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 998707 СССР, МПК В65Д88/70. Подкос для временного закрепления стеновых панелей / Коноплев В.И., Шестаков В.А., Конов А.Г., Петров В.И.; заявитель и патентообладатель Тульск. госуд. ун–т. – №3304244/29; заявл. 19.06.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7. – 3 с.

2. Коноплев, В.И. Устройство для установки стеновых панелей в проектное положение / В.И. Коноплев, В.И. Ануфриев, А.Б. Куренев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5–2 (283). – С. 111–117.

3. А.с. № 1006681 СССР, МПК В65Д88/70. Подкос для временного закрепления и установки в проектное положение стеновых панелей / Коноплев В.И., Шестаков В.А., Конов А.Г.; заявитель и патентообладатель Тульск. госуд. ун–т. – №3303575/29; заявл. 18.06.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11. –3 с.

4. Абрамович, И.И. Грузоподъемные краны промышленных предприятий: справочник / И.И. Абрамович, В.Н. Березин, А.Г. Яуре. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.

Коноплев Василий Иванович
Тульский государственный университет, г. Тула
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно–транспортные машины и оборудование»
E–mail: konoplev@tsu.tula.ru

Анцев Виталий Юрьевич
Тульский государственный университет, г. Тула
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Подъемно–транспортные машины и оборудование»
E–mail: anzev@tsu.tula.ru

Башкин Сергей Александрович
Тульский государственный университет, г. Тула
Студент кафедры «Подъемно–транспортные машины и оборудование»
E–mail: bashkin@tsu.tula.ru

V.I. KONOVALOV, V.Yu. ANTSEV, S.A. BASHKIN

PRODUCTION TOOLING FOR SPECIAL WORKS

The device used for time fastening and installation in design position of panels of walls at installation of large–panel buildings is considered. The offered device allows to lowerlabour input of installation and removal of basic cores, in comparison with the inventory adaptations applied at fastening of panels of walls.

Keywords: *production tooling, basic core, capture, bar, clutch.*

BIBLIOGRAPHY

1. A.s. № 998707 SSSR, MPK V65D88/70. Podkos dlya vremennogo zakrepleniya stenovykh paneley / Konoplev V.I., Shestakov V.A., Konov A.G., Petrov V.I.; zayavitel i patentoobladatel Tulsk. gosud. un–t. – №3304244/29; zayavl. 19.06.81; opubl. 23.02.83, Byul. № 7. – 3 s.

2. Konoplev, V.I. Ustroystvo dlya ustanovki stenovykh paneley v proyektnoye polozheniye / V.I. Konoplev, V.I. Anufriyev, A.B. Kurenev // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – № 5–2 (283). – S. 111–117.

3. A.s. № 1006681 SSSR, MPK V65D88/70. Podkos dlya vremennogo zakrepleniya i ustanovki v proyektnoye polozheniye stenovykh paneley / Konoplev V.I., Shestakov V.A., Konov A.G.; zayavitel i patentoobladatel Tulsk. gosud. un–t. – №3303575/29; zayavl. 18.06.81; opubl. 23.03.83, Byul. № 11. –3 s.

4. Abramovich, I.I. Gruzopod»yemnyye krany promyshlennykh predpriyatiy: spravochnik / I.I. Abramovich, V.N. Berezin, A.G. Yaure. – M.: Mashinostroyeniye, 1989. – 360 s.

Konoplev Vasily Ivanovich
Tula State University, Tula
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor «Handling machinery and equipment»
E–mail: konoplev@tsu.tula.ru

Anzev Vitaly Yurevich
Tula State University, Tula
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department»Handling machinery and equipment»
E–mail: anzev@tsu.tula.ru

Bashkin Sergey Alexandrovich
Tula State University, Tula
Student of «Handling machinery and equipment»
E–mail: bashkin@tsu.tula.ru

УДК 621.941.2/31.001.63.002.5:331.101.68

Т.С. ПРОКОШИНА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАДИУСА ВРАЩАТЕЛЬНОЙ РУКОЯТКИ И ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО СТАНКА

Получены линейные зависимости оптимальных радиуса рукоятки R и параметров размещения ее центра вращения относительно плечевого сустава оператора–станочника H и L, от величины момента сил сопротивления вращению $M_{тр}$ для рукояток с частотой использования 960…241 и 240…17 раз в смену. Выявленные зависимости могут быть применены в практике проектирования производственного оборудования с целью оптимизации трудовой деятельности оператора и повышения эффективности его работы.

Ключевые слова: *орган управления, вращательная рукоятка, размещение органа управления, оператор–станочник, момент сил сопротивления вращению.*

Одним из подходов в обеспечении совместимости элементов системы «оператор – металлообрабатывающий станок» органы управления и оператор–станочник есть максимальное приспособление параметров машины к особенностям и возможностям человека, т.е. проектирование рациональных с физиологической точки зрения форм и оптимального размещения органов управления, посредством которых осуществляется взаимодействие человека и оборудования.

В настоящее время основные принципы конструирования органов управления производственного оборудования, касающиеся их выбора и размещения, обязательно учитывают эргономические требования. При проектировании формы, размера и расположения органов управления в первую очередь необходимо принимать во внимание антропометрические параметры [1, 2].

В конструкции многих машин и оборудования, в том числе в конструкциях металлорежущих станков, широко применяется такой вид органа управления, как маховик, приводимый в движение вращением за горизонтальную рукоятку (в дальнейшем – рукоятка). Проектирование размеров и размещения такого вида органа управления составляет определенную проблему, которой занимаются конструкторы и ученые [3–7]. Общие эргономические требования к форме и размерам маховиков и штурвалов установлены ГОСТ 21752–76 [8]. В силу того, что при проектировании и выборе формы, размеров и пространственного размещения органов управления необходимо учитывать влияние множества переменных факторов, то обобщенных теоретических моделей, зависимостей или рекомендации не предложено. Поэтому в данной работе теоретически обоснуем зависимость радиуса вращения рукоятки R и параметров ее размещения H и L относительно плечевого сустава оператора–станочника, от величины момента сил сопротивления вращению $M_{тр}$.

Теоретическое исследование работы оператора–станочника, управляющего металлообрабатывающим станком посредством вращательной рукоятки, рассмотрены нами с позиции биомеханики в работе [9]. Для выполнения расчетов построена кинематическая схема (рисунок 1), моделирующая работу станочника с рукояткой, вращение которой осуществляется всей рукой (в совместную работу включены мышцы кисти, предплечья и плеча). При этом были введены допущения: кисть и предплечье рассматриваются как одно целое; плечевой сустав неподвижен; момент сил сопротивления вращению рукоятки есть величина постоянная.

В ходе кинематического расчета получены зависимости углов α и β от угла поворота рукоятки φ и параметров H, L, определяющих положение центра вращения O относительно плечевого сустава D. Далее были найдены мгновенные угловые скорости предплечья ω_1 и плеча ω_2 (формула 1, 2), угловое ускорение плеча ε_2 (формула 3) [9].

$$\omega_1 = \frac{\omega R}{l_1} \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega R}{l_2} \cdot \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega R}{l_2 \cos^2(\alpha+\beta)} \cdot [(\omega_1 + \omega_2) \cdot \sin(\alpha+\beta) \cdot \cos(\varphi-\alpha) + \\ + (\omega_1 - \omega)\sin(\varphi-\alpha)\cos(\alpha+\beta)] \quad (3)$$

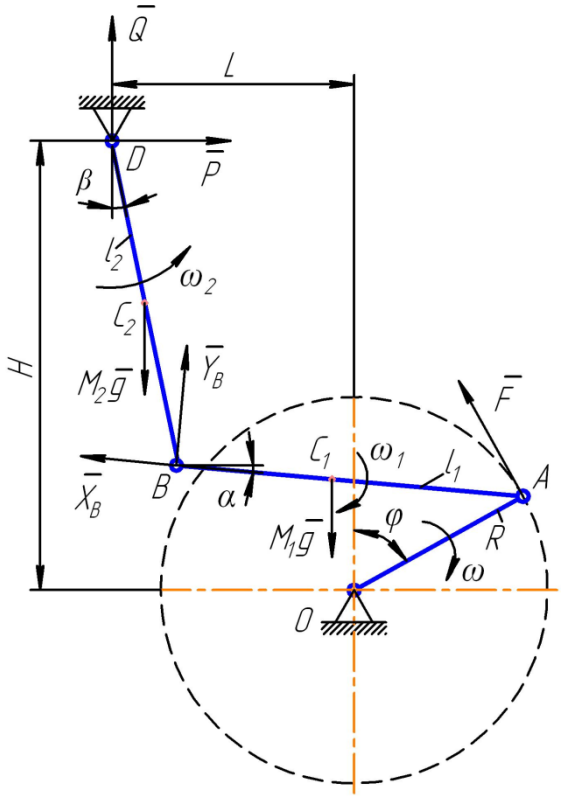


Рисунок 1 – Кинематическая схема:
O – центр вращения рукоятки; B – локтевой сустав; D – плечевой сустав; A – рукоятка; R – радиус вращения рукоятки; C_1, C_2 – центра масс предплечья и плеча соответственно; M_1, M_2 – масса предплечья и плеча соответственно; φ – угол поворота рукоятки, α – угол, образуемый предплечьем и горизонталью; β – угол, на который отклоняется плечо от вертикали; l_1 и l_2 – длина предплечья и плеча соответственно; ω – угловая скорость вращения рукоятки; H и L – параметры, определяющие размещение центра вращения рукоятки относительно плечевого сустава, соответственно вертикальное и горизонтальное расстояние

На основе полученных формул установлены зависимости горизонтальной P и вертикальной Q сил, действующих в плечевом суставе оператора при вращении рукоятки (формула 4, 5). При расчетах учитывали, что направленная перпендикулярно к плечевому суставу оператора–станочника сила P стремится опрокинуть тело, выводя его из состояния равновесия. Человек пытается сохранить прежнее положение путем сокращения скелетных мышц, что сопровождается энергетическими затратами и вызывает утомление. Сопротивляясь силе Q, стремящейся приподнять плечевой сустав, человек использует вес собственного тела. Учитывая изложенное, предположили, что наилучшими условиями труда являются условия при которых опрокидывающая горизонтальная сила P воздействует минимально.

$$P = -X_B \cos\alpha - F^u_{X1} + Y_B \sin\alpha \quad (4)$$

где X_B – горизонтальная сила, действующая на локтевой сустав, Н;
F^u_{X1} – сила инерции, Н;
Y_B – вертикальная сила, действующая на локтевой сустав, Н.

$$Q = X_B \sin\alpha + Y_B \cos\alpha + M_2\left[g - \frac{l_2}{2}\left(\varepsilon_2 \sin\beta + \omega_2^2 \cos\beta\right)\right], \quad (5)$$

$$F^u_{X1} = \frac{1}{2} M_2 l_2 \left(-\varepsilon_2 \cos\beta + \omega_2^2 \sin\beta\right), \quad (6)$$

$$X_B = M_1\left[\omega^2 R\sin(\varphi-\alpha)-\omega_1^2\frac{l_1}{2}+g\sin\alpha\right]-F\cos(\varphi-\alpha), \quad (7)$$

$$Y_B = \frac{1}{2}F\sin(\varphi-\alpha)+\frac{M_1}{4}\left[g\cos\alpha-\omega^2 R\cos(\varphi-\alpha)\right] \quad (8)$$

Используя полученные формулы, с помощью программного комплекса Mathcad, определили характер изменения сил Q и P, действующих на плечевой сустав оператора, в зависимости от переменных H, L, R и φ. Для этого задали пределы изменения переменных: H = 10…40 см, L = 30…60 см, R = 10…24 см. Принимали постоянными значения: M_1 = 1,783 кг, M_2 = 2,16 кг [10]; l_1 = 32,39 см, l_2 = 33,61 см – значения 50–го перцентиля [11]; ω = 6,28 рад/сек.; F = 10 Н.

В результате установили, что силы P и Q зависят от переменных H, L, R и φ. Так, сила P в интервале изменения угла φ от 0 до 2π несколько раз изменяет направление действия (рисунок 2). На рисунке 2 также видно, что максимум силы Q и минимум силы P имеют место при углах поворота рукоятки φ = 2,2…3,2 рад. В этом интервале угла φ сила P имеет отрицательное значение и оказывает максимальное опрокидывающее воздействие, а сила Q максимально приподнимает плечевой сустав. Причем при больших значениях радиуса вращения рукоятки R сила P минимальна для φ = 2,4...3,2 рад., при меньших – φ = 2,2...2,8 рад.

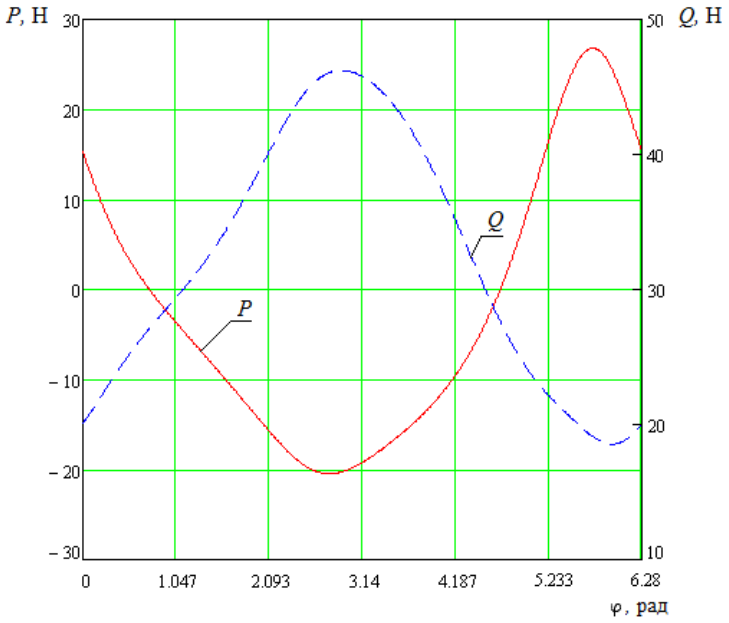


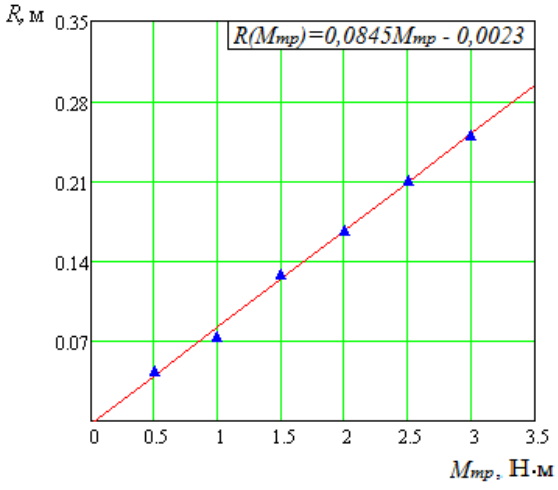
Рисунок 2 – Зависимости сил, действующих в плечевом суставе, от угла поворота рукоятки

Принимая во внимание, что при определенных значениях угла φ силы P и Q оказывают минимальное воздействие, провели исследования функции $P(\varphi, H, L, R, F)$ для определения взаимосвязи радиуса рукоятки R и параметров H и L размещения центра ее вращения относительно плечевого сустава оператора–станочника с силой сопротивления F. Для этого используем программный комплекс Mathcad и встроенную в него функцию «*Maximize*». Так как исследование аналитических функций пяти переменных затруднительно, то для упрощения расчетов ввели некоторые допущения. При расчетах переменную силу сопротивления F заменяли моментом сил сопротивления вращению рукоятки $M_{тр}$ и принимали φ = const. Частоту использования рукоятки в смену принимали в соответствии с установленными [8] интервалами: 960…241 раз в смену и 240…17 раз в смену. Для рукояток с частотой использования 960…241 раз в смену задавали $M_{тр}$ = 0,5…3 Н·м, принимали φ = 2,8 рад., а для рукояток с частотой использования 240…17 раз в смену – $M_{тр}$ = 1…8 Н·м, φ = 2,5 рад.

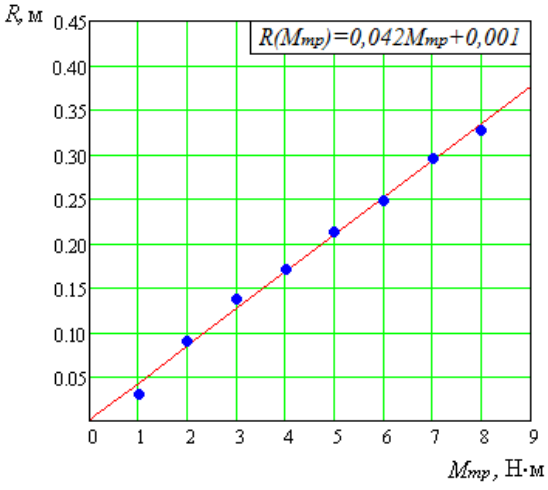
Пример определения оптимальных значений параметров H, L и R с использованием функции Mathcad «*Maximize*» представлен ниже. Данный расчет проводился для рукояток с частотой использования 960…241 раз в смену при значениях $M_{тр}$ = 3 Н·м, φ = 2,8 рад.

$$P(H,R,L) \quad \text{Given}$$
$$R := 0.2 \cdot m;\ L := 0.1 \cdot m;\ H := 0.4 \cdot m$$
$$0.3 \cdot m < H < 0.55 \cdot m$$
$$0.1 \cdot m < L < 0.156 \cdot m$$
$$0.01 \cdot m < R < 0.3 \cdot m$$

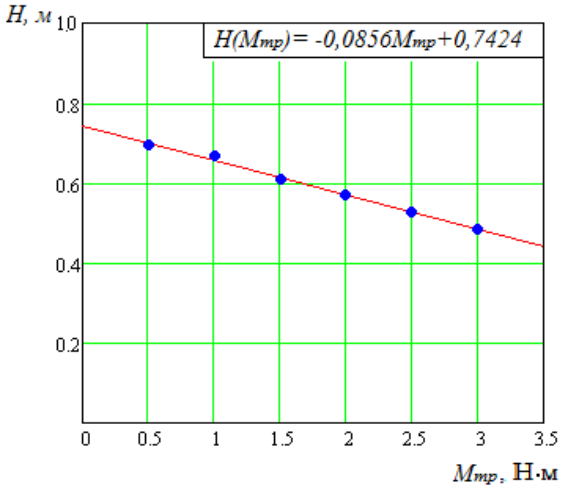
$$\text{Maximize}\ (P, H, L, R) = \begin{pmatrix} 485.728 \times 10^{-3} \\ 121.01 \times 10^{-3} \\ 250.216 \times 10^{-3} \end{pmatrix} m$$



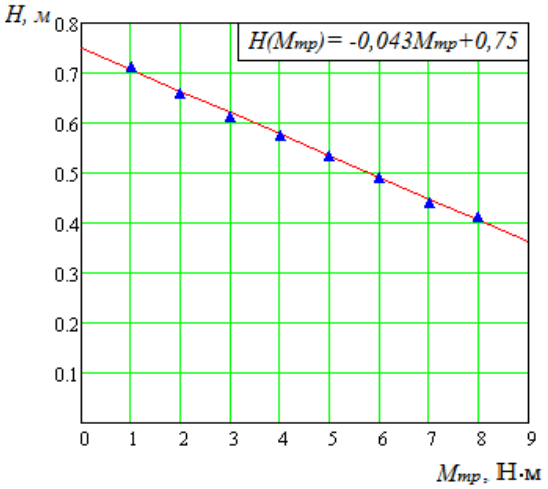
а



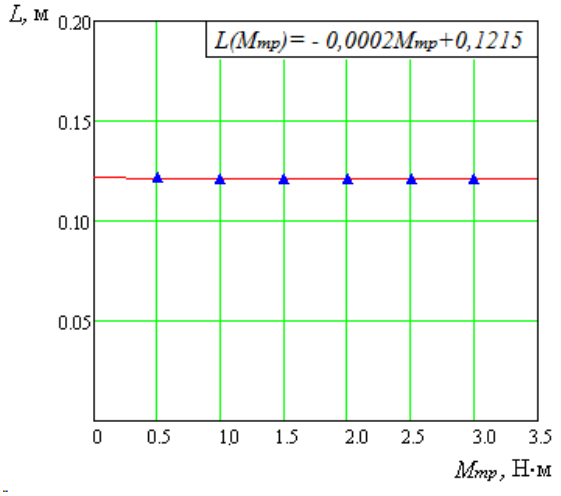
г



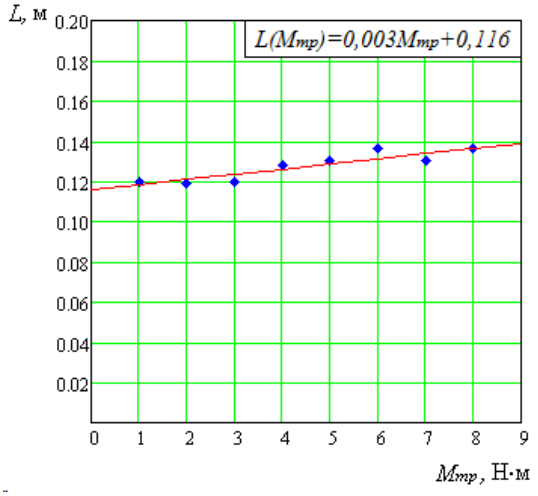
б



д



в



е

Рисунок 3 – Зависимости оптимальных радиуса R и параметров размещения H и L от момента сил сопротивления вращению $M_{тр}$ для рукояток с частотой использования:
а, б, в – 960…241 раз в смену, г, д, е – 240…17 раз в смену

В результате проведенных расчетов получены линейные зависимости $H(M_{тр})$, $L(M_{тр})$, $R(M_{тр})$ для рукояток различной частоты использования (рисунок 3). Полученные оптимальные значения вышеуказанных параметров аппроксимированы линейными функциями. Для каждого исследуемого параметра на графиках приведены линейные уравнения.

Анализируя рисунок 3, можно утверждать, что с увеличением $M_{тр}$ следует увеличивать радиус вращения рукоятки R и сокращать вертикальное расстояние H от центра ее вращения. Оптимальное значение L для рукояток с частотой использования 960…241 раз за смену составляет 0,12 м, для рукояток с частотой использования 241…17 раз за смену – 0,124 м. В первом случае L преимущественно не зависит от момента сил сопротивления вращению рукоятки, а во втором – увеличивается при увеличении момента.

Проанализировав полученные линейные уравнения (рисунок 3), можно утверждать, что для рукояток с частотой использования 960…241 раз за смену коэффициенты регрессии уравнений имеют большие значения, чем для рукояток с частотой использования 240…17, на что указывает больший угол наклона графика функции. Последнее можно объяснить приложением при работе рукояткой меньшего усилия.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что при увеличении момента сил сопротивления рукоятки $M_{тр}$ необходимо увеличивать радиус рукоятки R и сокращать вертикальное расстояние H между плечевым суставом оператора и центром вращения рукоятки, обеспечивая возможность более эффективного использования веса тела при ее вращении.

При сопоставлении полученных зависимостей с уравнениями, описывающими зависимость диаметра рукоятки и максимального изометрического вращающего момента, представленных в работах [12–15], можно сделать вывод, что для рукояток с частотой использования 960…241 раз в смену прилагаемое к органу управления усилие составляет 5%, а для рукояток с частотой использования 240…17 – 10% от максимально возможного усилия, развиваемого группой мышц, задействованных при вращении рукоятки, что близко к рекомендациям работы [12].

Таким образом, можно утверждать, что полученные взаимосвязи могут быть использованы при создании новых рабочих мест, при проектировании рабочего пространства, при конструировании нового оборудования или модернизации имеющегося.

Используя формулы для определения горизонтальной P и вертикальной Q сил, действующих на оператора–станочника при вращении рукоятки, выявлены зависимости оптимальных радиуса рукоятки R и параметров H и L ее размещения относительно плечевого сустава станочника от момента сил сопротивления вращению $M_{тр}$, имеющие вид линейных функций. Установлено, что для рукояток с частотой использования 960…241 и 241…17 раз в смену при увеличении $M_{тр}$ следует увеличивать радиус вращения рукоятки R и сокращать вертикальное расстояние H от центра ее вращения. Выявленные зависимости могут быть применимы в практике проектирования производственного оборудования с целью оптимизации трудовой деятельности оператора и повышения эффективности его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мунипов, В.М. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды / В.М. Мунипов, В.П. Зинченко. – М.: Логос, 2001. – 356 с.

2. ГОСТ Р ИСО 6385–2007. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем. – Введ. 2008–06–01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.

3. Справочник по инженерной психологии / под ред. Ломова Б.Ф. – М.: Машиностроение, 1982. – 368 с.

4. Инженерная психология в применении к проектированию оборудования / под ред. К.Т. Морган, А. Чапанис, М.У.Ланд [и др.]; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1971. – 488 с.

5. Edgren, C.S. Grip force vectors for varying handle diameters and hand sizes / C.S. Edgren, R. G. Radwin, C. B. Irwin // Human Factors. – 2004. – Vol. 46, № 2. – P. 244–251.

6. Mastalerz, A. Maximal grip force during holding a cylindrical handle with different diameters / A. Mastalerz, E. Nowak, I. Palczewska [et al.] // Humah movement. – 2009. – № 10 (1). – P. 26–30.

7. Patkin, M.A check–list for handle design / M. Patkin // Ergonomics Australia on–line. – 2001. – 22 p. – Режим доступа: http://ergonomics.uq.edu.au/eaol/handle.pdf.

8. ГОСТ 21752–76. Система «Человек–машина».. Маховики управления и штурвалы. Общие эргономические требования (с Изменением N 1). – Введ. 1977–01–01. – М.: Изд–во стандартов, 1987. – 9 с.

9. Прокошина, Т.С. Расчет сил, действующих на оператора станка, при вращении рукоятки / Т.С. Прокошина, И.С Кузнецов // Тр. ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 119. – С. 65 – 74.

10. Зациорский, В.М. Биомеханика двигательного аппарата человека / В.М. Зациорский, А.С. Аруин, В.Н. Селуянов. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 143 с.

11. Строкина, А.Н. Антропо–эргономический атлас / А.Н. Строкина, В.А. Пахомова. – М.: Изд–во МГУ, 1999. – 192 с.

12. Кремер, К. Человеческий фактор. В 6 т. Т. 5. Эргономические основы проектирования рабочих мест [пер. с англ.] / К. Кремер, Д.Чэффин, Р. Керн и [др.]. – М.: Мир, 1992. – 390 с.

14. DIN 33411 Teil 1. Körperkräfte des Menschen. Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen. – Normenausschuß Ergonomie (FNErg) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1982. – P. 6.

15. DIN 33411 Teil 3. Körperkräfte des Menschen. Maximal erreichbare statische Aktionsmomente männlicher Arbeitspersonen an Handrädern. – Normenausschuß Ergonomie (FNErg) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1986. – P. 6.

Прокошина Татьяна Сергеевна
Орловский государственный аграрный университет, г. Орел
ст. преподаватель
E–mail: proka@rambler.ru

T.S. PROKOSHINA

DETERMINATION OF THE OPTIMAL ROTATIONAL ARM RADIUS AND PARAMETERS ITS LOCATION RELATIVE TO THE OPERATOR METALWORKING MACHINE TOOLS

We obtained linear relations of optimal radius of the handle and the H and L parameters of its placement relative to the shoulder joint of the machine operator from the antitorque moment, for handles with a frequency of use of 960 ... 241 and 240 ... 17 times per shift. The revealed dependencies can be applied in practice of design of the production equipment to optimize the operators work and increase efficiency of its work.

Keywords: *manual controls, rotary handle, placement of manual controls, machine operator, antitorque moment.*

BIBLIOGRAPHY

1. Munipov, V.M. Ergonomika: chelovekoorientirovannoye proyektirovaniye tekhniki, programmnykh sredstv i sredy / V.M. Munipov, V.P. Zinchenko. – M.: Logos, 2001. – 356 s.

2. GOST R ISO 6385–2007. Ergonomika. Primeneniye ergonomicheskikh printsipov pri proyektirovanii proizvodstvennykh sistem. – Vved. 2008–06–01. – M.: Standartinform, 2008. – 16 s.

3. Spravochnik po inzhenernoy psikhologii / pod red. Lomova B.F. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 368 s.

4. Inzhenernaya psikhologiya v primenenii k proyektirovaniyu oborudovaniya / pod red. K.T. Morgan, A. Chapanis, M.U.Land [i dr.]; per. s angl. – M.: Mashinostroyeniye, 1971. – 488 s.

5. Edgren, C.S. Grip force vectors for varying handle diameters and hand sizes / C.S. Edgren, R. G. Radwin, C. B. Irwin // Human Factors. – 2004. – Vol. 46, № 2. – P. 244–251.

6. Mastalerz, A. Maximal grip force during holding a cylindrical handle with different diameters / A. Mastalerz, E. Nowak, I. Palczewska [et al.] // Humah movement. – 2009. – № 10 (1). – P. 26–30.

7. Patkin, M.A check–list for handle design / M. Patkin // Ergonomics Australia on–line. – 2001. – 22 p. – Rezhim dostupa: http://ergonomics.uq.edu.au/eaol/handle.pdf.

8. GOST 21752–76. Sistema «Chelovek–mashina».. Makhoviki upravleniya i shturvaly. Obshchiye ergonomicheskiye trebovaniya (s Izmenenivem N 1). – Vved. 1977–01–01. – M.: Izd–vo standartov, 1987. – 9 s.

9. Prokoshina, T.S. Raschet sil, devstvuyushchikh na operatora stanka, pri vrashchenii rukoyatki / T.S. Prokoshina, I.S Kuznetsov // Tr. GOSNITI. – 2015. – T. 119. – S. 65 – 74.

10. Zatsiorskiy, V.M. Biomekhanika dvigatelnogo apparata cheloveka / V.M. Zatsiorskiy, A.S. Aruin, V.N. Seluyanov. – M.: Fizkultura i sport, 1981. – 143 s.

11. Strokina, A.N. Antropo–ergonomicheskiy atlas / A.N. Strokina, V.A. Pakhomova. – M.: Izd–vo MGU, 1999. – 192 s.

12. Kremer, K. Chelovecheskiy faktor. V 6 t. T. 5. Ergonomicheskiye osnovy proyektirovaniya rabochikh mest [per. s angl.] / K. Kremer, D.Cheffin, R. Kern i [dr.]. – M.: Mir, 1992. – 390 s.

14. DIN 33411 Teil 1. Körperkräfte des Menschen. Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen. – Normenausschuß Ergonomie (FNErg) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1982. – P. 6.

15. DIN 33411 Teil 3. Körperkräfte des Menschen. Maximal erreichbare statische Aktionsmomente männlicher Arbeitspersonen an Handrädern. – Normenausschuß Ergonomie (FNErg) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1986. – P. 6.

Prokoshina Tatiana Sergeevna
Orel State Agrarian University, Orel
Senior Lecturer
E–mail: proka@rambler.ru

УДК 621.923.1

Я.И. СОЛЕР, НГУЕН ЧИ КИЕН

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ И ПРЕДСКАЗАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА 1933Т2 ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ ШЛИФОВАНИИ

Выполнен поиск моделей множественного дисперсионного анализа (МДА) на базе D–оптимального плана для предсказания отклонений от плоскостности поверхностей деталей из высокопрочного алюминиевого сплава 1933Т2 при шлифовании абразивным кругом Norton 37С80К12VP высокой пористости, который показал наилучшие режущие способности из 12–ти испытанных по результатам моделирования в среде нечеткой логики с учетом мер положения и рассеяния шероховатостей и точности формы. Полученные модели адекватны в факторном пространстве: продольная подача $s_{пр}$ = 4–14 м/мин, поперечная подача s_n = 2–10 мм/дв.ход, глубина резания t = 0,005–0,02 мм, операционный припуск z = 0,1–0,3 мм (скорость резания $v_к$ = 35 м/с). Установлено их влияние на показатели точности: EFE_{max}, EFE_a, EFE_q (ГОСТ 2642–81), – на предварительном и чистовом этапе шлифования деталей из сплава 1933Т2.

***Ключевые слова**: моделирование, шлифование, точность формы, алюминиевый сплав, статистика, поверхность отклика.*

Поверхностные слои деталей машин формируются в основном на окончательных операциях механической обработки. Однако на их формирование оказывают влияние операции предшествующей обработки, включая заготовительные. Припуски на чистовую и отделочную обработку, а также последовательность выполнения операций устанавливают таким образом, чтобы сохранить на детали, полученные характеристики поверхностного слоя предшествующей обработки: наклеп, сжимающие остаточные напряжения, отбеленную корку у отливок и пр. Особенно важно обеспечить высокое качество поверхностного слоя после процесса плоского шлифования. Наиболее часто при изучении процесса шлифования в качестве критерия его эффективности выступает шероховатость деталей. Другим не менее важным показателем топографии деталей и изделия в целом служит точность формы, значимость которой усиливается при росте нагрузок и скоростей относительного перемещения, а также при возрастании требований к их надежности.

Современное машиностроение характеризуется неуклонным возрастанием требований к повышению точности размеров, формы и расположения поверхностей при минимальной шероховатости микрорельефа. От этих параметров зависит надежность и долговечность машин и механизмов. При этом снижаются потери на трение, повышается коэффициент полезного действия и т.д. Точность обработки детали при плоском шлифовании зависит от ряда причин, а именно от жесткости технологической системы «заготовка–инструмент–приспособление–станок». Отклонения формы для прецизионных деталей могут составлять большую часть допуска на размер. Таким образом, количественная характеристика точности определяется главным образом отклонением формы обрабатываемой поверхности, а ее уменьшение является эффективным способом повышения точности обработки и, как следствие, улучшения качества изготовления механизмов.

Обеспечение заданного качества машин и длительное сохранение его на этом уровне во многом зависит от топография поверхностей деталей. Основная причина (до 80%) выхода машин из строя – это износ рабочих поверхностей сопряженных деталей. Значительно реже наблюдаются их поломки в результате некачественного изготовления, конструктивного несовершенства или заниженной усталостной прочности. Уменьшение износа повышает долговечность машин, сохраняет заданную конструктором точность и сокращает расходы на ремонт, которые нередко за весь срок эксплуатации машин могут превысить себестоимость изготовления деталей.

Известно, что отклонение формы меняет характер посадок, снижают точность подвижных соединений, точность взаимного расположения поверхностей, уменьшают реальную площадь контакта и жесткость соединений, увеличивают уровень вибраций, шум в машинах и снижают герметичность соединений [1, 2]. При проектировании операций шлифования ее обеспечение часто вызывает большие трудности, чем допуска на размер. Точность размеров достигается при шлифовании за счет повышения точности оборудования

и средств активного контроля. Системы же автоматического управления и контроля отклонений формы достаточно сложны и не получили широкого распространения в промышленности. Особое внимание управлению радиальным биением, овальностью, огранкой, волнистостью уделяется при обработке деталей подшипников, топливной аппаратуры, шпинделей металлорежущих станков, валов турбин. В исследовании принята нормальная относительная геометрическая точность формы: отклонения от прямолинейности *EFL* и от плоскостности *EFE* должны быть не более 0,6*T* [3], где *T* – допуск на размер детали. В работах [4, 5] выявлены следующие причины появления отклонений формы поверхностей: упругие деформации в технологической системе; неравномерный износ абразивного инструмента; винтовое движение инструмента относительно обрабатываемой поверхности, погрешности установки; исходные отклонения формы заготовки, волнистость рабочей поверхности инструмента; погрешности базовых поверхностей; собственные, вынужденные, параметрические колебания и автоколебания, возникающие в технологической системе.

Для минимизации и управления отклонениями от плоскостности часто применяется метод моделирования. Данная работа посвящена поиску моделей множественного дисперсионного анализа (МДА) с использованием программы *State–Ease Design–Expert* 7.0.0, которая позволяет прогнозировать точность формы шлифованных плоских деталей из высокопрочного алюминиевого сплава 1933Т2. Шлифование проведено при использовании кругов новейших разработок фирмы *Norton* из карбида кремния черного 37*C*, который имеет высокую твердость, уступающую только алмазу, эльбору и борсиликарбиду. Его зерна имеют острые режущие грани обеспечивающие врезания в металл и способны выдерживать температуру до 2050^0 С. Они применяются для шлифования твердых хрупких материалов, а также алюминия и его сплавов [6].

Методика эксперимента. Опыты проведены при следующих постоянных условиях: станок модели 3Г71М; высокопористый круг *Norton* 01 250×20×76 мм с характеристикой 37С80К12VP [7]. Данный инструмент показал наилучшую режущую способность из 12–ти испытанных по результатам моделирования в среде нечеткой логики с одновременным учетом мер положения и рассеяния шероховатостей и точности формы деталей. Скорость круга $v_к$=35 м/с; СОЖ – 5%–ная эмульсия Аквол – 6 (ТУ 0258–024–00148845–98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин; объект исследования – образцы из высокопрочного алюминиевого сплава 1933Т2 ($\sigma_в$=480–490 МПа; $\sigma_{кр}$=175 МПа) с размерами $L\times B\times H$=40×40×45 мм, шлифуемые по площади $L\times B$. Образцы крепились прихватами на зажимной плите универсально–сборного приспособления, прошлифованной после установки на станок. Сказанное исключало погрешность базирования. Размеры образцов и способ крепления позволяют считать их условно «абсолютно» жесткими, поскольку их податливостью можно пренебречь при формировании погрешностей формы. Переменные технологические параметры приведены в таблице 1.

Варьирование технологических факторов соответствовало *D*–оптимальному плану эксперимента (таблица 2) с числом опытов *N*=38 и количеством их дублирования $n=3(\nu=\overline{1;3})$ в каждой его точке. Применение критерия *D*–оптимальности подразумевает минимизацию определителя дисперсионной матрицы. На практике сказанное снижает величину ошибки при определении коэффициентов регрессий и соответственно повышает их точность [8].

Отклонения от прямолинейности шлифованных поверхностей измерены микрокатором 2 – ИПМ (ТУ 2–234–229–89) в полярной системе координат, центром которой служит пересечение диагоналей квадрата 40×40 мм в 12–ти сечениях $\varphi=[0^0;330^0]$ через 30^0. Они могут оказаться больше нуля, если точки измерения по периметру контура находятся выше начала координат, или меньше его при расположении ниже начала координат. Эти отклонения именуются соответственно вогнутостью и выпуклостью [3]. В дальнейшем отклонения от прямолинейности были представлены вещественной величиной $EFL_{\varphi\nu}$ и пересчитаны в отклонения от плоскостности *EFE* по методике [9]. По [3] они могут быть представлены тремя показателями: EFE_{max} (основным) и двумя дополнительными – средним арифметическим EFE_a и средним квадратичным EFE_q. Основной показатель целесообразно использовать при оценке режущих свойств кругов, а два вспомогательных – при расчете поправочных коэффициентов к базовым моделям множественного дисперсионного анализа (МДА), если они априори прогнозируют наибольшие величины отклонений [10, 11].

Таблица 1 – Интервалы варьирования и уровни натуральных и нормированных факторов

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		нижний (–1)	основной (0)	верхний (+1)
A – продольная подача $s_{пр}$, м/мин	5	4	9	14
B – поперечная подача $s_{п}$, мм/дв.ход	4	2	6	10
C – глубина резания *t*, мм	0,0075	0,005	0,0125	0,02
D – операционный припуск *z*, мм	0,1	0,1	0,2	0,3

Таблица 2 – Матрица *D*–оптимального плана эксперимента

N	Нормированные уровни факторов				*N*	Нормированные уровни факторов			
	A	*B*	*C*	*D*		*A*	*B*	*C*	*D*
1	0	–1	–1	–1	20	–1	+1	0	0
2	–1	0	–1	–1	21	–1	–1	+1	0
3	0	+1	–1	–1	22	0	–1	+1	0
4	+1	+1	–1	–1	23	–1	0	+1	0
5	–1	–1	0	–1	24	+1	0	+1	0
6	+1	–1	0	–1	25	0	+1	+1	0
7	0	0	0	–1	26	+1	+1	+1	0
8	0	+1	0	–1	27	0	–1	–1	+1
9	0	–1	+1	–1	28	0	0	–1	+1
10	0	0	+1	–1	29	+1	0	–1	+1
11	+1	0	+1	–1	30	–1	+1	–1	+1
12	–1	+1	+1	–1	31	0	–1	0	+1
13	–1	–1	–1	0	32	–1	0	0	+1
14	+1	–1	–1	0	33	0	+1	0	+1
15	0	0	–1	0	34	+1	+1	0	+1
16	0	+1	–1	0	35	–1	–1	+1	+1
17	0	–1	0	0	36	–1	–1	+1	+1
18	0	0	0	0	37	0	0	+1	+1
19	+1	0	0	0	38	0	+1	+1	+1

Для снижения временных затрат и углубления представлений об исследуемых объектах была привлечена программная среда *State–Ease Design–Expert* 7.0.0, обладающая набором инструментов для поиска и анализа регрессионных моделей и также многопараметрической оптимизации процесса шлифования.

На первоначальном этапе программа ведет поиск моделей МДА с использованием метода наименьших квадратов (НК–оценок). При необходимости они могут быть трансформированы методом максимального правдоподобия (МП–оценок). В работе [8] показано, что метод НК–оценок основан на минимизации остаточной суммы квадратов (*RSS*). Выбираются такие значения параметров модели, при которых сумма квадратов разностей между опытными средними и предсказанными моделями была наименьшей. Это позволяет рассчитать параметры модели с минимальной погрешностью. По результатам МДА ведем поиск модели, в которой сохраняются *i*–ые значимые главные эффекты и их взаимодействия, удовлетворяющие неравенству:

$$F_i = \frac{MS_i}{MRS} > F_{0,05(df_i, df_o)}, \quad (1)$$

где F_i – наблюдаемые *i*–ые критерии Фишера (F_i – отношения);

MS_i – средние суммы квадратов факторов и их эффектов взаимодействий;

MRS – средняя сумма квадратов остатков;

df_i, df_o – их число степеней свободы соответственно;

$F_{0,05(df_i,df_o)}$ – критическое F – отношение на 5%–ом уровне.

После получения искомой модели необходимо осуществить ряд процедур, связанных с ее проверкой на пригодность. Сначала убедимся в отсутствии мультиколлинеарности предикторов, наличие которой говорит о наличии линейной зависимости между входными переменными. Последнее приводит к неустойчивости коэффициентов регрессии при малых изменениях предикторов. Для проверки мультиколлинеарности используем коэффициент возрастания дисперсии *VIF* (*variance inflation factors*), который должен удовлетворять неравенству:

$$VIF = \left\lfloor 1/(1-R_i^2) \right\rfloor \le 4, \tag{2}$$

где R_i^2 – коэффициент детерминации *i*–го элемента регрессии.

Затем при помощи соотношении «сигнал–шум» осуществим проверку модели на адекватность, которая признается при выполнении неравенства:

$$\left[\frac{\max(\hat{y}) - \min(\hat{y})}{\sqrt{\overline{V}(\hat{y})}} \right] > 4, \tag{3}$$

$$\overline{V}(\hat{y}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V(\hat{y}) = pMRS^2/2,$$

где $max(\hat{y})$ и $min(\hat{y})$ – максимальное и минимальное прогнозируемое значение отклика соответственно;

p – количество членов модели НК–оценок, включая аддитивную постоянную и блоки взаимодействий;

$\overline{V}(\hat{y})$ – средняя вариация предсказанных откликов $\hat{\boldsymbol{y}}$.

Качество полученной модели тестируется с использованием коэффициента детерминации R^2:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{RSS}{RSS + ESS}\right), \tag{4}$$

где *ESS* – сумма квадратов остатков регрессии.

Оценка (4) является смещенной. Для повышения точности используем исправленную оценку, получаемую следующим преобразованием:

$$(R^2_{\text{скор.}} - R^2_{\text{прог.}}) < 0{,}2, \tag{5}$$

где $R^2_{\text{скор.}}$ и $R^2_{\text{прог.}}$ – скорректированный и прогнозируемый коэффициенты детерминации.

При построении регрессионной модели значимое влияние на отклик оказывают выбросы. К ним относят атипичные наблюдения, лежащие в стороне от регрессионной зависимости для большинства измерений. Их наличие обусловлено ошибками, допущенными на стадии измерения или аномальными явлениями. Они оказывают существенное влияние на угол наклона регрессионной линии и соответственно на коэффициент корреляции. Строго говоря, выброс не принадлежит данной генеральной совокупности и, следовательно, должен быть исключен из анализа. Анализ распределения остатков позволяет обнаружить отклонения исходных данных от нормального распределения, а также выбрать вид нормализующего преобразования. Для выявления выбросов строится зависимость прогнозируемых средних $\hat{y}$ и остатков. Внутренние стьюдентизированные остатки (*Internally studentized residual*) определяют из выражения:

$$e_{ti} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{\sqrt{MRS}\sqrt{1-h_i}}, \tag{6}$$

где h_i – показатель воздействия наблюдения или «разбалансировка».

Для каждого отклики остатки (6) должны удовлетворять закону *t*–распределения случайных величин, имеющих рассеяние в пределах доверительного интервала. В программе *State–Ease Design–Expert* для каждой модели НК–оценок предусмотрено построение графической зависимости распределения остатков. В случае отсутствии выбросов возможны

существенные ошибки при подборе линии регрессии. Для их исключения необходимо также проанализировать влияние наблюдений на итоговую регрессию.

При нарушении условий (2), (3), (5), (6) исходная модель подлежит трансформированию с пригонкой по методу МП–оценок. Для этого используется степенное или логарифмическое преобразование исходной функции [8]:

$$\hat{y}_\lambda = \begin{cases} (\hat{y} + C_\lambda)^\lambda & \text{при } \lambda \neq 0, \\ \ln(\hat{y} + C_\lambda) & \text{при } \lambda = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где C_λ – константа, подбираемая программой из условия, чтобы функция $\hat{y} + C_\lambda$ была представлена вещественной переменной.

Преобразование Бокса–Кокса позволяет построить график зависимости логарифма остаточной суммы квадратов от величины оператора λ. Наилучшим значением λ является тот, который обеспечивает минимум данного логарифма. Полученная модель МП–оценок так же была проверена на наличие выбросов и оценена на эффективность по формуле:

$$Э_{эффект} = \frac{MRS_{НК-оценок} - MRS_{МП-оценок}}{MRS_{НК-оценок}} \times 100\% . \quad (8)$$

Полученные результаты и их обсуждение. На первом этапе была выбрана квадратичная модель I МДА с постоянными коэффициентами (I), рекомендуемая программой. С использованием *F* – отношения были отобраны значимые эффекты на 5%–ном уровне из следующих возможных эффектов: *A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, CD, A^2, B^2, C^2, D^2, ABC, ABD, ACD, BCD, A^2B, A^2C, A^2D, AB^2, AC^2, AD^2, B^2C, B^2D, BC^2, BD^2, C^2D, CD^2,* которые представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значимые эффекты модели НК–оценок для показателя EFE_{max} по результатам МДА

Источник вариации	*df*	*SS*	*MS*	*F* – отношение	Вероятность ошибки α
Общее среднее	7	717,49	102,50	14,15	< 0,0001
B	1	327,57	327,57	45,24	< 0,0001
C	1	63,45	63,45	8,76	0,0038
BC	1	175,66	175,66	24,26	< 0,0001
BD	1	47,21	47,21	6,52	0,0121
ABC	1	132,50	132,50	18,30	< 0,0001
B^2C	1	78,60	78,60	10,85	0,0013
BC^2	1	90,05	90,05	12,44	0,0006
Остаточная сумма	106	767,58	7,24	–	–
Неадекватность	29	244,75	8,44	1,24	0,2237
Чистая ошибка	77	522,83	6,79	–	–
Общая сумма	113	1485,08	–	–	–
Примечание. *SS* – сумма квадратов того или иного эффекта					

Полученные нормированные регрессии для показателей точности формы, предсказанные методом НК–оценок, представлены ниже:

$$\hat{EFE}_{max} = 11{,}18+3{,}69B+1{,}54C+1{,}93BC-1{,}01BD+2{,}46ABC-2{,}13B^2C-2{,}37BC^2, \quad (9)$$

$$\hat{EFE}_a = 6+1{,}09B+1{,}2C+0{,}89BC+1{,}52ABC+1{,}13ABD-1{,}9B^2C, \quad (10)$$

$$\hat{EFE}_q = 6{,}81+1{,}21B+1{,}22C+1{,}01BC+1{,}74ABC+1{,}22ABD-2{,}02B^2C. \quad (11)$$

На следующем этапе предсказанные модели (9) – (11) были протестированы по (2), (3), (5) и (6), результаты которые представлены в таблице 4.

На рисунке 1, а–в проиллюстрированы результаты тестирования на наличие выбросов по (6). По осям абсцисс расположены опытные наблюдения в точках *N* плана с учетом повторений *n*, а по оси ординат–внутренние стьюденнизированные остатки (6). Из таблицы 4 видно, что модели (9) – (11) удовлетворяют требованиям по (2), (3) и (5). Однако присутствуют выбросы в точках (рисунок 1, а–в): *N*=87 (*A*=*B*=0, *C*=–1, *D*=+1) – для EFE_{max}; для EFE_a – в *N*=69 (*A*=*D*=0, *B*=*C*=+1) и для EFE_q – в *N*=91 (*A*=*B*=*C*=+1, *D*=0). В связи с этим

для стабилизации дисперсий проведено трансформирование исходных моделей (9) – (11) с пригонкой по методу МП–оценок (7).

Таблица 4 – Результаты проверки моделей НК–оценок по (2), (3), (5), (6)

Параметр	*VIF* (2)	Адекватность (3)	$R^2_{\text{скор.}} - R^2_{\text{прог.}}$ (5)	Наличие выбросов (рисунок 1, а–в)
EFE_{max}	1,03–3,18	13,997	0,048	присутствуют
EFE_a	1,08–3,19	13,285	0,042	присутствуют
EFE_q	1,06–3,19	13,466	0,043	присутствуют

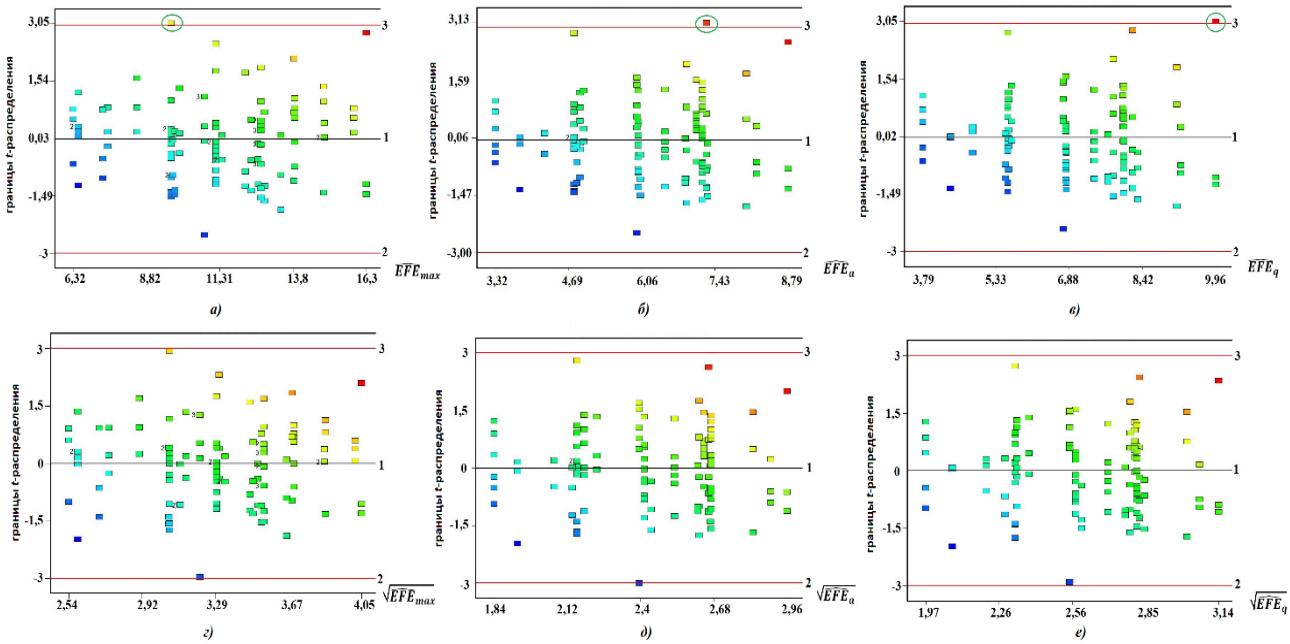


Рисунок 1 – Проверка моделей НК–оценок (а,б,в) и МП–оценок (г,д,е) для параметров (а,г), (б,д), (в,е) на рассеяние остатков:
1–центр рассеяния; 2–нижняя граница; 3–верхняя граница

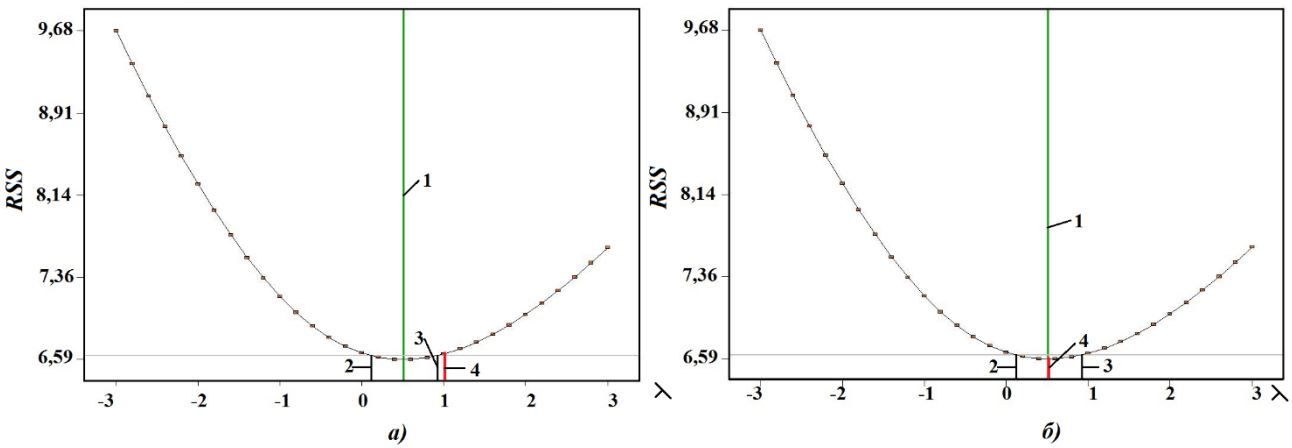


Рисунок 2 – Проверка модели (9) (а) с λ=1 (линия 4) по критерию Бокса–Кокса:
1–середина интервала; 2–нижний предел; 3–верхний предел

Модели (9) – (11) были проверены по критерию Кокса–Бокса. Из рисунка 2, а видно, что оператор λ=1 исходной модели находится вне доверительных пределов. В связи с этим программа *State–Ease Design–Expert* 7.0.0 предложила трансформировались исходные модели (9) – (11) с оператором λ=0,5. Полученные модели МП–оценок представлены ниже в нормированном виде по показателям точности соответственно:

$$\widehat{EFE}_{\max} = (3{,}3+0{,}56B+0{,}24C+0{,}29BC-0{,}16BD+0{,}36ABC-0{,}35B^2C-0{,}35BC^2)^2, \quad (12)$$

$$\widehat{EFE}_a = (2{,}41+0{,}23B+0{,}26C+0{,}18BC+0{,}3ABC+0{,}25ABD-0{,}42B^2C)^2, \quad (13)$$

$$\hat{EFE}_q = (2{,}57+0{,}24B+0{,}24C+0{,}19BC+0{,}32ABC+0{,}26ABD-0{,}42B^2C)^2. \quad (14)$$

Таблица 5 и рисунок 1, г–е свидетельствуют, что модели (12) – (14) удовлетворяют всем необходимым требованиям.

Таблица 5 – Результаты проверки моделей МП–оценок по (2), (3), (5), (6)

Параметр	*VIP* (2)	Адекватность (3)	$R^2_{\text{скор.}} - R^2_{\text{прог.}}$ (5)	Наличие выбросов (рисунок 1, г–е)
EFE_{max}	1,03–3,18	14,195	0,044	отсутствуют
EFE_a	1,06–3,19	13,458	0,041	отсутствуют
EFE_q	1,06–3,19	13,658	0,043	отсутствуют

Из таблицы 6 видно, что ошибки средних, предсказанных моделями, варьируются в диапазоне от 0,82% до 24,58%.

Таблица 6 – Сопоставление средних эксперимента с предсказанными моделями МП–оценок

Параметр	Факторы				Опытное среднее $y_{\text{эксп}}$, мкм	Ожидаемое среднее $\hat{y}$ по (12) – (14), мкм	Ошибка, %
	A	*B*	*C*	*D*			
EFE_{max}	0	–1	–1	–1	10,56	11,09	5,05
	+1	+1	–1	–1	8,11	9,80	20,78
	–1	–1	+1	+1	12,67	10,30	18,65
	0	+1	+1	+1	11,00	12,46	13,28
EFE_a	0	–1	–1	–1	5,81	6,35	9,21
	+1	+1	–1	–1	4,25	4,28	0,82
	–1	–1	+1	+1	7,57	5,71	24,58
	0	+1	+1	+1	6,30	7,08	12,38
EFE_q	0	–1	–1	–1	6,65	7,29	9,68
	+1	+1	–1	–1	4,86	4,93	1,36
	–1	–1	+1	+1	8,49	6,45	24,01
	0	+1	+1	+1	6,95	7,95	14,37

Если в моделях МП–оценок (12) – (14) принять условия шлифования, при которых факторы $A=B=C=D=0$, то в центре *D*–оптимального плана отклонения от плоскостности определяются квадратом аддитивной постоянной регрессии: $EFE_{max} = 3{,}3^2 = 10{,}84$ мкм (*TFE*7); $EFE_a = 2{,}41^2 = 5{,}81$ мкм (*TFE*5) и $EFE_q = 2{,}57^2 = 6{,}61$ мкм (*TFE*6), где в скобках указаны квалитеты относительной геометрической точности [12]. Таким образом, основной показатель отклонений от плоскостности превышает вспомогательные: EFE_a – на два квалитета (в 1,87 раза) и EFE_q – на один квалитет (в 1,65 раза). Как видно из (12) – (14), все нормированные модели МДА имеют одинаковое количество и идентичные значимые эффекты относительно основных. Исключение составляет взаимодействия «B^2C», которое имеет большой коэффициент регрессия: 0,35 – для EFE_{max} и 0,42 – для (13), (14). Оно может ослабить влияние основных эффектов *B* и *C* или привести к противоположному влиянию на отклик. По структуре моделей (12) – (14) технологические параметры оказывают на выходные величины EFE_{max}, EFE_a, EFE_q идентичное влияние. На этом основании остановимся подробно на одном показателе EFE_q и подробно проанализируем результаты моделирования: $EFE_q = f(A,B)$ и $EFE_q = f(C,D)$.

Рисунок 3, а,в иллюстрируют поверхности откликов точности формы поверхностей $\widehat{EFE}_q = f(A,B)$ и изолинии равных отклонений от плоскостности на черновом режиме шлифования: $C=D=+1{,}0$ и $(A,B) \in [-1{,}0;+1{,}0]$, а точки на рисунках соответствуют экспериментальным данным $n=3$. Представленная поверхность отклика характеризуется тройной кривизной. Участок поверхности: $A \in [-0{,}5;+1{,}0]$, $B \in [0;+1{,}0]$ (примерно первый квадрант) имеет выпуклость с градиентом роста в направлении к точке (+1,0; +1,0; +1,0; +1,0), в которой достигается максимум $\widehat{EFE}_{qmax}=11{,}7$ мкм (*TFE*7). При этих условиях шлифования уменьшение одного фактора *B* от +1,0 до –1,0 ($s_{\text{п}}$ от 10 до 2 мм/дв.ход) предсказало снижение $\widehat{EFE}_q$ до 1,9 мкм (*TFE*4), т.е. на три квалитета точности. Эта точка

является абсолютным минимумом на изучаемой поверхности. При минимальной продольной подаче (C=D=+1) при $B \in [-1,0;+1,0]$ имеем показатель $_q$ =6 мкм (*TFE*6), но лучше шлифовать при B=+1,0 ($s_п$ = 10 мм/дв.ход), повышающим производительность процесса в 5 раз.

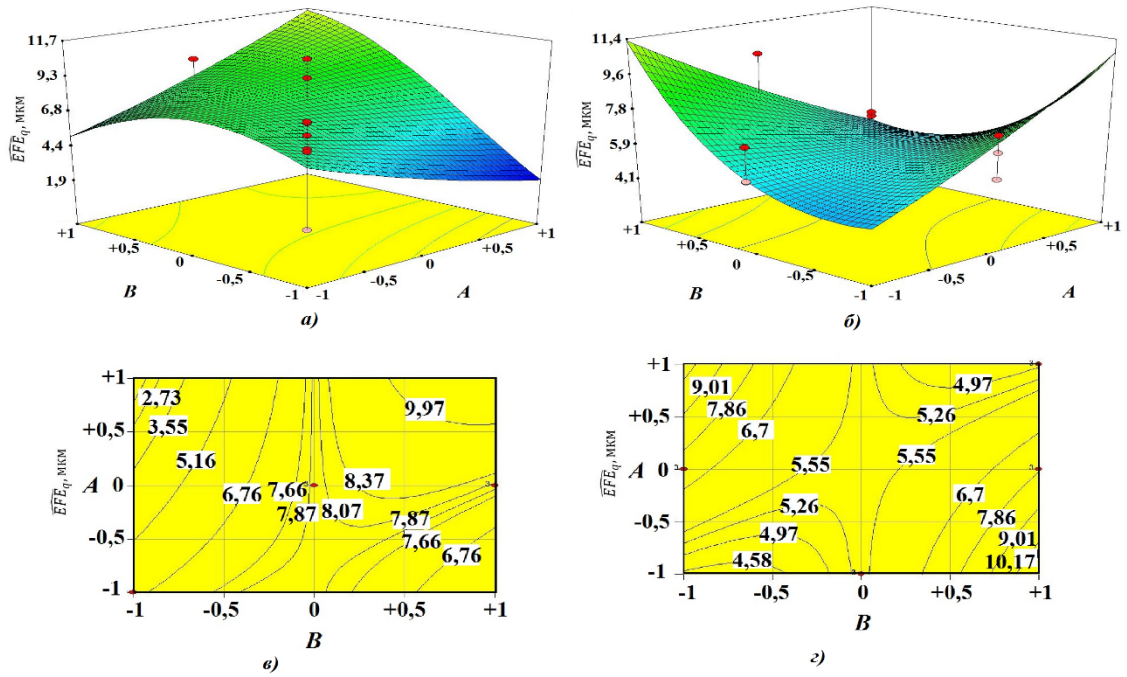


Рисунок 3 – Влияние продольной и поперечной подачи на параметры отклонений от плоскостности при а,в – C=D=+1; б,г – C=D=–1

Рисунок 3, б,г иллюстрируют ожидаемую поверхности отклика $_q$=f (A,B) при постоянных факторах C=D=–1,0, которые соответствуют чистовому этапу шлифования. Представленная на них поверхность отклика сохранила идентичный характер для черного шлифования, но экстремальные величины $_q$ предсказаны в новых точках плана. Так, в центре плана выпуклость поверхности трансформировалась в вогнутость в сечении проходящем через точку (0;0;–1,0;–1,0) параллельно оси A. В направлении второго и четвертого квадрантов поверхность характеризуется ростом $_q$: до 11,4 мкм во 2–ом квадрате и чуть меньше в 4–ом. В первом и третьем квадрантах напротив, предсказано минимумы показателя $_q$ в пределах 4–5 мкм. С учетом производительности чистовое шлифование следует вести с наибольшими подачами A=B=+1,0 при минимальных C=D=–1,0. Наименьший припуск z=0,1 мм обеспечивает съем дефектного слоя предшествующей обработки.

Как видно из рисунка 4, а,в, поверхность отклика $_q$= f (C,D) представляет плоскость, имеющую наклон относительно осей координат C и D. Наибольшая точность формы $_q$=4 мкм (*TFE*4) имеет место при C=D=–1,0 (A=B=+1,0). Изолинии в виде прямых имеют наклон под углом близким к 45^o и отражают градиент роста от координаты: C=D=–1,0 – в направлении к точке C=D=+1,0. При этом отклонения EFE_q возрастают почти в 3 раза.

При чистовом шлифовании отклонения (рисунок 4, б,г) поверхность отклика сохранила форму плоскости, но изолинии получили другой наклон и отражают рост отклонении формы от координаты: C=+1,0; D=–1,0 – к точке C=–1,0; D=+1,0. При этом градиент роста показателя $_q$ снизился до 1,5 раз. Положительный эффект снижения показателя $_q$ с ростом глубины резания вероятно связан с возрастанием упругого натяга в звене «круг–деталь» и снижением вибраций при врезании и выходе инструмента из контакта с заготовкой.

Полученные результаты по точности формы свидетельствуют, что не всегда снижение технологических параметров сопровождается ростом точности формы деталей и, наоборот, их рост – ее снижением. В связи с этим при робастном проектировании операций полученные модели (9) – (11) могут выявить условия шлифования, одновременно повышающие рост производительности и точности формы получаемых деталей из сплава 1933Т2.

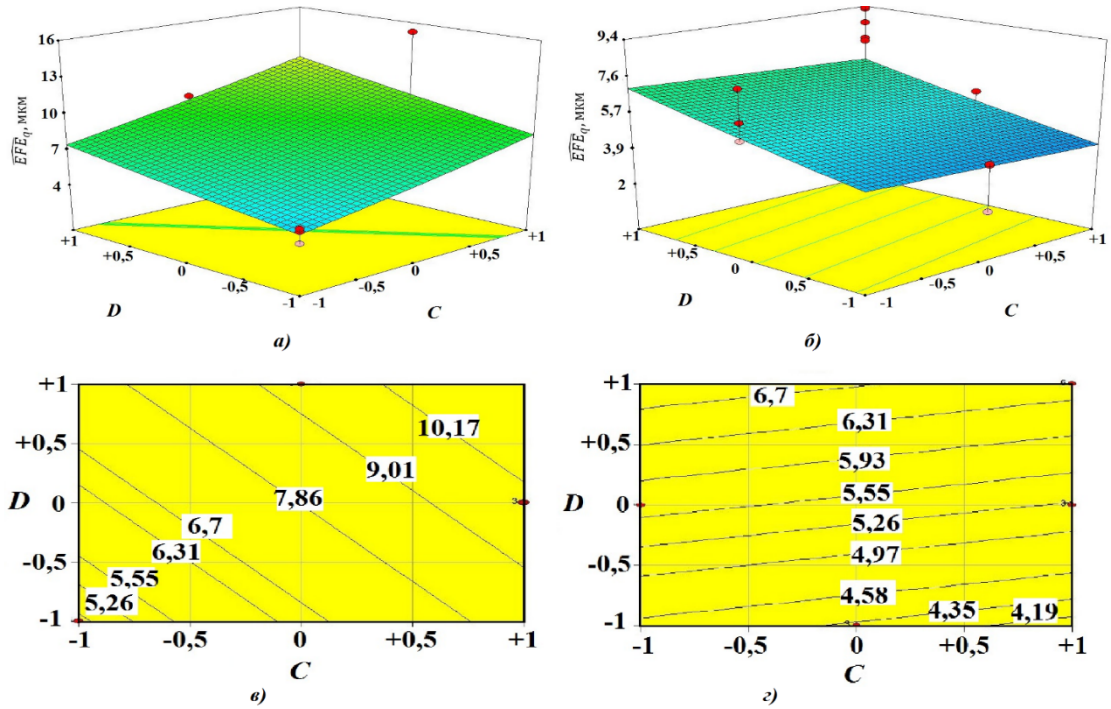


Рисунок 4 – Влияние глубины резания и припуска на параметры отклонений от плоскостности $\widehat{EFE}_q$ при а,в – A=B=+1; б,г – A=B=–1

Выводы:

1. Модели I МДА для предсказания точности формы деталей из алюминиевого сплава 1933Т2 при шлифовании высокопористым кругом *Norton* 37С80К12VP следует использовать при робастном проектировании шлифовальных операций для сокращения сроков технологической подготовки производства.

2. Установлено, что на черновом шлифовании обеспечивается повышение точности формы плоских деталей 1933Т2 при максимальной продольной подачи $s_{пр}$ = 14 м/мин., а на чистовом шлифовании при минимальной продольной подачи $s_{пр}$ = 4 м/мин. и операционном припуске z = 0,1 мм. Одновременно следует назначать поперечные подачи и глубины резания в пределах: $s_п$ = 2 – 6 мм/дв.ход и z = 0,005 – 0,0125 мм для обоих этапов шлифования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.

2. Дунин–Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некругности поверхности / И.В. Дунин–Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

3. ГОСТ 24642–81. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные понятия и обозначения. Взамен ГОСТ 10356–63; введ. 1981.01.07. – М.: Изд–во стандартов, 1984. – 68 с.

4. Капустин, Н.М. Точность обработки при бесцентровом шлифовании / Н.М. Капустин // Вопросы точности в машиностроении. – 1960. – С. 17–43.

5. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев. – М.: Машиностроение, 1976. – 1945 с.

6. Абразивные материалы [Электронный ресурс] URL: http://delta–grup.ru/bibliot/39/6.htm (дата обращения 25.05.2016).

7. Совершенство абразивных технологий. *Norton*, 2009. – 429 с.

8. Myers, Raymond H. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments / Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson–Cook. – John Wiley & Sons, New Jersey, 2009. – 824 p.

9. Солер, Я.И. Прогнозирование эффективности шлифования кругами различной пористости из традиционных и новых абразивов по критерию точности формы пластин Р9М4К8 / Я.И. Солер, В.К. Нгуен // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 11(94). – С. 49–58.

10. Солер, Я.И. Прогнозирование макрогеометрии деталей из стали 13Х15Н4АМ3 при плоском шлифовании кругами из кубического нитрида бора / Я.И. Солер, А.Б. Стрелков, Д.Ю. Казимиров // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 11. – С. 26–31.

11. Стрелков, А.Б. Создание информационной базы для управления процессом плоского шлифования периферией круга на основе многокритериальной оптимизации параметров обработки: дисс…канд. техн. наук / А.Б. Стрелков. Иркутск, 2011. – 190 с.

12. ГОСТ 24643–81. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Взамен ГОСТ 10356–63 (в части разд. III). Введ. 01.07.1981. – М.: Изд–во стандартов, 1981. – 14 с.

Солер Яков Иосифович
ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет
Кандидат технических наук, доцент
E–mail: solera@istu.irk.ru

Нгуен Чи Киен
ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет
Аспирант
E–mail: chikien89irk@gmail.com

Ya.I. SOLER, NGUYEN CHI KIEN

MODEL BUILDING AND PREDICTION FLATNESS SURFACES OF DETAILS FROM 1933T2 ALLOY AT MULTIPASS GRINDING

The multiple dispersion analysis (MDA) models of flatness deviations of the ground parts made from high–strength aluminum alloy 1933T2 at grinding abrasive wheel Norton 37C80K12VP highly porous. This wheel showed the best cutting ability of the 12 tested by the results of the simulation in fuzzy logic environment taking into account measures of position and dispersion of roughness and form accuracy. The models were adequate in the factor space: longitudinal feed s_l =4–14 m/min, cross traverse s_c=2–10 mm/double stroke, cutting depth is t=0,005–0,02 mm, operational allowance z=0,1–0,3 mm (cutting speed v_c=35 m/s). It was established their influence on the accuracy of indicators: EFE_{max}, EFE_a, EFE_q (GOST 2642–81) – at the preliminary and finishing stage grinding parts made of alloy 1933T2.

***Keywords**: modeling, grinding, form accuracy, aluminum alloy, statistics, response surface.*

BIBLIOGRAPHY

1. Dalskiy, A.M. Tekhnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti vysokotochnykh detaley mashin / A.M. Dalskiy. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 224 s.

2. Dunin–Barkovskiy, I.V. Izmereniye i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekrugnosti poverkhnosti / I.V. Dunin–Barkovskiy, A.N. Kartashova. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 232 s.

3. GOST 24642–81. Dopuski formy i raspolozheniya poverkhnostey. Osnovnyye ponyatiya i oboznacheniya. Vzamen GOST 10356–63; vved. 1981.01.07. – M.: Izd–vo standartov, 1984. – 68 s.

4. Kapustin, N.M. Tochnost obrabotki pri bestsentrovom shlifovanii / N.M. Kapustin // Voprosy tochnosti v mashinostroyenii. – 1960. – S. 17–43.

5. Kolev, K.S. Tochnost obrabotki i rezhimy rezaniya / K.S. Kolev. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 1945 s.

6. Abrazivnyye materialy [Elektronnyy resurs] URL: http://delta–grup.ru/bibliot/39/6.htm (data obrashcheniya 25.05.2016).

7. Sovershenstvo abrazivnykh tekhnologiy. Norton, 2009. – 429 s.

8. Myers, Raymond H. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments / Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson–Cook. – John Wiley & Sons, New Jersey, 2009. – 824 p.

9. Soler, YA.I. Prognozirovaniye effektivnosti shlifovaniya krugami razlichnoy poristosti iz traditsionnykh i novykh abrazivov po kriteriyu tochnosti formy plastin R9M4K8 / YA.I. Soler, V.K. Nguyen // Vestnik IrGTU. – 2014. – № 11(94). – S. 49–58.

10. Soler, YA.I. Prognozirovaniye makrogeometrii detaley iz stali 13KH15N4AM3 pri ploskom shlifovanii krugami iz kubicheskogo nitrida bora / YA.I. Soler, A.B. Strelkov, D.YU. Kazimirov // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2009. – № 11. – S. 26–31.

11. Strelkov, A.B. Sozdaniye informatsionnoy bazy dlya upravleniya protsessom ploskogo shlifovaniya periferiyey kruga na osnove mnogokriterialnoy optimizatsii parametrov obrabotki: diss…kand. tekhn. nauk / A.B. Strelkov. Irkutsk, 2011. – 190 s.

12. GOST 24643–81. Dopuski formy i raspolozheniya poverkhnostey. Chislovyye znacheniya. Vzamen GOST 10356–63 (v chasti razd. III). Vved. 01.07.1981. – M.: Izd–vo standartov, 1981. – 14 s.

Soler Yakov Iosifovich
FGBOU PO Irkutsk National Research Technical University
Candidate of Technical Sciences, associate professor
E–mail: solera@istu.irk.ru

Nguyen Chi Kien
FGBOU PO Irkutsk National Research Technical University
Postgraduate
E–mail: chikien89irk@gmail.com

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.789

А.П. БАБИЧЕВ, А.О. ТВЕРДУХА, Ф.А. ПАСТУХОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВИБРОВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

В работе проведено исследование влияния виброволновой обработки на напряженно–деформированное состояние типовых образцов из различных материалов с различной продолжительностью нагружения. Выполнен анализ причины изменения прогиба типовых образцов. Отмечено влияние сложных волновых процессов, представляющих технологический интерес и требующих дополнительных исследований.

Ключевые слова: *остаточные напряжения, виброволновое нагружение, величина прогиба.*

Остаточные напряжения являются важным показателем, характеризующим состояние материала детали и оказывающим влияние на ее эксплуатационные свойства (например прочностные свойства, размерную стабильность в условиях эксплуатации и другие характеристики) [1–4]. Как известно, в процессе различных условий обработки имеет место изменение характеристик и уровня остаточных напряжений. В предлагаемой статье представлены результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в процессе виброволновой обработки. Обработке подвергались плоские образцы (рисунок 1) из стали 30ХГСА и алюминиевых сплавов Д16, АМг6, АМцМ. Образцы были собраны в пакеты различных размеров и зафиксированы технологическим крепежом (рисунок 3). Обработка осуществлялась в среде стальных шаров из закаленной стали ШХ15 ($HRC_э$ 62–64) (рисунок 2).

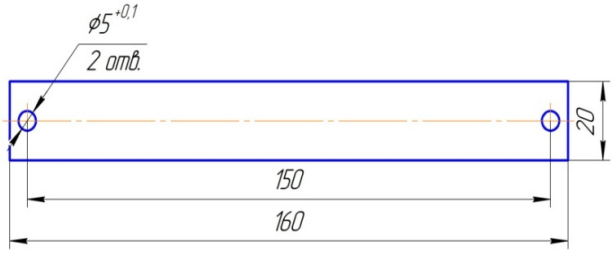


Рисунок 1– Общий вид образца

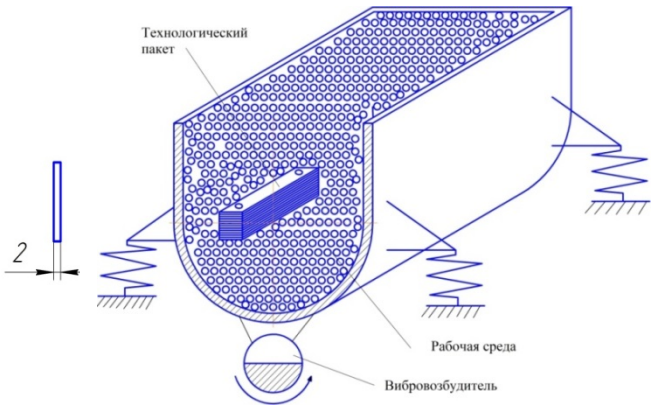


Рисунок 2– Схема нагружения

Режимы обработки: амплитуда колебаний А = 2,5мм, частота f = 30Гц, продолжительность обработки t = 10, 30, 60, 90 минут.

Оценка изменения уровня остаточных напряжений осуществлялась по величине прогибаf образца с помощью специального устройства [5]. Измерение величин прогибов осуществлялось с лицевой и тыльной сторон 1 и 2 для каждого образца. Обработке подвергались пакеты, собранные из нескольких образцов. Результаты исследований представлены на диаграммах (рисунки 4–7) с пояснениями. Представленные диаграммы

характеризуют дифференцированное изменение величины прогиба f при обработке различного количества образцов в пакете и времени обработки.

Величины остаточных напряжений вычислялись по формуле:

$$\sigma_{ср} = \frac{8EJ}{l^2 \cdot \Delta F \cdot b} \cdot f,$$

где E – модуль упругости материала, МПа;

J – момент инерции пластины, J= 6719832 кгм^2;

l – длина пластины,l=160мм;

ΔF – площадь поперечного сечения деформированного слоя; ΔF=3200мм^2;

b – расстояние между центрами тяжести деформированного слоя и всего сечения пластины; b=80мм;

f – прогиб пластины.

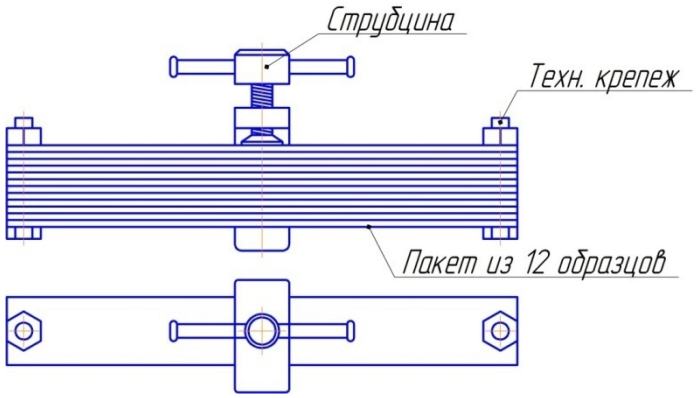


Рисунок 3– Схема пакета образцов

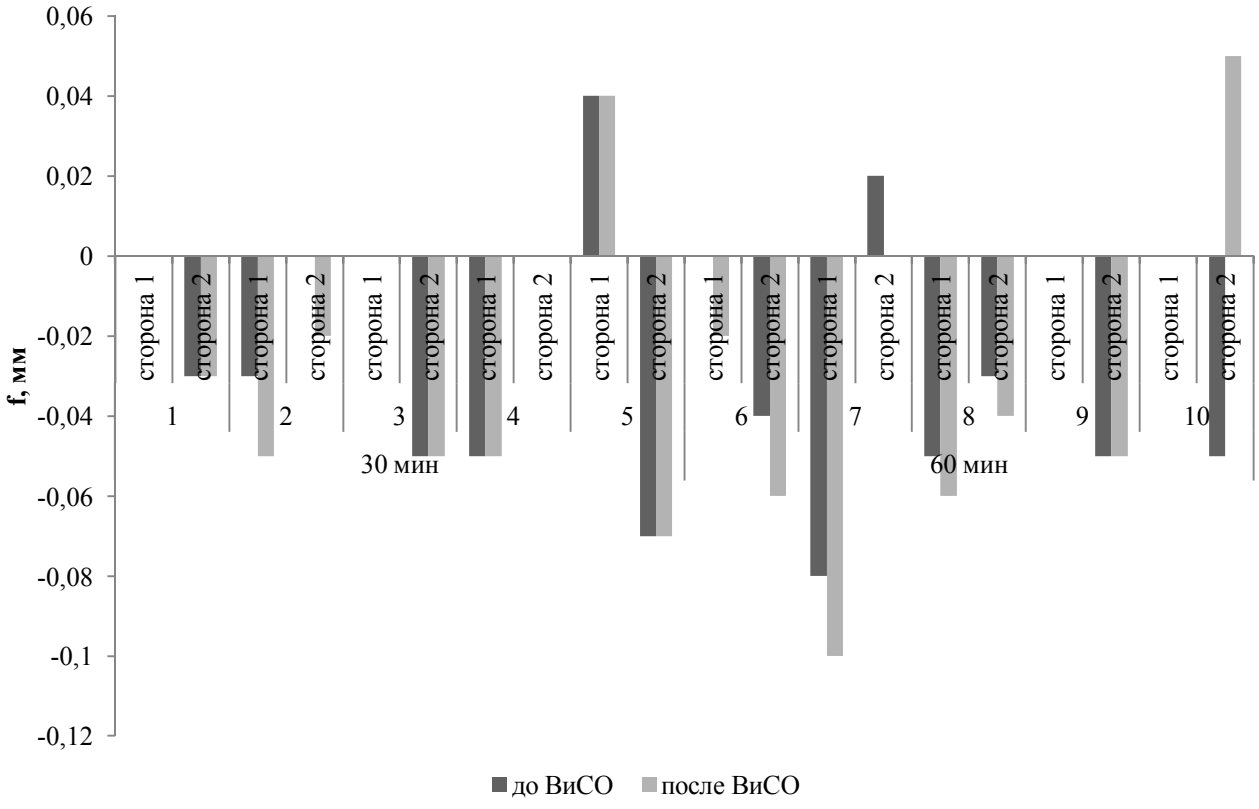


Рисунок 4– Диаграмма изменения величины прогиба образцов из стали 30ХГСА

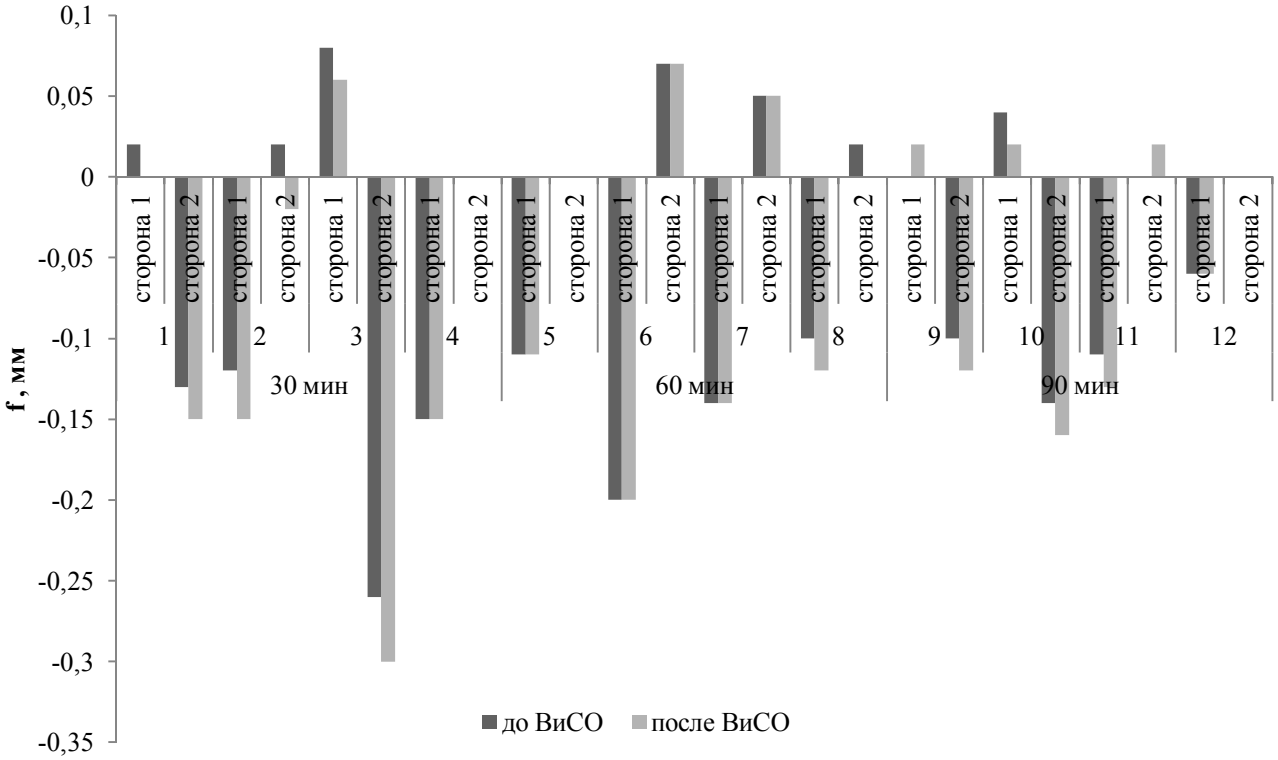


Рисунок 5– Диаграмма изменения величины прогиба образцов из сплава АМг6

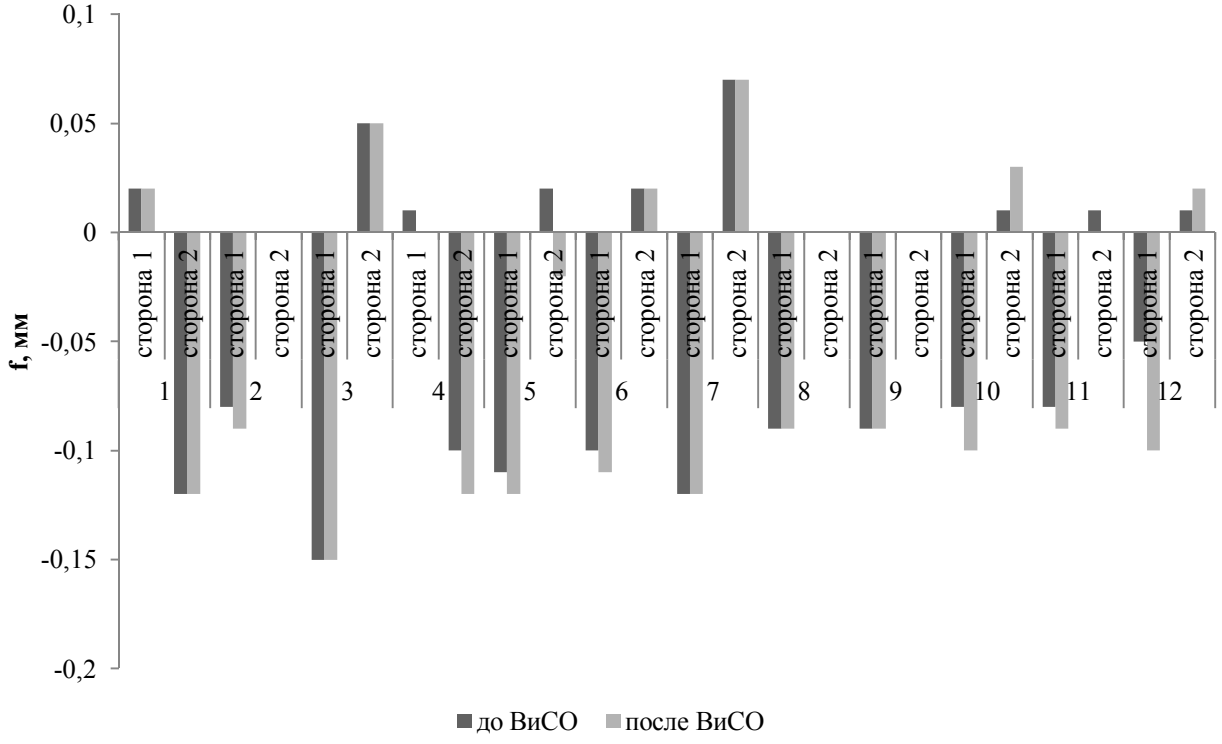


Рисунок 6– Диаграмма изменения величины прогиба образцов из сплава Д16 (60 мин.)

Уместно отметить, что распространение и взаимодействие волн в слоистых структурах (пакетах) материалов представляет значительный интерес. В этом случае имеют место сложные явления, связанные с интерференцией, дифракцией, трансформацией различных типов волн друг в друга на границах нагружаемых образцов слоистого пакета [1, 6], результаты которых представляют интерес при решении технологических задач.

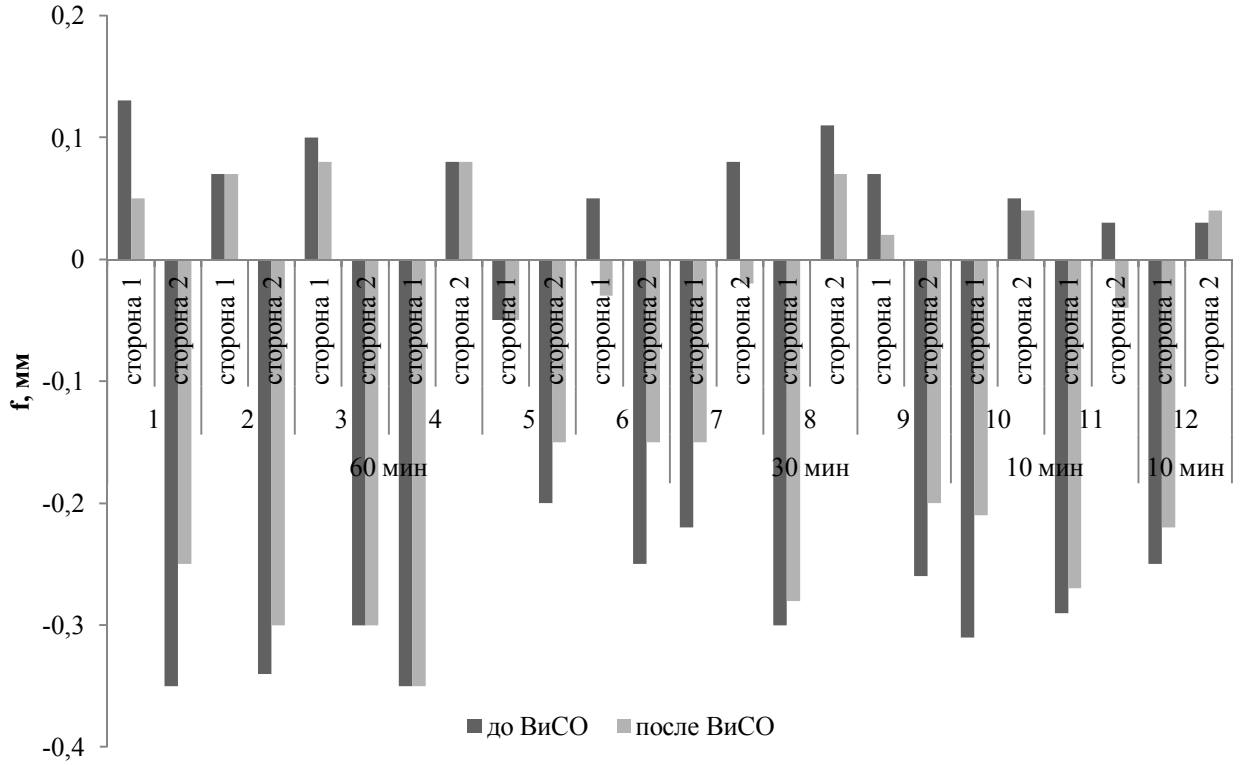


Рисунок 7– Диаграмма изменения прогиба образцов из сплаваАМцМ

Выводы.

1. 70% образцов из стали 30ХГСА при t=30мин показали отсутствие изменений величины прогибов (возможно причина в незначительной продолжительности виброволнового воздействия);

2. результаты обработки образцов из стали 30ХГСА при t = 60мин. показывают преимущественно увеличение величин прогибов как по тыльной, так и по лицевой стороне;

3. результаты обработки образцов из сплава АМцМ при t = 60, 30, 10 мин. показывают преимущественно (75%) уменьшение величин прогибов как по тыльной, так и по лицевой стороне в равной пропорции;

4. результаты обработки образцов из сплава Д16 при t = 60 мин. Показывают увеличение величин прогибов либо отсутствие изменений, как по тыльной, так и по лицевой стороне в равной пропорции;

5. исходя из вышеизложенного можно сделать предположение о том, что виброволновое нагружение оказывает влияние на напряженно–деформированное состояние образцов, однако для установления зависимостей этого процесса требуются дополнительные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов, О.Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов. – М.: Изд–во «Наука», 1985. – 342 с.

2. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: ДГТУ,1999. – 621с.

3. Баскаков, В.А. Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твердое тело. Автореферат дис. д–ра физ.–мат. наук. – Чебоксары, 1991. – 37 с.

4. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. Под ред. Ю.С. Степанова – М.: Изд–во «Машиностроение–1», 2005. – 149 с.

5. Бабичев, А.П. Отделочно–упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.]. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2003.– 191 с.

6. Фортов, В.Е., Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества / Е.Н. Аврорин, Б.К. Водолага, В.А. Симоненко, В.Е. Фортов / РАН // Успехи физических наук. –1993. – Т. 163.– № 5.– С.16

Бабичев Анатолий Прокофьевич
д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет.
E-mail: vibrotech@mail.ru

Пастухов Филипп Андреевич
ведущий инженер НИИ «Вибротехнология» Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет.

Твердуха Андрей Олегович
аспирант кафедры «Технологии машиностроения» Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет.

A.P. BABICHEV, A.O. TVERDUKHA, F.A. PASTUKHOV

EXPERIMENTAL STUDY OF RESIDUAL STRESS IN THE VIBROWAVE LOADING

The paper studied the effect of vibration wave treatment on the stress–strain state of samples of different materials with different duration of loading. The analysis of the reasons for changing the deflection of samples. The influence of complex wave processes, representing technological interest and require further research.

Keywords: *residual stresses, vibration loading, deflection quantity.*

BIBLIOGRAPHY

1. Alimov, O.D. Udar. Rasprostranenie voln deformacij v udarnyh sistemah / O.D. Alimov, V.K. Manzhosov. – M.: Izd–vo «Nauka», 1985.– 342 s.

2. Babichev, A.P. Osnovy vibracionnoj tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev. – Rostov n/D: DGTU,1999. – 621 s.

3. Baskakov, V.A. Analiz rasprostranenija i dinamicheskogo vozdejstvija udarnyh voln na deformiruemoe tverdoe telo. Avtoreferat dis. d–ra fiz.–mat. nauk. – Cheboksary, 1991. – 37 s.

4. Mehanika nagruzhenija poverhnosti volnoj deformacii / A.G. Lazutkin, A.V. Kirichek, Ju.S. Stepanov, D.L. Solovev. Pod red. Ju.S. Stepanova – M.: Izd–vo «Mashinostroenie–1», 2005. – 149 s.

5. Babichev, A.P. Otdelochno–uprochnjajushhaja obrabotka detalej mnogokontaktnym vibroudarnym instrumentom / A.P. Babichev, P.D. Motrenko [i dr.]. – Rostov n/D: DGTU, 2003. – 191 s.

6. Fortov, V.E., Moshhnye udarnye volny i jekstremalnye sostojanija veshhestva / E.N. Avrorin, B.K. Vo–dolaga, V.A. Simonenko, V.E. Fortov / RAN // Uspehi fizicheskih nauk. –1993. – T. 163. – № 5. – S.16

Babichev Anatoly Prokofyevich
Dr.Sci.Tech., professor, professor of Technology of Mechanical Engineering department of Russia, Rostov-on-Don, Don state technical university.
E-mail: vibrotech@mail.ru

Pastukhov Philipp Andreevich
Leader Engineer of Research Institute «Vibrotehnology» Russia, Rostov-on-Don, Don State Technical University.

Tverdukha Andrej Olegovich
Postgraduate student Technology of Mechanical Engineering department Russia, Rostov-on-Don, Don State Technical University.

УДК 621.9

Г.В. БАРСУКОВ, О.Г. КОЖУС

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО АБРАЗИВА ИЗ ОТХОДОВ ЦВЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Авторами представлены результаты исследования физико–механических и эксплуатационных характеристик абразивов различных типов, по результатам которых установлено, что по динамической прочности и режущей способности наиболее близким к гранатовому песку для гидроабразивного резания является нормальный электрокорунд и наномодифицированный абразив из отходов цветного производства.

Ключевые слова: *абразив, гидроабразивное резание, электрокорунд, гранат, наномодификация поверхности, диффузия, высокотемпературная обработка.*

Свойства и характеристики абразивного зерна при гидроабразивном резании значительно влияют на скорость подачи сопла относительно материала и определяют производительность обработки [1–4].

Абразивные материалы разделяются на три класса: искусственные (синтетические), естественные и из побочных продуктов

К естественным абразивным материалам относятся природные алмазы, естественный корунд, гранат, кремень и др.

Традиционно в качестве абразива используется гранат, позволяющий резать металлы и другие жесткие, ломкие или хрупкие материалы. Гранат имеет приемлемую твердость для резания большинства металлов и причиняет меньший износ соплу по сравнению с электрокорундом и карбидом кремния [5–8].

Для получения материалов сопоставимых гранатовому абразиву выбираем дешевые абразивные материалы с последующей модификацией – вторичные техногенные материалы (техногенные побочные продукты промышленности) при обработке которых формируются новые свойства материала.

Абразивные материалы на основе побочных продуктов являются результатом производственных процессов. Среди них шлак, получаемый при выплавке металла или при производстве электроэнергии.

Главными компонентами шлаков производства железа и стали являются оксид кремния (SiO_2), оксид алюминия ($Al_2\ O_3$), оксид кальция (CaO) и оксид магния (MgO), содержание которых в составе этих шлаков достигает 95%. к неосновным компонентам состава этих шлаков относятся оксиды марганца и железа, соединения серы с металлами, а также следовые количества некоторых других веществ. физические свойства, такие как плотность, пористость и размеры частиц, зависят от скорости охлаждения шлака и его химического состава.

Химический состав доменных шлаков представлен в основном четырьмя оксидами: CaO (29 – 30 %), MgO (0 – 18 %), $Al_2\ O_3$ (5 – 23 %) и SiO_2 (30 – 40 %). В небольшом количестве в них содержатся оксиды железа (0,2 – 0,6 %) и марганца (0,3 – 1 %), а также сера (0,5 – 3,1 %). Сталеплавильные шлаки характеризуются более высоким содержанием оксидов железа (до 20 %) и марганца (до 10 %)

Химический состав значительно влияет на физические свойства шлаковых расплавов, структуру и свойства затвердевших шлаков. Так, увеличение содержания оксида кальция в шлаках обусловливает повышение температуры их плавления и понижение текучести.

Для шлаков цветной металлургии характерны пониженное содержание $CaO+MgO$ (7 – 13 %) и высокое содержание FeO (21 – 61 %). Кроме основных компонентов шлаки цветной металлургии могут содержать в небольших количествах неизвлеченные металлы — медь, цинк, свинец, никель и др.

Задачей модификации вторичных техногенных абразивных материалов является повышение твердости абразивного материала. Модифицирование поверхностного слоя материала может обеспечить прочностные характеристики абразивного материала при одновременном увеличении их пластичности. Одним из методов создания таких материалов является образование покрытия, образуемого при химико–термической обработке поверхности абразивного зерна в результате диффузии в поверхностные слои неметаллов или металлов из внешней активной среды при высокой температуре. Процесс диффузионного насыщения изменяет фазовый состав и структуру поверхности абразива [9, 10].

При нанесении покрытий этого типа на поверхности абразивного материала создают слой, либо полностью состоящий из тугоплавкого соединения, либо с высоким содержанием тугоплавких фаз, что достигается насыщением поверхности бором, углеродом, азотом, кремнием и другими металлами и неметаллами. Такое насыщение, как правило, сопровождается реакционной диффузией, то есть образованием в поверхностном слое абразива простых и сложных тугоплавких химически стойких индивидуальных фаз.

Нашей задачей было получение карбидов в поверхностном слое абразивного материала, в промышленных условиях карбид кремния SiC получают из кремнезема SiO_2 и кокса C путем нагревания в электропечах Ачесона до температуры 2000 – 2200°С. В печи протекают сложные реакции, сводящиеся к уравнению:

$$SiO_2 + 3C = SiC + 2CO \quad (1)$$

Сущность процесса образования карбида кремния сводится к тому, что в результате взаимодействия двух исходных твёрдых продуктов SiO_2 и C образуется фаза SiC. Химическая реакция сопровождается перестройкой одной структуры в другую.

Реакция (1) протекает в 2 фазы:

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO \quad (2)$$

$$Si + C = SiC \quad (3)$$

Взаимодействие кварца с углеродом начинается уже около 1000°C, при 1600°C оно становится заметным и ускоряется с дальнейшим повышением температуры.

После получения опытных образцов модифицированного абразивного материала провели рентгенофазовые исследования этих материалов, которые подтвердили наличие карбидов, упрочняющие данные материалы, как следствие увеличение твёрдости данных абразивных материалов, после чего провели лабораторные исследования абразивных свойств новых материалов.

Одной из важнейших характеристик механических свойств абразивных материалов, предполагающей их режущие свойства, является динамическая прочность на разрушение при ударе о преграду.

Интенсивность уноса материала отражает характер контактного взаимодействия поверхности материала и хрупкого абразива, величину и схему внешнего силового воздействия, соотношение прочностных свойств металла материала и абразива. Высоким значением твердости и прочности хрупкого абразива соответствует его высокая способность к внедрению в поверхность материала и разрушению материала. Если разрезаемый материал более твёрдый и прочный, чем абразив – разрушится абразив и, следовательно, разрушение обрабатываемого материала затруднено [11, 12].

Наблюдаемые на поверхности материала следы взаимодействия, такие как царапины, канавки, локальных углубления говорят том, что твердость и прочность хрупкого абразива превосходит соответствующие свойства материала и, как результат этого, происходит

микрорезание, деформирование, образование кратеров и лунок, вытеснение в «навалы» по краям царапин [13, 14].

В целом при оценке интенсивности процесса разрушения материала под действием абразива следует учитывать следующее, что чем грубее абразив и выше твердость его материала, тем лучше его режущая способность.

Анализ динамической прочности наномодифицированного абразива проведен путем анализа кратеров и отколовшихся частиц после сверхзвукового взаимодействия с неподвижной мишенью.

По результатам анализа формы и зернистости абразивной взвеси после сверхзвукового взаимодействия были обнаружены некоторые особенности разрушения наномодифицированного зерна.

Эксперименты проводились на базе установки «DYMET» производства Обнинского центра порошкового напыления для разгона дисперсных частиц. Установка обеспечивала следующие параметры: при температуре рабочего газа 200°С скорость потока v = 510 м/с, при температуре 600°С – v = 690 м/с.

Эксперименты проводились с частицами абразивов различных типов размером приблизительно 0,1 – 0,5 мм, которые были специально отобраны и сгруппированы по размеру и форме и для проведения опытов.

Частицы разгонялись до сверхзвуковой скорости потоком рабочего газа через сопло Лаваля. Для исследования продуктов разрушения абразива был изготовлен уловитель с фильтрующими элементами на стенках.

Исследование кратера, образующегося после ударного взаимодействия, в совокупности с фотографиями частицы до удара и после, позволило провести анализ разрушения абразивной частицы.

В экспериментах оценивались размеры осколков, образующихся при разрушении частиц абразива разного типа. Для этого устанавливали фильтрующий экран, представляющий собой мелкодисперсную сетку. Осколки, разлетаясь и рикошетя о поверхность материала, попадали на установленный экран, после чего собирались и оценивались под микроскопом.

По изменению формы единичной частицы оценивалась динамическая прочность абразивов разных производителей. Форму абразивного зерна можно охарактеризовать степенью аппроксимации идеальной геометрической формы сферой. Один из этих коэффициентов формы – шарообразность (рисунок 1):

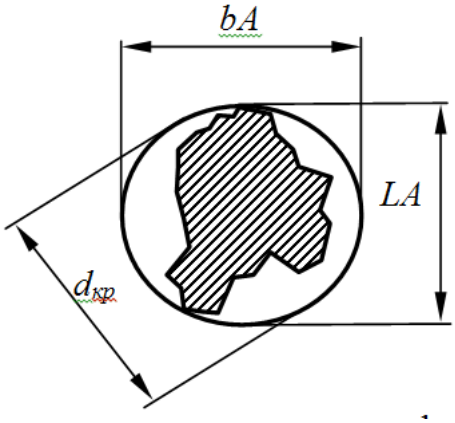


Рисунок 1 – Геометрические характеристики формы абразивного зерна

$$S_A = \frac{\sqrt{\frac{4}{\pi} b_A L_A}}{d_{кр}}, \qquad (4)$$

где $d_{кр}$ – диаметр аппроксимирующего круга.

Откуда коэффициент динамической прочности определялся по следующему отношению:

$$K_д = \frac{S_{A1}}{S_{A2}}, \quad (5)$$

где S_{A1}, S_{A2} – коэффициент формы после разрушения и до разрушения соответственно.

Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамическая прочность частиц абразива на разрушение при ударе о преграду

Абразивное зерно	Коэффициент динамической прочности, $K_д$
Черный карбид кремния	0,98
Нормальный электрокорунд	0,8
Наномодифицированный абразив	0,8
Гранат	0,85
Песок	0,4

Результаты испытаний динамической прочности абразивов показали, что по динамической прочности наиболее близким к гранату отечественным абразивом является нормальный электрокорунд и наномодифицированный абразив; черный карбид кремния показал лучшие результаты, что связано с его высокой микротвердостью (более 30 ГПа).

Испытания разрушаемости (хрупкости) зерен абразива проводили в шаровой мельнице, что соответствует принятым национальным стандартам США и стран ЕЭС.

Испытания проводились следующим образом. В дробильную камеру засыпали пробу испытуемого абразива и стальные шары для измельчения. Далее вводиться требуемое количество оборотов барабана. После совершения барабаном требуемого количества оборотов их снимают, извлекают продукты измельчения и подвергают ситовому анализу.

Для испытаний отбирали 3 пробы из нескольких партий серийного абразива отечественного и импортного производства. Ситовый анализ во всех случаях проводили одним и тем же комплектом контрольных сит.

Установлен, что зерновой состав продуктов измельчения непрерывно и плавно меняется с увеличением времени помола. Критерием разрушаемости абразивного зерна является процентное содержание в продуктах измельчения фракций, прошедших через контрольное сито. Из методических соображений регистрировали остаток отдельных фракций на сите, то есть процент неразрушенных зерен.

Различные типы абразивных зерен отличаются по остатку отдельных фракций в продуктах измельчения. Анализ результатов показывает, что хрупкость абразивов так же зависит от их зернистости. Поэтому сопоставляли пробы одинаковой зернистости F70.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Результаты испытаний показали:

Хрупкость абразивного зерна карбида кремния является наибольшей по сравнению с хрупкостью абразивного зерна других типов. При гидроабразивной резке единичное зерно испытывает значительные контактные воздействия, зерно углубляется в материал менее чем на половину своего диаметра, поэтому хрупкость зерна имеет важное значение, а при резании толстолистовых стальных материалов, играет первостепенную роль. Использование карбида кремния для гидроабразивного резания не позволит достичь качества и производительности, как при использовании граната.

Изучение количественных зависимостей разрушаемости нормального электрокорунда и наномодифицированного абразива дает основание рекомендовать эти типы абразивного материала для применения для гидроабразивного резания.

Таблица 2 – Разрушаемость (хрупкость) абразивных зерен

Абразивное зерно	Зернистость	Масса пробы, г	Остаток на сите, г.	Хрупкость, %
Черный карбид кремния	F70	90	25	27
		100	29,1	29,1
		110	33,3	30,2
Нормальный электрокорунд	F70	90	43,2	48
		100	47,5	47,5
		110	53	48,1
Наномодифицированный абразив	F70	90	31,2	34,6
		100	32	32
		110	32,5	29,5
Гранат	F70	90	51,8	57,5
		100	52,5	52,5
		110	53,5	48,6

Абразивная способность характеризуется массой снимаемого при обработке материала до затупления зерен, либо определяется количеством снятого за определенное время материала.

Для определения абразивной способности исследуемый абразивный материал помещали на контрольную поверхность, которая вращалась с колебательными движениями. По количеству съема материала с контрольной поверхности за определенный промежуток времени судили об абразивной способности исследуемого абразива.

Исследование осуществляли на лабораторном измерителе уровня износа PEI/300/B/2производства «Ceramic Instruments s.r.l» (Италия).

Методика проведения испытаний заключается в следующем. В качестве керамического контрольного образца была выбрана напольная плитка размером 500х500 мм производства ОАО «КМ Груп» (г. Орел). Из указанной плитки было выпилено 10 квадратных образцов с размерами сторон 100 ± 1 мм. Один из образцов являлся эталоном (т.е. он не подвергался абразивной обработке). Другой образец помеченный символом «К» являлся образцом сравнения и обрабатывался по стандартной методике (т.е. в качестве абразива использовали гранатовый песок). Остальные образцы имели маркировку соответствующую нумерации испытуемых абразивных материалов.

Несущую плиту приводят во вращение, а затем после 1500 оборотов извлекают контрольные образцы и образец сравнения, промывают в проточной воде, помещают в сушильный шкаф примерно на 30 мин. для подсушки лицевой поверхности и сопоставляют по внешнему виду между собой и с эталоном. При этом образцы рассматривают с расстояния 2 м с высоты человеческого роста при освещенности 300–400лк в закрытом помещении.

По результатам исследования установлено, что абразивные материалы можно расположить в следующий ряд в порядке уменьшения абразивного действия на контрольные керамические образцы: карбид кремния – нормальный электрокорунд – гранатовый песок – наномодифицированный абразив.

С целью уточнения полученных данных были осуществлены микроскопические исследования поверхности контрольных образцов, эталона и образца сравнения. Исследования осуществляли с использованием микроскопа Axioskop MAT производства фирмы Карл Цейсс (Германия) при увеличении х50 в светлом поле, в темном поле и с использованием дифференциально–интерференционного контраста (в поляризованном свете).

Выводы:

1. Абразивные материалы из нормального электрокорунда превосходят по абразивной способности гранатового песка на 20 – 30 %. Следовательно, при гидроабразивном резании

этот тип абразивных материалов должен показать лучшую режую способность по сравнению с гранатом.

2. Наномодифицированный абразив показал наименьшую абразивную способностью. Однако с гранатом такое различие составляет 5 – 10 %, что дает возможность его использовать в качестве замены гранатового песка для гидроабразивной резки.

Исследование скорости эрозии материала при гидроабразивном резании для различных типов абразивов проводили в сравнении максимальной подачи сопла на прямолинейном резе для каждого образца при соответствующем расходе, при котором будет постоянным массовый расход и переменным объемный расход (таблица 3). Для каждого реза использованы одинаковые исходные настройки по скорости реза, а затем увеличен процент подачи до тех пор, пока образец еще будет прорезать материал, но последующее увеличение подачи уже приведет к касательному выбросу струи и как следствие несквозному резу.

Для эксперимента используем материал сталь Ст 3 толщиной 12 мм.

Параметры станка: фокусирующая трубка – 0,76 мм, давление – 340 МПа.

Таблица 3 – Результаты испытаний абразивов по скорости гидроабразивного резания

Образец	Подача, в процентах от заданной по программе станка
Нормальный электрокорунд	138
Наномодифицированный абразив	122
Гранат MESH 80 (Индия)	125

Помимо различия в максимальной подаче, получились детали с разной степенью шероховатости. На рисунке 2 показаны образцы поверхности после гидроабразивного резания различными типами абразивов.

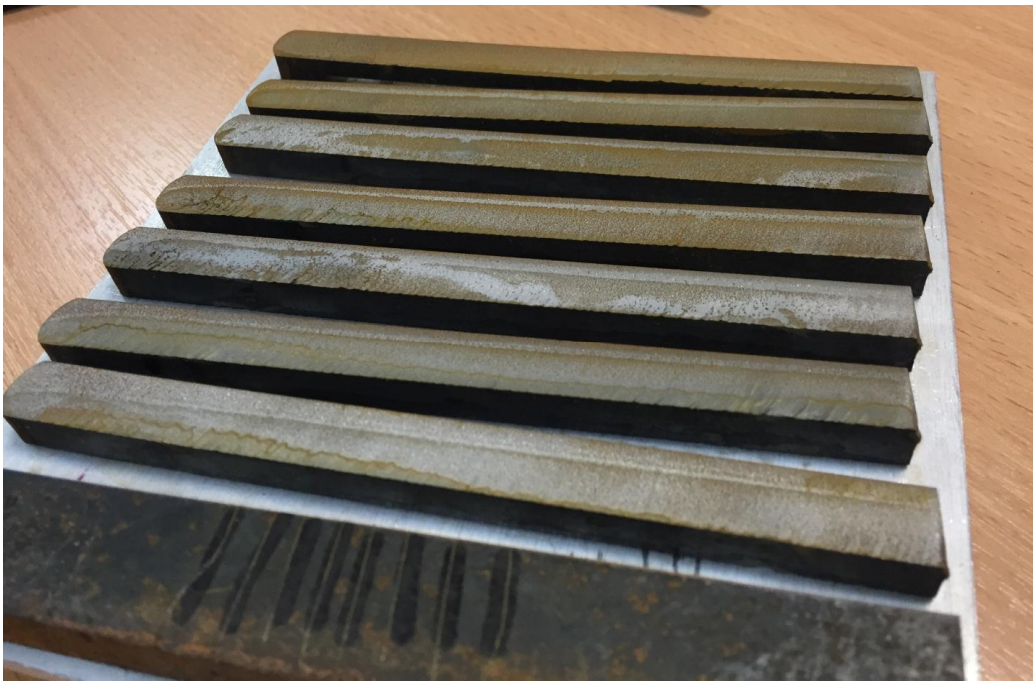


Рисунок 2 – Фотографии поверхности образцов после прямолинейных резов

Выводы.

1. Нормальный электрокорунд и наномодифицированный абразив показали наименьшую шероховатость обработанной поверхности.

2. Нормальный электрокорунд показал лучшую режущую способность, но он имеет самую высокую стоимость.

3. Наномодифицированный абразив – идеально сбалансирован по расходу, скорости и стоимости реза.

4. В результате проведенной серии экспериментов наблюдался сильный износ фокусирующей трубки при использовании нормального электрокорунда. Дальнейшее использование трубки стало невозможно из–за большой конусности получаемых деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро– и гидроабразивной обработки заготовок / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2012. – № 6 – С. 15–20.

2. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений «Машиностроение». – 2011. – №4. – С. 46 – 54.

3. Степанов, Ю.С. Разрушение преграды сверхзвуковым потоком свободных абразивных частиц / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев. – М.: Издательство «Спектр», 2010. – 149 с.

4. Барсуков, Г.В. Моделирование числа абразивных частиц, участвующих в процессе формирования поверхности детали при резании сверхзвуковой гидроабразивной струей /Г.В. Барсуков, Ю.С. Степанов, А.В. Михеев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – №1. – С. 15–19.

5. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 1. – С. 9 – 14.

6. Барсуков, Г.В. Влияние параметров течения сверхзвуковой гидроабразивной струи на геометрическую форму поверхности разрушения преграды / Г.В. Барсуков Ю.С. Степанов, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2 –5. С. 53 – 63.

7. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties /A. Buchacz, Y. Stepanov, G. Barsukov, A. Mikheyev // Selected engineering problems.– № 4. – 2013. – P. 157–162. ISSN 2299–954X (Poland).

8. Modeling of Stress–strainstatus Target Material and Abrasive Particles Impact at Supersonic /Y.S Stepanov., G.V Barsukov, E.A. Alushin // Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series mechanics, machine science, machine–building. – 2012. – № 2. – P. 29–36

9. Барсуков, Г.В. Разработка теоретических предпосылок создания из вторичных техногенных неорганических веществ новых наноструктурированных абразивных материалов, обладающих заданным набором свойств / Г.В. Барсуков, А.А. Александров, К.Ю. Фроленков // Известия Юго–Западного го сударственного университета. – 2013 – № 3 – С. 118 – 123.

10. Барсуков, Г.В. Разработка технологии модификации вторичных техногенных абразивных материалов для гидроабразивного резания / Г.В. Барсуков, А.А. Александров, К.Ю. Фроленков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 3–2. – 2013. – С. 82 – 90.

11. Барсуков, Г.В. Оптимизация энергетических затрат технологии резания материалов гидроабразивной струей / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, А.А. Александров // Наука и мир. – 2013. –№ 2. – С. 46 – 49.

12. Барсуков, Г.В. Моделирование отклонения гидроабразивной струи при резании пакетированного материала с межслойным зазором от скорости подачи сопла и типа абразива / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Вестник науки и образования Северо–Запада России. – Т.1. №2.— 2015. – С. 48–54.

13. Барсуков, Г.В. Техника и технологии XXI века: монография / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, Т.А. Журавлева, В.Б.Сидоров и др.– Книга 4 / Под общ. ред. И.Б. Красиной. – Ставрополь: Логос, 2015. – 209 с.

14. Barsukov, G.V. Waterjet cutting performance evaluation / G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev, T.A. Zhuravleva, V.B. Sidorov // Science in the modern information society VII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 9–10.11.2015, Vol. 3. North Charleston, SC, SA:CreateSpace. – 2015. – pp. 93–95.

Барсуков Геннадий Валерьевич
ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел
д.т.н., профессор, зав. кафедрой
E–mail: awj@list.ru

Кожус Ольга Геннадьевна
ОГУ им. И.С. Тургенева, г. Орел
аспирант
E–mail: awj@list.ru

G.V. BARSUKOV, O.G. KOZHUS

STUDY CUTTING ABILITY NANO MODIFIED ABRASIVE FROM WASTE COLOR PRODUCTION WATERJET CUTTING OF MATERIALS

The authors present the results of studies of physical–mechanical and operational characteristics of various types of abrasives, the results of which revealed that the dynamic strength and cutting ability of the closest to the garnet sand Waterjet cutting is normal corundum and abrasive waste nanomodified color production.

Keywords: *abrasive waterjet cutting, corundum, garnet, nano surface modification, diffusion, high–temperature processing.*

BIBLIOGRAPHY

1. Stepanov, Ju.S. Sovremennye tehnologii gidro– i gidroabrazivnoj obrabotki zagotovok / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Aljushin // Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii. – 2012. – № 6 – S. 15–20.

2. Galinovskij, A.L. Minimizacija tehnologicheskoj sebestoimosti gidroabrazivnogo rezanija s uchetom stoimostnyh i tehnologicheskih parametrov processa obrabotki / A.L. Galinovskij, V.A. Tarasov, V.M. Elfimov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij «Mashinostroenie». – 2011. – №4. – C. 46 – 54.

3. Stepanov, Ju.S. Razrushenie pregrady sverhzvukovym potokom svobodnyh abrazivnyh chastic / Ju.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Miheev. – M.: Izdatelstvo «Spektr», 2010. – 149 s.

4. Barsukov, G.V. Modelirovanie chisla abrazivnyh chastic, uchastvujushhih v processe formirovanija poverhnosti detali pri rezanii sverhzvukovoj gidroabrazivnoj struej /G.V. Barsukov, Ju.S. Stepanov, A.V. Miheev // Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. – 2009. – №1. – S. 15–19.

5. Barsukov, G.V. Opredelenie proizvoditelnosti gidroabrazivnogo rezanija s uchetom harakteristik abrazivnogo zerna / G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. – 2008. – № 1. – S. 9 – 14.

6. Barsukov, G.V. Vlijanie parametrov techenija sverhzvukovoj gidroabrazivnoj strui na geometricheskuju formu poverhnosti razrushenija pregrady / G.V. Barsukov Ju.S. Stepanov, A.V. Miheev // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2012. – № 2 –5. S. 53 – 63.

7. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties /A. Buchacz, Y. Stepanov, G. Barsukov, A. Mikheyev // Selected engineering problems.– № 4. – 2013. – P. 157–162. ISSN 2299–954X (Poland).

8. Modeling of Stress–strainstatus Target Material and Abrasive Particles Impact at Supersonic /Y.S Stepanov., G.V Barsukov, E.A. Alushin // Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series mechanics, machine science, machine–building. – 2012. – № 2. – R. 29–36

9. Barsukov, G.V. Razrabotka teoreticheskih predposylok sozdanija iz vtorichnyh tehnogennyh neorganicheskih veshhestv novyh nanostrukturirovannyh abrazivnyh materialov, obladajushhih zadannym naborom svojstv / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov, K.Ju. Frolenkov // Izvestija Jugo–Zapadnogo go sudarstvennogo universiteta. – 2013 – № 3 – S. 118 – 123.

10. Barsukov, G.V. Razrabotka tehnologii modifikacii vtorichnyh tehnogennyh abrazivnyh materialov dlja gidroabrazivnogo rezanija / G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov, K.Ju. Frolenkov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – № 3–2. – 2013. – S. 82 – 90.

11. Barsukov, G.V. Optimizacija jenergeticheskih zatrat tehnologii rezanija materialov gidroabrazivnoj struej / G.V. Barsukov, A.V. Miheev, A.A. Aleksandrov // Nauka i mir. – 2013. –№ 2. – S. 46 – 49.

12. Barsukov, G.V. Modelirovanie otklonenija gidroabrazivnoj strui pri rezanii paketirovannogo materiala s mezhslojnym zazorom ot skorosti podachi sopla i tipa abraziva / G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Vestnik nauki i obrazovanija Severo–Zapada Rossii. – T.1. №2.— 2015. – S. 48–54.

13. Barsukov, G.V. Tehnika i tehnologii XXI veka: monografija / G.V. Barsukov, A.V. Miheev, T.A. Zhu–ravleva, V.B.Sidorov i dr. – Kniga 4 / Pod obshh. red. I.B. Krasinoj. – Stavropol: Logos, 2015. – 209 s.

14. Barsukov, G.V. Waterjet cutting performance evaluation / G.V. Barsukov, A.V. Mikheyev, T.A. Zhuravleva, V.B. Sidorov // Science in the modern information society VII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 9–10.11.2015, Vol. 3. North Charleston, SC, SA:CreateSpace. – 2015. – pp. 93–95.

Barsukov Gennadiy Valerevich
OSU them. IS Turgenev, Orel
Ph.D., Professor, Head. the Department of
E–mail: awj@list.ru

Kozhus Olga Gennadevna
OSU them. IS Turgenev, Orel
graduate student
E–mail: awj@list.ru

УДК 621. 923.02:621.892

В.А. ПАНАЙОТИ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРИ ШЛИФОВАНИИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК

На основании известной методики рассчитан коэффициент легированности различных марок быстрорежущей стали и проведены сравнительные исследования по выявлению эффективности их обработки в условиях применения твердого смазочного материала предложенной композиции. В работе рассмотрены закономерности изменения удельного расхода эльбора при шлифовании, параметра шероховатости и величины остаточного аустенита на обработанной поверхности. Показана эффективность применения твердой смазки по всем исследованным параметрам.

Ключевые слова: *твердая смазка, эльборовый круг, заточка, быстрорежущая сталь, шероховатость поверхности, удельный расход эльбора, остаточный аустенит.*

Для повышения эффективности процесса шлифования обычно стремятся повысить теплостойкость керамической связки и прочность закрепления в ней зерен абразива. Работоспособность круга можно увеличить и путем нанесения на его режущую поверхность твердой смазки, которая надежно удерживается в поверхностном слое круга благодаря пористости связки и способствует улучшению ее антифрикционных свойств [1,2].

Влияние твердой смазки на эксплуатационные характеристики эльборовых кругов исследовали при шлифовании заготовок из различных марок быстрорежущих сталей, что позволяет моделировать процесс заточки лезвийных инструментов. Применение смазки обосновывается невозможностью или нежелательностью использования смазочно–охлаждающих жидкостей в силу затруднения наблюдения за зоной обработки, отсутствием системы подачи жидкости в конструкции станка и возможного воздействия агрессивных средств на оператора.

Исследования проводили на модернизированном станке модели 3А64Д, оснащенном приспособлением для нанесения твердой смазки в процессе обработки. Шлифовали закаленные быстрорежущие стали эльборовыми чашечными кругами ЛЧК 125х32х10х5 на керамической связке С10 различной зернистости и твердости, концентрации 100% структуры №8. Твердую смазку составляли из нескольких компонентов с различной температурой плавления на основе гексогонального нитрида бора.

В работе исследовали влияние смазочного материала на износ круга при шлифовании различных марок быстрорежущей стали. Шлифуемость сталей сравнивали по коэффициентам легированности, который согласно работе [3] определяется как отношение эквивалента вольфрама исследуемой быстрорежущей стали к эквиваленту вольфрама в стали Р18:

$$К_л = \frac{W_{экв.}}{W_{экв.Р18}} \quad (1)$$

Эквивалент вольфрама рассчитывали по формуле в соответствии с химическим составом сталей:

$$W_{экв.} = 0,1*(W + 0,5Cr + 2Mo + 4V + 1,6Co) \quad (2)$$

где: W, Cr, Mo, V, Co – средние арифметические значения содержания вольфрама, хрома, молибдена и кобальта в стали, %;

цифры 1; 0,5; 2; 4; 1,6 являются коэффициентами, отражающими степень влияния на обрабатываемость стали соответствующего легирующего элемента.

Формула (2) оценивает степень влияния на обрабатываемость быстрорежущей стали каждого легирующего элемента в сопоставлении со степенью влияния вольфрама. Оптимальное содержание легирующих элементов в стали устанавливается прежде всего в зависимости от содержания вольфрама в твердом растворе.

Рассчитанные по формуле (1) коэффициенты легированности приведены в таблице 1

[4]. Средние арифметические значения содержания легирующих элементов определяли по химическому составу стали по ГОСТ19265–73 и ЧМТУ–1–331–68 (для стали Р12Ф3К10М3).

Таблица 1 – Коэффициент легированности быстрорежущих сталей

Марки стали	ГОСТ или ТУ	Содержание элементов, %						Эквива–лент воль–фрама Wэкв.	Коэффи–циент легиро–ванности
		C	Cr	W	V	Mo	Co		
Р18	ГОСТ19265–73	0,7–0,8	3,8–4,0	17,8–18,4	1,2–1,4	0,5–0,7	–	2,65	1,0
Р6М5	ГОСТ19265–73	0,8–0,9	3,8–4,0	6,1–6,5	2,0–2,2	5,3–5,5	–	2,74	1,03
Р9К5	ГОСТ19265–73	0,9–1,0	3,8–4,2	9,0–9,6	2,0–2,3	0,4–0,6	5,2–5,4	2,94	1,11
Р9Ф5	ГОСТ19265–73	1,3–1,4	4,0–4,4	10,0–10,4	4,5–4,7	0,6–1,0	–	3,23	1,22
Р9К10	ГОСТ19265–73	0,9–1,0	4,0–4,4	9,8–10,4	2,4–2,6	0,8–1,0	10,1–10,5	4,01	1,5
Р12Ф3К10 М3	ЧМТУ–1–331–68	1,2–1,3	3,6–4,0	12,6–13,0	3,4–3,6	2,7–3,0	10,1–10,5	5,1	1,92

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные, полученные при шлифовании с нанесением смазочного материала предложенной композиции быстрорежущих сталей эльборовым кругом ЛО8 С1 100% С10. Для сравнения приведены результаты при обработке этих же сталей в обычных условиях. При введении в зону резания смазочной композиции удельный расход эльбора при обработке всех марок стали уменьшается почти в 2 раза. Это свидетельствует об эффективности применения предложенной композиции смазочного материала при шлифовании различных марок быстрорежущей стали. Необходимо отметить, что зависимость удельного расхода эльбора от степени легированности основы стали имеет монотонно изменяющийся характер, что также свидетельствует о незначительном влиянии карбидов на шлифуемость стали.

Результаты экспериментов по определению удельного расхода эльбора в зависимости от марки обрабатываемой быстрорежущей стали можно представить в виде эмпирических зависимостей от коэффициента легированности:

$$q = c_{\text{м}} * \text{к}_k^{a_{\text{м}}} \qquad (3)$$

где: $c_{\text{м}}$=1,64; $a_{\text{м}}$=1,41 – при шлифовании со смазкой; $c_{\text{м}}$=3,56; $a_{\text{м}}$=1,18 – при шлифовании без смазки.

Современные быстрорежущие стали существенно различаются по химическому составу и физико–механическим свойствам. Этот факт, несомненно, должен влиять на формирование микрорельефа шлифуемой поверхности. Экспериментальные данные показали (рисунок 2), что с повышением степени легированности быстрорежущей стали (т.е. с увеличением коэффициента легированности), показатель шероховатости Ra уменьшается в 1,8 раза. Это объясняется снижением теплопроводности сталей с увеличением степени легированности их основы, что приводит к локализации тепла в тонком поверхностном слое, размягчению выступов микронеровностей и их выравниванию. При введении твердой смазка в процессе резания показатель шероховатости также снижается в 1,3– 1,5 раза, что может обьясняться более эффективным использованием режущих зерен эльбора (уменьшение удельного расхода, рисунок 1), т.е. улучшением геометрии рельефа поверхности зерен.

Для изучения закономерностей влияния легированности быстрорежущей стали на изменение фазового состава поверхности после шлифования был проведен рентгеноструктурный анализ ионизационным методом на дифрактомере ДРОН–I [5]. На рисунке 3, а приведена зависимость количества аустенита на обработанной поверхности от степени легированности быстрорежущих сталей.

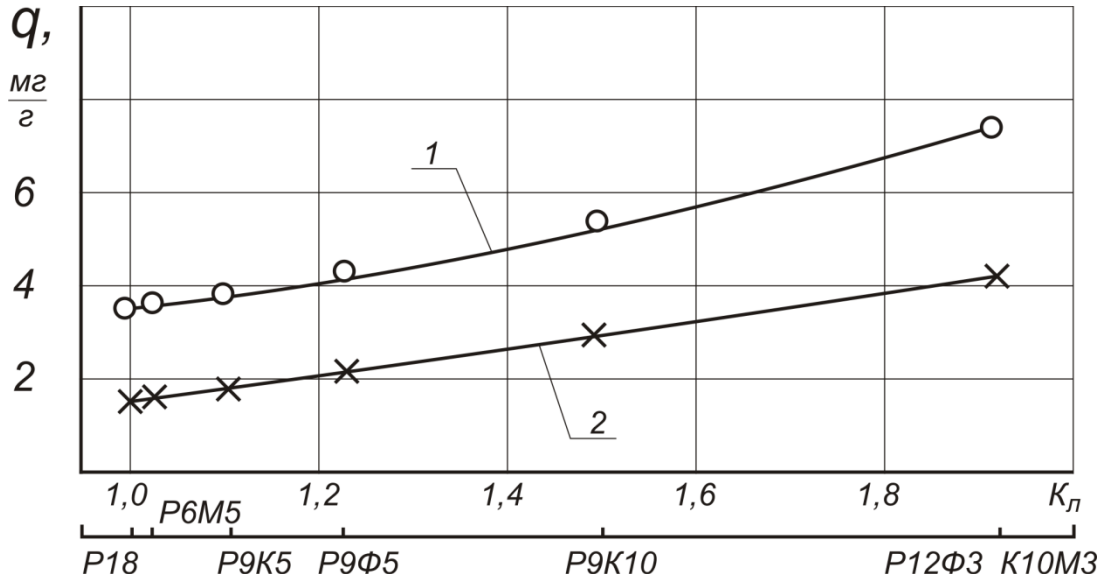


Рисунок 1 – Изменение удельного расхода эльбора при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 быстрорежущих сталей с различным коэффициентом легированности:
Режим резания: V = 19 м/с; S = 1 м/мин.; t =0,02 мм/дв.ход. 1 – без смазки; 2 – со смазкой

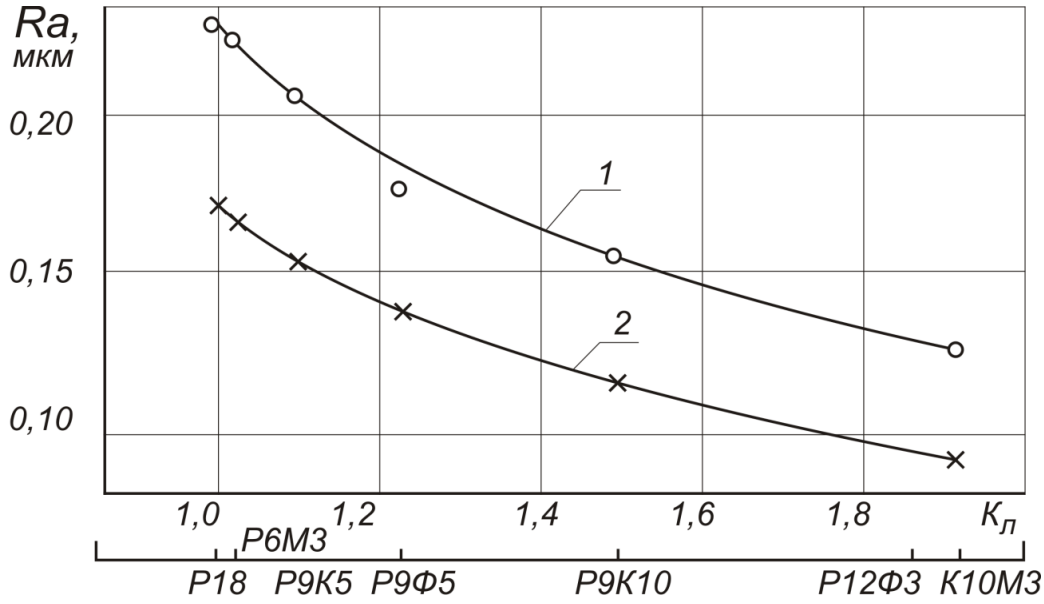


Рисунок 2 – Изменение высоты микронеровности при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 быстрорежущих сталей с различным коэффициентом легированости:
Режим резания: V = 19 м/с; S = 1 м/мин; t =0,02 мм/дв.ход. 1 – без смазки; 2 – со смазкой

Фазовые превращения мартенсита в аустенит характеризуются хотя и твердым, но относительно хрупким состоянием, и поэтому его присутствие в поверхностных слоях режущего инструмента резко снижает стойкость инструмента и приводит к увеличению его износа. В сталях различных марок структурные и фазовые превращения под воздействием температуры происходят не в одинаковой степени. Если в поверхностном слое стали Р9Ф5 ($К_Л$ = 1,22) после шлифования без смазки и с ее использованием обнаружено 8 и 12% остаточного аустенита соответственно. Такое снижение интенсивности фазовых и структурных превращений можно объяснить уменьшением чувствительности высоколегированных быстрорежущих сталей к температурным нагрузкам.

На рисунке 3, б представлены интервалы температур нагрева под закалку исследуемых быстрорежущих сталей. Увеличение степени легированности быстрорежущей

стали приводит к более устойчивому к температурным нагрузкам состоянию её основы – легированного мартенсита. Об этом свидетельствует повышение температуры нагрева под закалку пропорционально увеличению коэффициента легированности стали. Указанное положение одинаково относится к шлифованию сталей как с применением смазки, так и без нее. Однако при использовании смазочного материала количество аустенита в стали в 1,4–1,7 раза меньше, что связано со снижением контактной температуры, влияющей на интенсивность фазовых превращений в поверхностном слое металла. Это свидетельствует о целесообразности использования смазочной композиции предложенного состава при заточке инструмента из различных марок быстрорежущей стали.

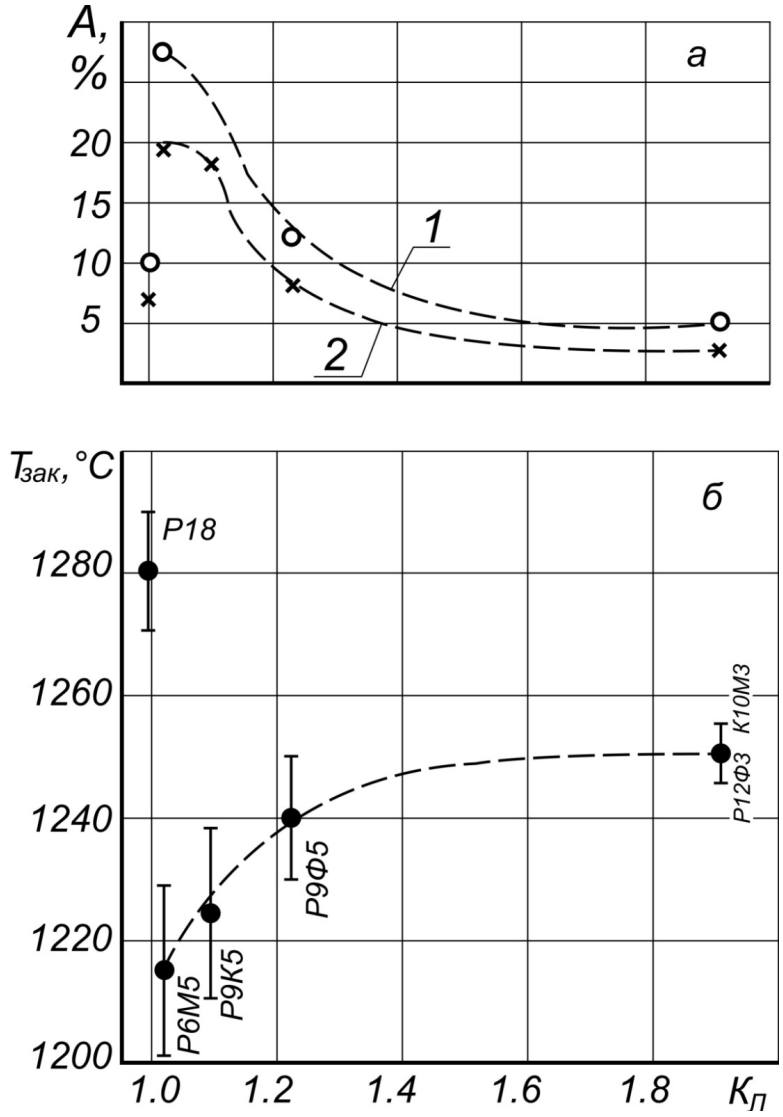


Рисунок 3 – Количество аустенита (а) после шлифования различных быстрорежущих сталей кругом ЛО8 С1 100% С10:

Режим резания: V = 19 м/с; S = 1 м/мин.; t =0,02 мм/дв.ход. 1 – без смазки; 2 – со смазкой и интервалы температуры нагрева быстрорежущих сталей под закалку (б).

Таким образом, исследование влияния твердого смазочного материала на различные показатели процесса шлифования (заточки) быстрорежущей стали разной легированости показало эффективность ее применения как в расходе эльбора (удельный расход эльбора уменьшается в 1,8 – 2,2 раза), так и в качественных показателях: шероховатости обработанной поверхности и содержании остаточного аустенита. Это свидетельствует о снижении силовой и тепловой интенсивности процесса и высокой смазывающей способности предложенной композиции смазки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали. 5 изд / Ю.А. Геллер. – М., Металлургия, 1983. – 568 с.

2. Панайоти, В.А. Разработка состава твердой смазки для заточки инструмента из сверхтвердых материалов / В.А. Панайоти // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Сб. научных трудов международной научной конференции (Москва, июнь 2010 г.) М. Машиностроение. – 2010. – С. 173–175.

3. Панайоти, В.А. Повышение эффективности шлифования при использовании твердых смазок / В.А. Панайоти // Научные труды 11 Международной научной конференции» Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» М. ИМАШ РАН. – 2012. – С. 337–338.

4. Кремнев, Л.С. Применение ванадиевых сплавов для повышения стойкости инструмента / Л.С. Кремнев, Ю.Г. Иванов // Станки и инструменты. – 1975. – № 1. – С. 25–26.

5. Панайоти, В.А. Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей / В.А. Панайоти // Научные труды IV Международной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: ИМАШ РАН, Издательский дом» Спектр». – 2015. – С. 189–190.

Панайоти Владимир Александрович
Московский технологический университет, г. Москва
Кандидат технических наук, доцент
Тел.: +7(903)573–52–73
E–mail: lek00@mail.ru

V.A. PANAYOTI

IMPROVING EFFICIENCY AND QUALITY IN GRINDING HIGH SPEED STEEL USING SOLID LUBRICANTS

Based on the known technique designed comparative studies to identify the effectiveness of their treatment of different brands alloying ratio of high–speed steel and held in the conditions of application of the proposed solid lubricant composition. The paper discusses the patterns of change in specific consumption CBN for grinding, roughness parameter and the value of the retained austenite in the surface finish. The efficiency of the use of a solid lubricant on all studied parameters.

Keywords: *solid lubricant, CBN circle, grinding, high–speed steel, the surface roughness, the specific consumption of CBN, the residual austenite.*

BIBLIOGRAPHY

1. Geller, YU.A. Instrumentalnyye stali. 5 izd / YU.A. Geller. – M., Metallurgiya, 1983. – 568 s.

2. Panayoti, V.A. Razrabotka sostava tverdoy smazki dlya zatochki instrumenta iz sverkhtverdykh materialov / V.A. Panayoti // Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii: Sb. nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Moskva, iyun 2010 g.) M. Mashinostroyeniye. – 2010. – S. 173–175.

3. Panayoti, V.A. Povysheniye effektivnosti shlifovaniya pri ispolzovanii tverdykh smazok / V.A. Panayoti // Nauchnyye trudy 11 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii» Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii» M. IMASH RAN. – 2012. – S. 337–338.

4. Kremnev, L.S. Primeneniye vanadiyevykh splavov dlya povysheniya stoykosti instrumenta / L.S. Kremnev, YU.G. Ivanov // Stanki i instrumenty. – 1975. – № 1. – S. 25–26.

5. Panayoti, V.A. Vliyaniye tverdykh smazok na fazovyy sostav shlifovannoy poverkhnosti bystrorezhushchikh staley / V.A. Panayoti // Nauchnyye trudy IV Mezhdunarodnoy konferentsii «Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii». – M.: IMASH RAN, Izdatelskiy dom» Spektr». – 2015. – S. 189–190.

Panayoti Vladimir Aleksandrovich
Moscow Technological University, Moscow
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ph.: +7(903)573–52–73
E–mail: lek00@mail.ru

УДК 621.91.002

В.В. ИСТОЦКИЙ, В.Б. ПРОТАСЬЕВ

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СТАНКОИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ В ПЕРИОД С 2000 ПО 2015 Г.Г. В РАЗРЕЗЕ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Анализируются вопросы развития станкоинструментальной промышленности России в период с середины 2000-х годов до настоящего времени. Приводятся официальные данные статистки в этой отрасли, обозначаются проблемы отрасли и возможные варианты их решения.

Ключевые слова: *станкоинструментальная промышленность, машиностроительный комплекс, промышленная политика, перспективы развития.*

Не многим более 30 стран в мире располагают собственной станкоинструментальной промышленностью [1–3], и Россия остается в их числе, однако со второго места по производству и третьего по потреблению станков и инструмента мы оказались в самом конце списка.

Объем мирового рынка инструмента (по данным 2005 г.) оценивается примерно в €17 млрд. Ведущие позиции на нем принадлежат немецким изготовителям, обеспечивающим 20% мирового производства. Основываясь на многолетних наблюдениях можно сказать, что стоимость потребляемого инструмента равна примерно 50% от стоимости потребляемого металлообрабатывающего оборудования [4].

Структура внешней торговли инструментом России, в 2003 году выглядела следующим образом (рисунок 1):

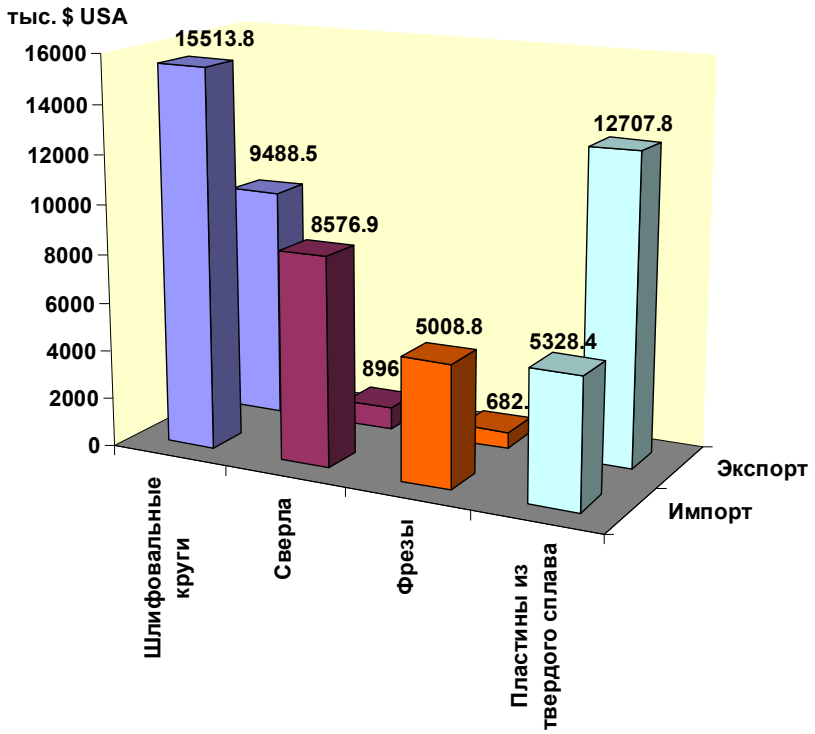


Рисунок 1 – Внешняя торговля инструментом в России в 2003 году

Для комплексной оценки вопроса производства и переточки режущего инструмента необходимо рассмотреть все его составляющие, первой из которых является технологическое оборудование.

Импорт, которым сейчас активно пользуются отечественные потребители металлообрабатывающего оборудования, не может решить российских проблем в виду того,

что ряд станков в странах–экспортерах признан продукцией «двойного назначения». Это значит, что промышленная безопасность и обороноспособность страны могут реально зависеть от волеизъявления зарубежных производителей оборудования и сопутствующих технологий.

К технологиям двойного назначения отнесены сегодня все виды оборудования, обеспечивающие производство летательных аппаратов, судов и другой стратегически важной продукции: пятикоординатные обрабатывающие центры, прецизионные станки, станки для объемной лазерной резки и т.д. В США, Японии, Европейском Союзе действуют системы лицензирования экспорта технологий двойного назначения. Национальные органы экспортного контроля могут отказать любому поставщику в лицензии на продажу любого товара, отнесенного к технологиям двойного назначения, на основании соображений национальной безопасности [5, 6].

К юридическим механизмам в последнее время добавились и начинают применяться специальные технические средства, ограничивающие несанкционированное зарубежным поставщиком использование и перемещение наукоемкого механообрабатывающего оборудования, такие как:

- оснащение оборудования датчиками контроля местоположения с помощью глобальной навигационной системы GPS;
- обязательное условие подключения оборудования к глобальной сети Интернет;
- установка скрытых системных программных модулей, накапливающих информацию о выпускаемой на оборудовании продукции.

Важно учитывать, что большая часть механообрабатывающего оборудования, внесенного в списки технологий двойного назначения, не производится в нашей стране или серьезно уступает по своим характеристикам зарубежным аналогам. Таким образом, не развивая высокие технологии и наукоемкие отрасли, российское оборонное и гражданское машиностроение будут находиться под угрозой потери доступа к передовому механообрабатывающему оборудованию, отнесенному к технологиям двойного назначения [7,8].

В тоже время по опубликованным статистическим данным средний возраст металлообрабатывающих станков с России более 30 лет. На большинстве предприятий применяются технологии 60–70–х годов прошлого века. По структуре, и прежде всего по наличию обрабатывающих центров и станков с числовым программным управлением (ЧПУ), доля которых в парке эксплуатируемого оборудования не превышает 5%, состав оборудования соответствует техническому уровню середины 1980–х годов. За рубежом доля используемого высокотехнологичного оборудования с ЧПУ приближается к 50%, а для предприятий, производящих пресс–формы, штампы, литейные формы и другую технологическую оснастку, достигает 85%.

Небольшой рост производства металлорежущих станков в России, наметившийся в 1999–2000 гг. в ходе осуществляемой тогда достаточно успешной стратегии импортозамещения, в 2001–2007 гг. сменился спадом. По сравнению с 1990 г. выпуск металлорежущих станков сократился в 14 раз, а станков с ЧПУ – в 44 раза. Официальные данные динамики станкостроительного производства показаны на рисунке 2.

Основными факторами, обусловившими стагнацию станкоинструментальной отрасли, явились низкая инвестиционная активность в обрабатывающей промышленности, уменьшившая в значительной степени спрос на продукцию этой отрасли, а также потеря конкурентоспособности выпускаемого станочного оборудования.

Одним из важнейших показателей, характеризующих состояние любой из отраслей российской промышленности, служит индекс промышленного производства.

Этот показатель равен отношению текущего объема производства в денежном выражении к объему промышленного производства в предыдущем или другом базисном году. Динамика индекса промышленного производства по разделу «Производство машин и оборудования» приведена на рисунке 3.

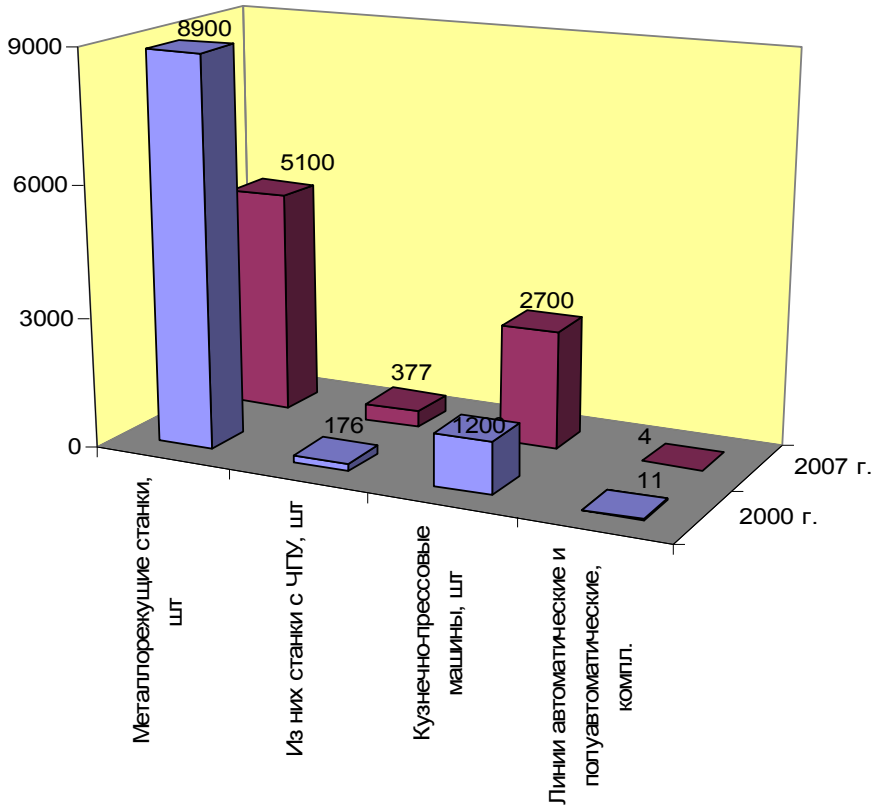


Рисунок 2 – Динамика производства в станкостроении 2000–2007 годах

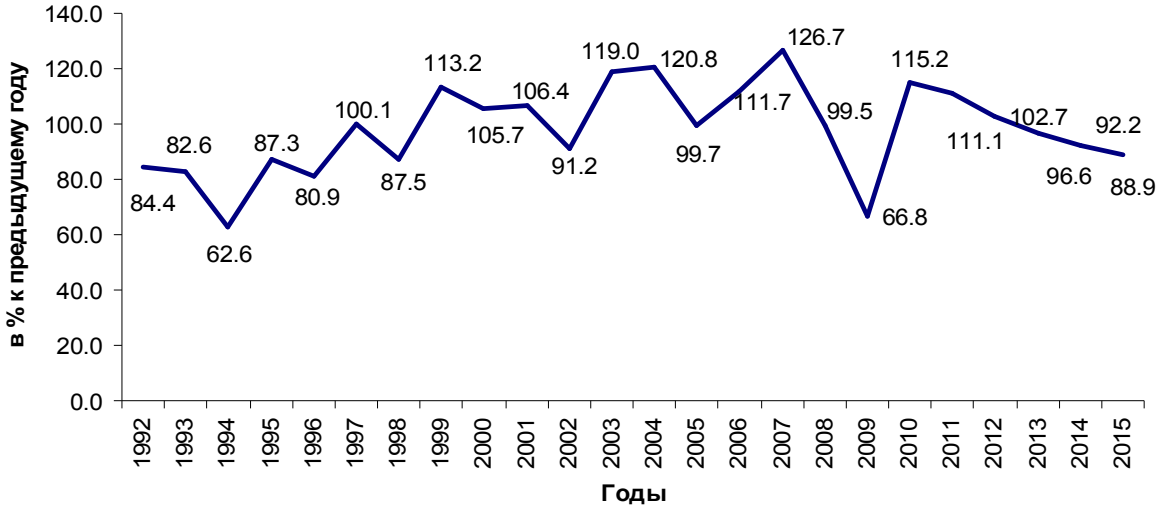


Рисунок 3 – Динамика изменения индекса промышленного производства по разделу «Производство машин и оборудования»

В период с 2011 по 2013 медленно, но решалась важнейшая задача по реализации Подпрограммы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» на 2011 –2016 годы ФЦП «Национальная технологическая база» на 2007 – 2011 годы.

В то же время Федеральную целевую программу «Национальная технологическая база» (2007–2011 гг.), и «План мер по развитию станкоинструментальной промышленности (2010–2011 гг.)» можно считать частично провалившимися, из–за общемирового кризиса 2009 г.

Некоторые планируемые показатели подпрограммы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности на период 2011–2016 гг.» показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели подпрограммы развития

№ п/п	Показатели и индикаторы	Единицы измерения	2016 год
1	Объем годового выпуска механообрабатывающего Оборудования (металлорежущих станков и кузнечно–прессовых машин)	тыс. ед.	35
2	Объем годового выпуска режущего инструмента	млрд. руб	50
3	Доля отечественного механообрабатывающего оборудования и инструмента во внутрироссийском потреблении (в ценовом выражении)	%	45
4	Доля экспорта в выпуске станкоинструментальной продукции (в ценовом выражении)	%	40
5	Доля в выпуске оборудования, разработанного в последние 5 лет (в ценовом выражении)	%	50

Интересно выглядит анализ статистических данных характеризующих индекс производства по высокотехнологичным обрабатывающим видам производства (рисунок 4), индекс производительности труда в обрабатывающих производствах (рисунок 5), производство машин и оборудования (рисунок 6), производство инструментов (рисунок 7).

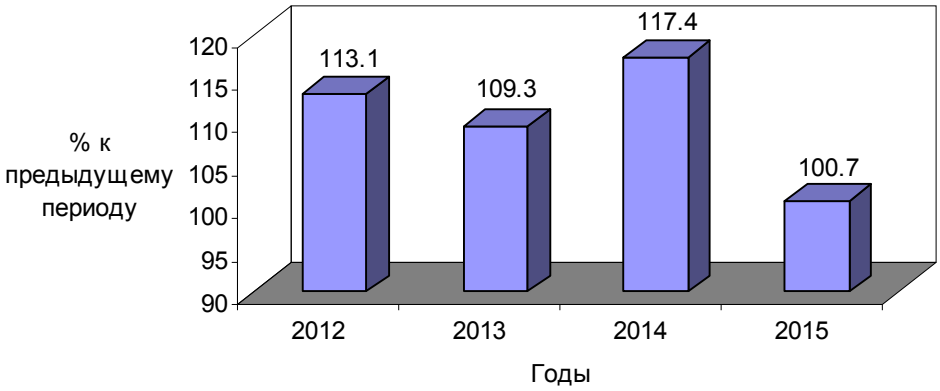


Рисунок 4 – Индекс производства по высокотехнологичным обрабатывающим видам производства

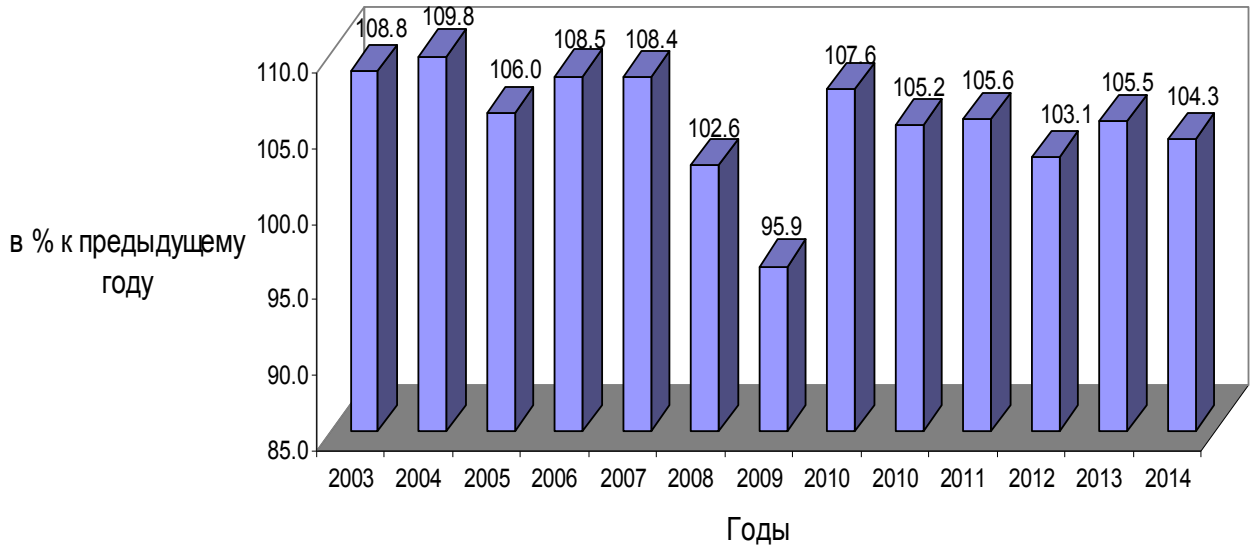


Рисунок 5 – Индекс производительности труда в обрабатывающих производствах

Анализируя показанные выше, а также другие данные, представленные Росстатом, можно отметить, что станкостроение и инструментальная отрасль занимает одно из последних мест среди отраслей машиностроительного комплекса. Отрасль, которая в 1980–е

годы занимала одно из ведущих мест, сегодня вследствие резкого спада производства не в состоянии обеспечить инновационно–технологическое обновление, и выполняет лишь функцию поддержания выбывающих из строя производственных мощностей.

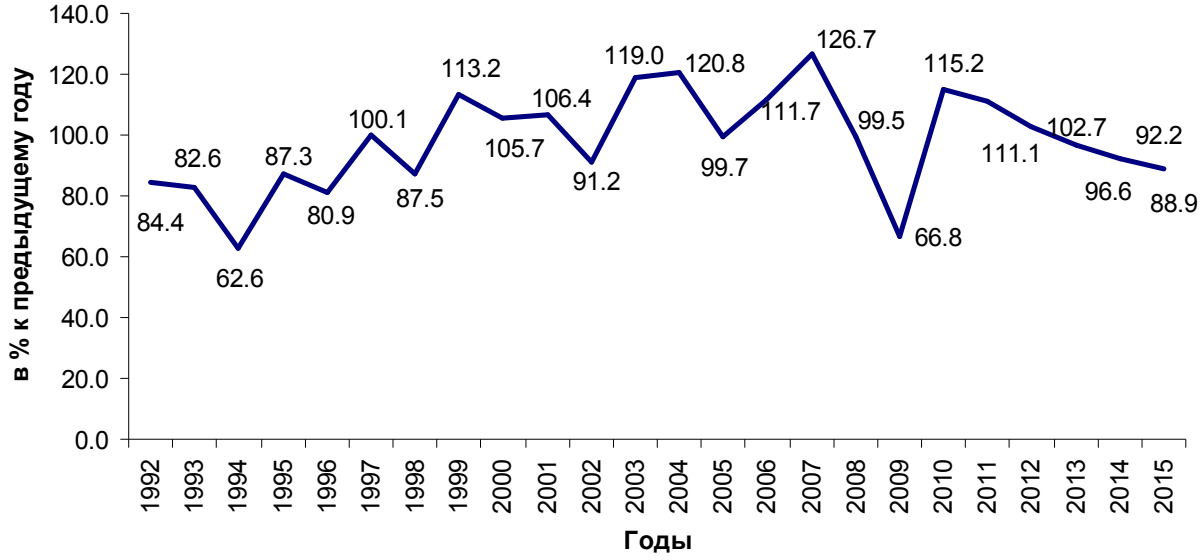


Рисунок 6 – Производство машин и оборудования

Обобщая вышеизложенное, и, опираясь на официальные статистические данные, данные Российской ассоциации «Станкоинструмент» и личные контакты авторов с производителями металлорежущего оборудования, становится понятно, что в России *отсутствует первая составляющая* изготовления и переточки современного режущего инструмента (с применением технологий т.н. «глубинного» шлифования) – производство многокоординатных шлифовально–заточных станков, оснащенных системой числового программного управления и программно–методическими комплексами (ПМК) для подготовки исходной и управляющей информации [9].

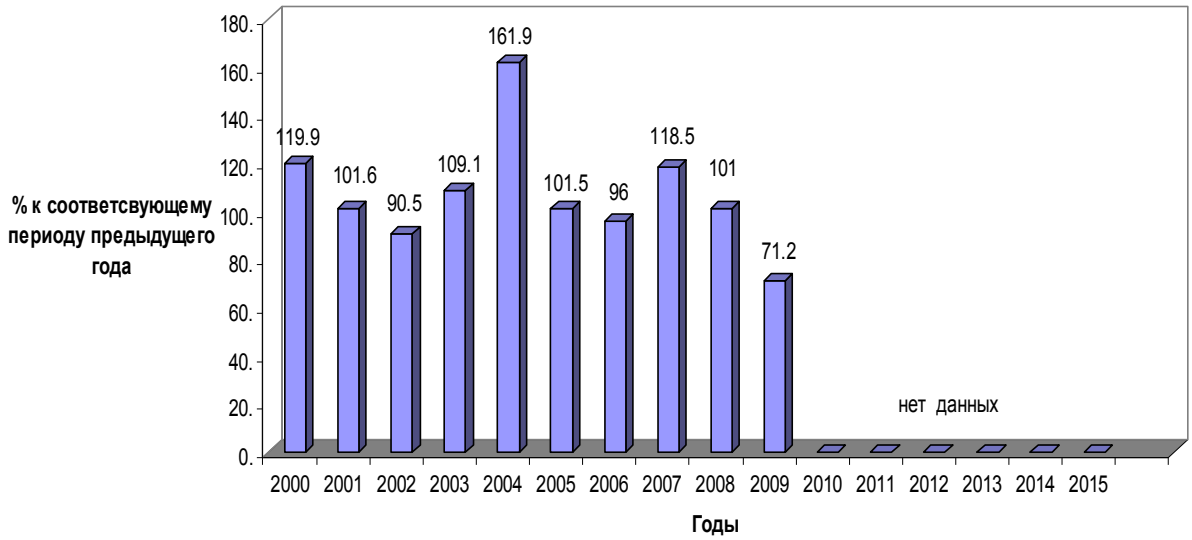


Рисунок 7 – Производство инструментов

В свою очередь, упомянутые ПМК, необходимые для производства режущего инструмента, и которые в мире имеют 5–6 государств не включены в программу импортозамещения, разработанную министерством связи и массовых коммуникаций РФ, и не входят в реестр отечественного программного обеспечения (ПО).

Теперь рассмотрим *вторую составляющую* современной технологии производства режущих инструментов – *шлифовальные круги*.

Для конкурентоспособности на внешнем и внутреннем рынках шлифовальные круги (абразивные, эльборовые, алмазные) должны отвечать следующим требованиям:

- иметь геометрическую точность не ниже чем по стандартам ISO;
- обеспечивать стабильность эксплуатационных параметров (характеризуется объемом снимаемого материала в единицу времени и стойкостью режущей кромки) и находиться на уровне аналогичной продукции ведущих зарубежных фирм;
- иметь стоимость ниже импортного аналога.

Представленные на российском рынке отечественные производители шлифовальных кругов несколько отстают от мирового уровня.

Для обеспечения вышеуказанных требований им необходимо разработать нормативное и технологическое обеспечение повышения геометрической точности, а также технологические процессы и методики контроля, обеспечивающие улучшение и стабильность эксплуатационных свойств инструмента. В последнее время, особенно в условиях импортозамещения эта отрасль делает успешные попытки в повышении качества выпускаемой продукции.

Третьей составляющей производства режущих инструментов является инструментальный материал. В отечественной металлургии (особенно твердосплавной) также отмечается значительное отставание. Производимые твердосплавные стержни для изготовления концевого прецизионного твердосплавного инструмента типа концевых фрез, разверток, сверл и т.п. в значительной степени уступают мировым производителям подобной продукции. Это происходит из–за отсутствия современного технологического оборудования, предназначенного для выпуска такой продукции, а оно, как говорилось выше, относится к технологиям «двойного назначения».

В последнюю пятилетку некоторые организации изыскали финансовую возможность и приобрели новое технологическое оборудование для выпуска качественных твердосплавных заготовок, но для выхода их на рынок необходимо пройти путь технологической совершенности изделия, необходимый для конкурентной цены. Этот этап обычно занимает несколько лет. Поэтому в настоящий момент авторы работы приобретают твердосплавное сырье в Германии, что оказывается дешевле, чем приобрести в России.

Подводя итог вышесказанному можно сказать, что инструментальная отрасль России показывает незначительный рост (чуть выше статистической ошибки), который может прекратиться в условиях мирового кризиса и внешнеэкономических санкций.

Решение проблем с инструментальным материалом и средствами производства без комплексного государственного подхода не даст желаемых результатов подъема отрасли, а государство в разрезе продолжающегося экономического кризиса (уже 2016 года) приняло решение упразднить финансирование машиностроительной отрасли страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махлин, М. Станочный парк ждет нового расцвета /М. Махлин // Российская Бизнес–газета № 586 от 26 декабря 2006 г. – Режим доступа: http://rg.ru/2006/12/26/metallurgiya.html.

2. Балков, В.П. Современное состояние рынка инструментального производства в России и перспективы развития / В.П. Балков // Проммашинструмент. – 2004. – № 24, январь–февраль. – Режим доступа: http://www.instrument.su/zurnals/24/zurnal_24Theme2.shtml.

3. Протасьев, В.Б. Состояние и производства современного металлорежущего инструмента в России / В.Б. Протасьев, В.В. Истоцкий //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 8. – С. 223–231.

4. Боровский, Г.В. Инструментальное производство в России / Г.В. Боровский. – М.: ВНИИинструмент, 2008. – 160 с.

5. Степанова, Е.Ю. Экспортные ограничения США и ЕС как стимул к развитию наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики / Е.Ю. Степанова //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3 (305). – С. 96–103.

6. О развитии станкоинструментальной промышленности / Тезисы доклада заместителя министра промышленности и энергетики РФ Андрея Реуса на заседании Правительственной комиссии по развитию

промышленности, транспорта и технологий 20 июля 2007 года. – Режим доступа: http://www.minprom.gov.ru /appearance/showAppearanceIssue?url=activity/machine/appearance/4.

7. Степанова, Е.Ю. Наукоемкие отрасли и высокие технологии – основа технологической безопасности и независимости страны /Е.Ю. Степанова //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2 (304). – С. 122–132.

8. Поландова, Л.И. Высокие технологии в инновационной экономике / Е.Ю. Степанова, Л.И. Поландова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. – № 3. – С. 156–167.

9. Истоцкий, В.В. Формирование режущей части фасонных борфрез с применением шлифовально–заточных станков с ЧПУ : дис. … канд. техн. наук : 05.03.01 / В.В. Истоцкий. – Тула, 2005. – 124 с.

Истоцкий Владислав Владимирович
Кандидат технических наук, доцент
ООО НПП «РИТ–Инжиниринг»,
Директор по научно–техническому развитию
г. Чехов Московской обл.
Тел.: +79105536681
E–mail: v_ist@mail.ru

Протасьев Виктор Борисович
Доктор технических наук,
профессор кафедры «ИМС»
Тульский государственный университет
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92
Тел.: +79531813852

V.V. ISTOTSKIY, V.B. PROTASEV

THE ANALYSIS OF THE CONDITION OF RUSSIA MACHINE TOOL INDUSTRY IN THE PERIOD FROM 2000 TO 2015 IN THE CONTEXT OF IMPORT SUBSTITUTION

The development of machine tool industry in Russia in the period from mid–2000s to the present is analyzed. Official data of statistics in this industry are given; industry challenges and their possible solutions are identified.

***Keywords**: machine tool industry, machine–building complex, industrial policy, development prospects.*

BIBLIOGRAPHY

1. Mahlin, M. Stanochnyj park zhdet novogo rascveta /M. Mahlin // Rossijskaja Biznes–gazeta № 586 ot 26 dekabrja 2006 g. – Rezhim dostupa: http://rg.ru/2006/12/26/metallurgiya.html.

2. Balkov, V.P. Sovremennoe sostojanie rynka instrumentalnogo proizvodstva v Rossii i perspektivy razvitija / V.P. Balkov // Prommashinstrument. – 2004. – № 24, janvar–fevral. – Rezhim dostupa: http://www.instrument.su/zurnals/24/zurnal_24Theme2.shtml.

3. Protasev, V.B. Sostojanie i proizvodstva sovremennogo metallorezhushhego instrumenta v Rossii / V.B. Protasev, V.V. Istockij //Izvestija Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – 2013. – № 8. – S. 223–231.

4. Borovskij, G.V. Instrumentalnoe proizvodstvo v Rossii / G.V. Borovskij. – M.: VNIIinstru–ment, 2008. – 160 s.

5. Stepanova, E.Ju. Jeksportnye ogranichenija SShA i ES kak stimul k razvitiju naukoemkih i vysokotehnologichnyh sektorov jekonomiki / E.Ju. Stepanova //Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. – № 3 (305). – S. 96–103.

6. O razvitii stankoinstrumentalnoj promyshlennosti / Tezisy doklada zamestitelja ministra promyshlennosti i jenergetiki RF Andreja Reusa na zasedanii Pravitelstvennoj komissii po razvitiju promyshlennosti, transporta i tehnologij 20 ijulja 2007 goda. – Rezhim dostupa: http://www.minprom.gov.ru/appearance/show AppearanceIssue?url=activity/machine/appearance/4.

7. Stepanova, E.Ju. Naukoemkie otrasli i vysokie tehnologii – osnova tehnologicheskoj bezopasnosti i nezavisimosti strany /E.Ju. Stepanova //Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2014. – № 2 (304). – S. 122–132.

8. Polandova, L.I. Vysokie tehnologii v innovacionnoj jekonomike / E.Ju. Stepanova, L.I. Polandova // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2007. – № 3. – S. 156–167.

9. Istockij, V.V. Formirovanie rezhushhej chasti fasonnyh borfrez s primeneniem shlifovalno–zatochnyh stankov s ChPU : dis. … kand. tehn. nauk : 05.03.01 / V.V. Istockij. – Tula, 2005. – 124 c.

Istotskiy Vladislav Vladimirovich
Candidate of technical Sciences
JSC «RIT–Engineering»
Director for scientific–technical development
Tel.: +79105536681
E–mail: v_ist@mail.ru

Protasev Viktor Borisovich
Doctor of technical Sciences, Prof. of Department
«Tools and metrological systems»
Tula state University
Tel.: +79531813852

УДК 621.234.123

Г.А. СУХОЧЕВ, В.Н. СОКОЛЬНИКОВ, С.Н. КОДЕНЦЕВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БАЛАНСИРОВКИ ВЫСОКООБОРОТНЫХ РОТОРОВ

В данной статье рассмотрены технологические аспекты статической и динамической балансировок высокооборотных роторов турбонасосных агрегатов, приведены схемы и балансировочное оборудование, показаны пути совершенствования процессов.

Ключевые слова: *балансировка ротора, статическая балансировка, динамическая балансировка, балансировочное оборудование, упрочнение микрошариками.*

Неуравновешенность роторов, обусловленная его дисбалансом, обуславливает появление вибраций, которые снижают многие эксплуатационные показатели машин и механизмов. Поэтому возникает необходимость балансировки роторов [1, 2]. Особенно это актуально для современных энергетических машин, энергоустановок космических аппаратов, к которым предъявляются высокие требования по надёжности, точности, ресурсу и долговечности.

Самым главным критерием, предъявляемый к ракетно–космической технике является коэффициент полезной нагрузки, который напрямую зависит от параметров самой ракеты и, в частности, напрямую от параметров двигателя ракетоносителя. Для достижения всех этих параметров и увеличения возможностей двигателя проводят манипуляции с частотой вращения роторов – увеличивают частоту вращения ротора до предела. Однако при повышении частоты вращения роторов возникают сложности в процессе обеспечения сборки и в процессе получения стабильных параметров ротора. Так, при частоте 50 $с^{-1}$ и разности расстояний между центром тяжести ротора и осью вращения 0,1 мм давление на подшипники будет соответствовать весу ротора. При увеличении частоты вращения до 100 $с^{-1}$ давление на подшипники будет в четыре раза превосходить статическое, а при частоте до 500 $с^{-1}$ – в 100 раз больше веса ротора [3].

Современные же турбонасосные агрегаты (ТНА) и турбонасосные гидроагрегаты (ТНГА), применяемые в ракетно–космической технике, имеют частоты вращения ротора от 1000 $с^{-1}$ и более. В связи с этим, их подшипники даже при небольшом смещении центра тяжести ротора воспринимают сильнейшие нагрузки. Высокие статические и динамические нагрузки влияют, прежде всего, на работоспособность рабочих колес водородного насоса и лопаток рабочих колес турбины, как наиболее напряженных элементов не только турбонасосного агрегата (ТНА), но и всего двигателя. Относительно большие радиальные габариты и сложная силовая схема корпусных деталей способствуют тому, что ряд элементов конструкции ТНА работает в области упругопластических деформаций. Достижение требуемой долговечности конструкции ТНА делает актуальной задачу обеспечения малоцикловой и многоцикловой усталости при высоком уровне напряженности элементов его конструкции.

Важной проблемой при создании таких ТНА, работающих на самом перспективном экологически чистом горючем – водороде, является присущая всем конструкционным материалам «водородная деградация» свойств, проявляющаяся в снижении прочностных и пластических характеристик, ускорении ползучести, снижении трещиностойкости, усталостной и длительной прочности и приводящая в конечном итоге к преждевременному разрушению конструкции. Совершенство двигателя в значительной степени зависит от напряженности турбины. Поэтому в водородных двигателях лопатки турбины всегда являются высоконапряженными элементами конструкции, определяющими ресурс двигателя. Сложность условий работы турбины заключается в воздействии на нее ряда трудно учитываемых факторов: кратковременного повышения температуры при запуске и выключении двигателя, неравномерности температурного поля на входе, пульсаций давления в проточной части, способа выхода на режим и порядка выключения, циклограммы

работы двигателя, деформации диска из–за утечек в турбину холодного водорода. Окружная рабочая скорость рабочего колеса турбины доходит до 600 м/с.

Для рабочих колес из титановых сплавов допустимые рабочие окружные скорости могут достигать 630 м/с и более, для стальных литых рабочих колес – до 290 м/с. Разрушающая окружная скорость при криогенной температуре составляет 800–900 м/с. Вибрационное состояние конструкции характеризуется высокими собственными частотами ~ 4000…8000 Гц [4]. Статическая прочность рабочего колеса турбины обеспечивается на всех режимах эксплуатации двигателя и подтверждается испытаниями на разгонном стенде, разрушающая частота вращения составляет 55000–56000 мин$^{-1}$. Однако в процессе эксплуатации при циклической работе двигателя на режимах, превышающих 100% номинального, в зонах корневого сечения лопаток и их сопряжения с бандажом возникают трещины. В указанных зонах местные напряжения с учетом концентрации превышают предел текучести материала. Это приводит, к образованию трещин в лопатках через пять–шесть циклов нагружения. Лопатки нагружены не только циклической температурно–силовой нагрузкой, связанной с запуском и остановом двигателя, но и пульсациями давления; переменные напряжения в лопатках от этой нагрузки относительно невелики и составляют ~ 8–10 МПа при частоте нагружения до 20000 Гц. Для избегания таких нагрузок на подшипники для роторов всех видов турбонасосных агрегатов, и не только, ввели требование по балансировке и фактическому дисбалансу роторов.

Надежность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в значительной степени определяется динамическими нагружениями и колебаниями роторов ТНА, возникающими на установившихся и переходных режимах работы. Даже кратковременные выходы их за допустимые пределы часто приводят к поломкам подшипников, возгораниям кислородных насосов, разгарам и разрывам корпусов, другим опасным авариям ЖРД.

В связи с этим, проблемы балансировки энергетических машин, высокоточного уравновешивания механизмов с достижением минимального уровня остаточного дисбаланса имеют крайне важное значение. Вместе с тем, данная проблема является и одной из самых сложных в современной технике.

Существует достаточно большое количество патентов и исследований, защищено много работ по проведению балансировки роторов ТНА ЖРД, и в общем виде известные методы балансировки делятся:

– по назначению – балансировка деталей, жестких и гибких собранных роторов, роторов на объектах (например, роторов крупных энергетических паровых и газовых турбин);

– по величине частоты вращения балансируемого ротора – низкочастотная и высокочастотная балансировка;

– по числу плоскостей коррекции – балансировка в одной, двух и трех плоскостях;

– по способу корректировки масс – уменьшением, добавлением или перестановкой корректирующих масс.

Все эти схемы объединяет одно, что для приведения центра массы на ось или (при невозможности такого приведения) для снижения сил, действующих на опоры, проводится балансировка роторов посредством либо снятия части металла конструкции со стороны «тяжелого» места, либо установки дополнительных грузов со стороны «легкого» места.

В производстве ТНА применяется два наиболее распространенных вида балансировки вращающихся деталей и узлов этого агрегата [4] – статистическая – для центробежных и осевых колес, импеллеров, дисков турбин, зубчатых колес и других составных частей ротора в качестве предварительной. И заключается она в использовании комплекса технологических операций по определению места и установки балансировочных грузов с целью уменьшения главного вектора дисбалансов не вращающегося ротора. У неуравновешенной детали ее масса располагается несимметрично относительно оси вращения. Поэтому при статическом положении такой детали, т. е. когда она находится в покое, центр тяжести будет стремиться занять нижнее положение (рисунок 1). Для уравновешивания детали добавляют с диаметрально противоположной стороны груз массой Т2 с таким расчетом, чтобы его

момент T2·r2 был равен моменту неуравновешенной массы TX. При этом условии деталь будет находиться в равновесии при любом положении, так как центр тяжести ее будет лежать на оси вращения. Равновесие может быть достигнуто также путем удаления части металла детали высверловкой, спиливанием или фрезерованием со стороны неуравновешенной массы TX.

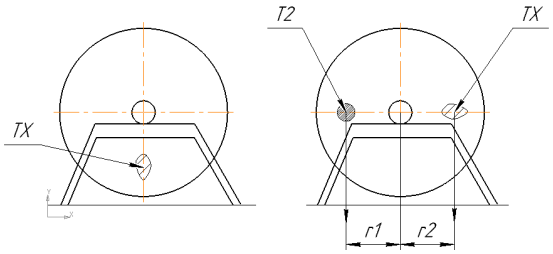


Рисунок 1 – Схема статической балансировки колеса турбины на ножах:
TX – масса неуравновешенной детали; T2 – масса уравновешивающего груза; r1 r2 – их расстояния от оси вращения) или неточной центровки валов

После статической проводится динамическая балансировка, которая основана на установлении взаимосвязи реакций в опорах вращающегося ротора с дисбалансом масс, и включает целый ряд операций, конечная цель которых заключается в определении положения и массы балансировочных грузов, в их установке (или удалении) на ротор с целью уменьшения дисбаланса до регламентируемого технической документацией (рисунок 2).

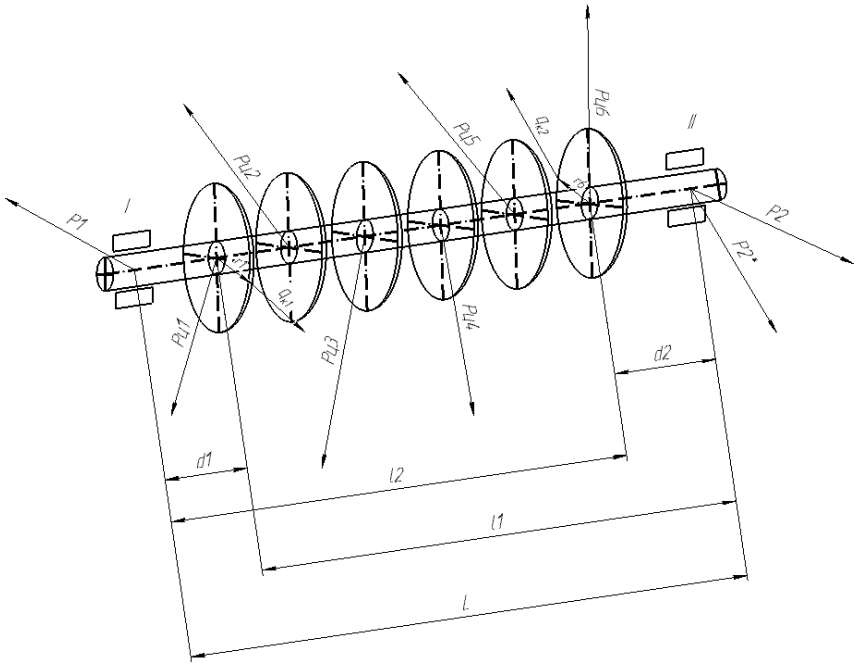


Рисунок 2 – Общий случай динамической неуравновешенности

Процесс приведения центра массы вращающегося узла (детали) к оси вращения во всех плоскостях, перпендикулярных ей, называется динамической балансировкой.

При идеальной динамической уравновешенности центры массы в любой из указанных плоскостей узла (детали) должны лежать на оси вращения. Такая ось вращения называется свободной осью. На нее не действуют силы инерции, и вибрация подшипников в этом случае будет отсутствовать. Таково теоретическое толкование динамической балансировки.

Так как практически невозможно определить местоположение плоскости неуравновешенности, то процесс динамической балансировки сводится к устранению или, вернее, к снижению до допустимого уровня инерционных сил, действующих на опоры ротора.

Балансировку всех роторов (рисунок 3), изготавливаемых для турбонасосных агрегатов ракетно–космической техники, проводят согласно общим требования к динамической балансировке:

1. Значения остаточных дисбалансов ротора определять прямым измерением (в некоторых случаях измерение значений остаточных дисбалансов методом обхода контрольным грузом).

Рисунок 3 – Динамическая балансировка пакета лопаточных деталей на оправке

2. При балансировке на зарезонансных станках со стробоскопом для каждого типоразмера роторов агрегатов подачи следует изготавливать тарировочный ротор, на который предприятием–изготовителем оформляется технологический паспорт.

3. Балансировочная оснастка и станок должны обеспечивать при балансировке ротора воспроизводимость показаний индикатора значений дисбаланса.

4. Способы базирования роторов в опорах балансировочного станка следует выбирать, руководствуясь следующим справочными данными, представленными в таблице 1 (большое число знаков «+» соответствует предпочтительному применению данного способа базирования, знак «–» – применять не рекомендуется).

Таблица 1 – Опоры для балансировки роторов

Объект балансировки	Цилиндр. вкладыши	Опоры скольжения	Роликовые опоры	Косовалковые опоры	Призмат. вкладыши
Роторы балансировочные	+	+++	++	++	++
Детали и сборочные единицы на оправке	–	++	+	–	–
Детали и сбор. единицы с собственными цапфами	+	+++	++	+	+

5. Балансировку роторов проводить на технологических подшипниках, точность изготовления которых должна быть не ниже пятого класса, а величина радиального зазора не должна превышать верхней границы 7 группы стандартных зазоров. Перед балансировкой ротора ввести в зазор между внутренним кольцом и сепаратором подшипника 0,2–0,5 г жидкой смазки и так же добавлять ее во время балансировки. Предохранять подшипники от попадания в них частиц абразива или металлической стружки при съеме материала. Проводить периодический контроль по внутреннему диаметру и радиальному зазору на соответствие технологической документации не реже 1 раза в 3 месяца. Внешний вид, плавность вращения (без заеданий – проверяется в вертикальном положении оси вращения) подшипника проверять перед каждой сборкой ротора на балансировку.

6. Балансировку консольных роторов на станках, не предназначенных для их балансировки, следует проводить в балансировочных рамках, которые должны обладать достаточной жесткостью и минимальной массой. Опорные поверхности рамок и посадочные

места под подшипники выполнять с полем допуска h6, H7, параметром шероховатости Ra от 0,8 до 0,4 мкм, допуском соосности относительно общей оси опорных поверхностей 0,015 мм в радиусном выражении.

7. Участок балансировки должен быть изолирован от оборудования, оказывающего постороннее влияние на показания индикатора дисбаланса балансировочного станка.

8. Ротор должен поступать на участок балансировки чистыми, без видимых невооруженным глазом следов загрязнений (масляных пятен, пыли, стружки и т.п.). После балансировки поверхности ротора в местах съема металла следует протереть салфеткой, смоченной в бензине, и просушить сжатым воздухом.

9. Рабочее место съема металла с поверхностей ротора должно быть отделено от участка балансировки и оборудовано вытяжной вентиляцией.

10. Относительная влажность воздуха в балансировочном помещении должна быть не выше 70%, температура воздуха не ниже 15 C и не выше 30 C.

Для решения на протяжении уже нескольких десятков лет разрабатываются и совершенствуются методы и балансировочное оборудование [6–8], которые, к сожалению, предусматривают снятие излишков металла в местах повышенной концентрации эксплуатационных экстремальных нагружений. Для повышения усталостной прочности таких участков нами был получен опыт местного упрочнения нарушенных балансировщиками поверхностей микрошариками с положительным результатом [9]. В нашем случае комбинированная обработка образцов до и после осаждения никеля толщиной 30...50 мкм, проводилась на установках эжекторного типа с наложением тока низкого напряжения (рисунок 4) при соблюдении следующих режимов:

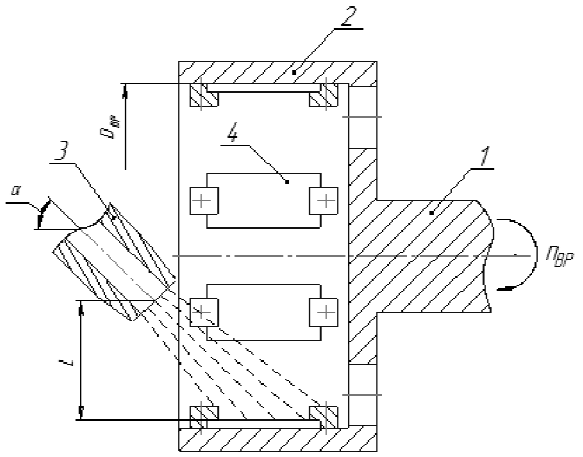


Рисунок 4 – Схема проведения эксперимента по струйной обработке образцов:
1 – шпиндель установки, 2 – экспериментальная оснастка, 3 – сопло, 4 – образец плоский

– расстояние от оси сопла между его срезом и поверхностью образца L = 50 ± 5 мм на диаметре вращения $D_в$=100 мм; время обработки каждого участка поверхности – 60 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью Δα=60°± 5°; диаметр сопла – 10 мм;

– частота вращения шпинделя установки $n_{вр}$=20–60 мин$^{-1}$; давление сжатого воздуха в струйном аппарате – 0,2–0,4 МПа; напряжение 2–10 В; расход газожидкостной слабопроводящей среды – 2 м^3/мин.

Газожидкостная слабопроводящая среда состояла из воздуха и распыленной до капельной фракции технической воды, являющейся слабым проводником. Эффект от воздействия токов низкого напряжения заключался в том, что если принять в качестве исходной информации высоту микронеровностей до обработки (R_{Z0}), а ограничительными условиями – время действия тока, то процесс съема неровностей за единичное соударение принимает вид (рисунок 5).

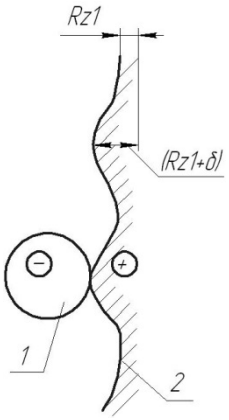


Рисунок 5 – Схема формирования микрогеометрии в полости канала:
1 – гранула–катод; 2 – анод–заготовка; R_{Z1} – глубина микрорастравливаний неупрочненного участка заготовки; $(R_{Z1}+\delta)$ – микропогрешность и микроуглубление

$$(R_{Z1}+\delta) = R_{Z0} - (\alpha/\gamma)\cdot\eta\cdot j_{cp}\tau_к,$$

где α – электрохимический эквивалент материала заготовки;

γ – удельная плотность материала заготовки;

j_{cp} – средняя плотность тока;

$\tau_к$ – длительность контакта ($\tau_к$=0,1–0,3 мкс);

η – коэффициент выхода по току.

Ток (J) в зоне контакта может достигать 10А, площадь контактного действия гранулы составляет 0,1–0,3 мм^2. Тогда средняя плотность тока

$$j_{cp} = 0{,}5J/F.$$

Экспериментальные исследования показали, что время обработки с целью получения требуемой шероховатости составляет доли минуты, что на порядок ниже по сравнению с параметром, показанным при виброударном осаживании микронеровностей.

Достижимое изменение шероховатости в этом случае $\Delta R_{z\,max}=R_{Z0}-(R_{Z1}+\delta)$ зависит от скорости анодного растворения, которая в момент удара резко увеличивается из–за повышения удельной проводимости в месте соударения в 2–3 раза. При этом создается сглаженный микрорельеф без концентраторов микротрещин и микровыступов, а микрошарики формируют стабильную шероховатость, определяемую их размерами и механическими свойствами с учетом сплошности перекрытия не менее 95% (для высокопрочных никелевых сплавов $R_{z\,cp}$ = 2,5–3,2 мкм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков, А.И. Методика уравновешивания сборного ротора с моментно–неуравновешенными функциональными элементами / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков, А.И. Поляков // Вестник машиностроения, 2005. – № 5. – С. 31–35.

2. Кобяков, Е.Т. Аналитические решения задач уравновешивания жестких роторов с моментно–неуравновешенными функциональными элементами / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков, М.Г. Подзолков // Известия вузов. Машиностроение. – 2002. – № 6. – С. 8 –18.

3. Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев. – Воронеж: ВГУ, 2003. – 287 с.

4. Проблемы прочности элементов конструкции ЖРД / Е.Б. Заметаев, Ю.М. Мисевич, Л.И. Поляков и др. // Науч.–техн. юб. сб. КБ химавтоматики. – Воронеж: ИПФ «Воронеж», 2001. – С. 528–531.

5. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А.С. Филимонов. – М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 381 с.

6. Уравновешивание роторов и механизмов: [Сб. статей] / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1978. – 320 с.

7. Некоторые задачи механики роторов технологических систем: Монография / Ю.С. Степанов, Е.Т. Кобяков, А.И. Поляков. – М.: Спектр, 2011. – 276 с.

8. Основы балансировочной техники. – Т. 2. Уравновешивание гибких роторов и балансировочное оборудование / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 679 с.

9. Сухочев, Г.А. Технологическое обеспечение качества лопаточных деталей с использованием наукоемких нетрадиционных методов обработки / Г.А. Сухочев, А.В. Капустин, Е.Г. Смольянникова, Д.М. Небольсин // Насосы. Турбины. Системы, – Воронеж: ООО ИПЦ «Научная книга». – 2011. – № 1. – С. 34–42.

Сухочев Геннадий Алексеевич
Воронежский ГТУ
Доктор технических наук, проф. кафедры ТМ
394026, Воронеж, Московский пр.,14
Тел. 89081417180
E–mail: suhotchev@mail.ru

Сокольников Василий Николаевич
Воронежский ГТУ
аспирант кафедры ТМ, инженер–технолог ВМЗ
394026 Воронеж, Московский пр.,14
Тел. 89525415527
E–mail: sokolnikovv@inbox.ru

Коденцев Сергей Николаевич
Воронежский ГТУ
Кандидат технических наук, доцент кафедры ТМ
394026, Воронеж,
Московский пр.,14
Тел. 89601002354
E–mail: vrtukaftm@yandex.ru

G.A. SUKHOCHEV, V.N. SOKOLNIKOV, S.N. KODENZEV

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF BALANCE HIGH–SPEED ROTORS

This article describes the technological aspects of static and dynamic balances have high–speed rotors turbopump unit, given the scheme and balancing equipment, showing ways to improve processes.

***Keywords**: rotor balancing, static balancing, dynamic balancing, balancing equipment, hardening microbeads.*

BIBLIOGRAPHY

1. Poljakov, A.I. Metodika uravnoveshivanija sbornogo rotora s momentno–neuravnoveshennymi funkcionalnymi jelementami / Ju.S. Stepanov, E.T. Kobjakov, A.I. Poljakov // Vestnik mashinostroenija, 2005. – № 5. – S. 31–35.

2. Kobjakov E.T. Analiticheskie reshenija zadach uravnoveshivanija zhestkih rotorov s momentnoneuravnoveshennymi funkcionalnymi jelementami / Ju.S. Stepanov, E.T. Kobjakov, M.G. Podzolkov // Izvestija vuzov. Mashinostroenie. – 2002. – № 6. – S. 8 –18.

3. Suhochev G.A. Upravlenie kachestvom izdelij, rabotajushhih v jekstremalnyh uslovijah pri nestacionarnyh vozdejstvijah / G.A. Suhochev. – Voronezh: VGU, 2003. – 287 s.

4. Problemy prochnosti jelementov konstrukcii ZhRD / E.B. Zametaev, Ju.M. Misevich, L.I. Poljakov i dr. // Nauchno–tehnicheskij jub. sbornik KB himavtomatiki. – Voronezh: IPF «Voronezh», 2001. – S. 528–531.

5. Tehnologija proizvodstva zhidkostnyh raketnyh dvigatelej. / V. A. Moiseev, V. A. Tarasov, V. A. Kolmykov, A.S. Filimonov. – M.: Izd–vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2008. – 381 s.

6. Uravnoveshivanie rotorov i mehanizmov: [Sb. statej] / Pod red. V.A. Shhepetilnikova. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 320 s.

7. Nekotorye zadachi mehaniki rotorov tehnologicheskih sistem: Monografija / Ju.S. Stepanov, E.T. Kobjakov, A.I. Poljakov. – M.: Spektr, 2011. – 276 s.

8. Osnovy balansirovochnoj tehniki. – T. 2. Uravnoveshivanie gibkih rotorov i balansirovochnoe oborudovanie / Pod red. V.A. Shhepetilnikova. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 679 s.

9. Suhochev, G.A. Tehnologicheskoe obespechenie kachestva lopatochnyh detalej s ispolzovaniem naukoemkih netradicionnyh metodov obrabotki / G.A. Suhochev, A.V. Kapustin, E.G. Smoljannikova, D.M. Nebolsin // Nasosy. Turbiny. Sistemy, – Voronezh: OOO IPC «Nauchnaja kniga». – 2011. – № 1. – S. 34–42.

Sukhochev Gennady Alekseevich
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of TM VGTU
394026 Voronezh, Moscow Avenue, 14, VGTU.
Tel. 89081417180
E–mail: suhotchev@mail.ru

Sokolnikov Vasiliy Nikolaevich
graduate student TM VGTU, engineer VMZ
394026 Voronezh, Moscow Avenue, 14, VGTU.
Tel. 89525415527
E–mail: sokolnikovv@inbox.ru

Kodenzev Sergey Nikolaevich
Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of TM VGTU
394026 Voronezh, Moscow Avenue, 14, VGTU.
Tel. 89081417180
E–mail: suhotchev@mail.ru

УДК 669.017:621.91

А.Г. МАТЮНИН, Е.Л. ТОРОПЦЕВА, А.Н. БОЛЬШАКОВ,
О.А. КОСИНОВА, Ю.В. ВАСИЛЕНКО

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

В данной работе проведено исследование структуры и свойств стружки сталей карбидного класса Р6М5 и стали Х перлитного класса, полученной после обработки на токарном станке в различных зонах резания.

Ключевые слова: *микроструктура, микротвердость, зона выхода резца, зона установившегося резания, упрочнение, карбидная фаза.*

Для резания металлов применяется несколько различных видов обработки. В основе каждого из них лежит работа режущего клина. Основные физические параметры процесса резания, определяющие закономерности этого явления, одни и те же для различных видов обработки, а именно: скорость резания и толщина срезаемого слоя.

Широкая номенклатура способов лезвийной обработки может быть разделена на две группы по характеру резания: 1) непрерывное и 2) прерывистое. К первой группе относятся различные виды точения непрерывной цилиндрической поверхности, ко второй относятся строгание, протягивание, фрезерование и др.

Стойкость инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, может быть в несколько раз ниже стойкости инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. Это различие обусловлено процессами, протекающими в зонах выхода резца и установившегося резания. Ряд исследователей отмечают наиболее пагубное влияние на режущий инструмент зоны выхода. На сегодняшний день процессы, протекающие в зоне выхода, мало изучены. При этом имеется большой потенциал для повышения стойкости инструмента, чем обусловлена необходимость дальнейшего изучения процесса резания в этой зоне.

Для проведения исследования были изготовлены образцы, представляющие из себя стружку быстрорежущей стали Р6М5 и стали Х, полученные при прерывистом ортогональном свободном резании и залитую в эпоксидную смолу. Сталь Р6М5 имеет в исходном состоянии структуру зернистого перлита, а сталь Х – пластинчатый перлит. Химический состав сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сталей% (по массе)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Ni	Co	W	V
Р6М5	0,82 –0,9	до 0,5	до 0,5	3,8– 4,4	4,8– 5,3	до 0,025	до 0,03	до 0,04	до 0,5	5,5– 6,5	1,7– 2,1
Х	1,45	0,33	0,28	1,78	0,11	до 0,025	0,2	0,25	–	–	0,08

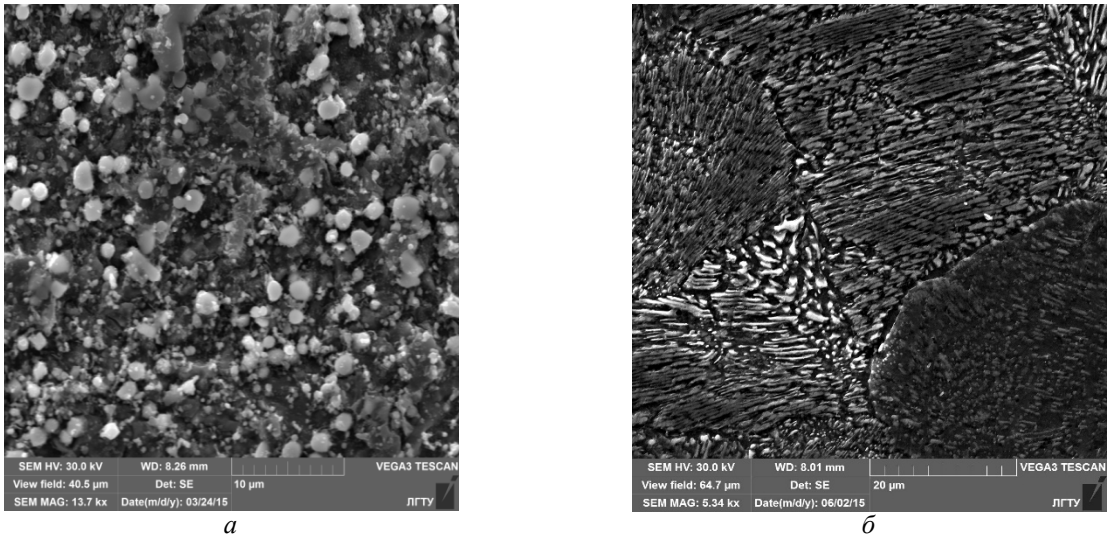
Резание исходного образца проводилось на токарно–винторезном станке 16К20. Заготовкой являлась деталь – тело вращения с максимальным диаметром 60 мм. Вдоль образующей располагался паз шириной 3 мм и глубиной 20 мм. Резец отрезной, шириной 4 мм, изготовлен из твердого сплава Т5К10. Образцы стружки были получены при различных скоростях резания и толщинах срезаемого слоя.

Исследованию подвергалась прирезцовая поверхность стружки, на участках, соответствующих установившемуся резанию и зоне выхода резца.

На ней была изучена структура на микроскопе Эпиквант при увеличении 100–1000, а также на растровом электронном микроскопе VEGA3 TESCAN. Для изучения карбидной фазы набирали по 500 карбидов на образец. Определение микротвердости производили на

приборе ПМТ–3 при нагрузке 0,98 Н по 20 измерениям на каждый образец. Далее проводилась статистическая обработка полученных результатов.

Согласно рисунку 1, а микроструктура стали Р6М5 представлена эвтектическими карбидами, карбидами вторичными и α – раствором и имеет твёрдость 2.8 ГПа. Микроструктура стали Х (рисунок 1, б) в исходном состоянии – пластинчатый перлит, который имеет твердость 2,1 ГПа [1].



а *б*

Рисунок 1. Исходные структуры обрабатываемых сталей:
Травление 3 %–м раствором HNO_3 на спирту в течении 30 секунд.
а) сталь Р6М5, 13700, б) сталь Х, 5340

На стали Р6М5 с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) была изучена карбидная фаза. Из общего количества образцов были отобраны три: исходный образец, стружка с минимальным и максимальным упрочнением. На каждом образце исследованию подвергалось 500 шт. карбидов (рисунок 2).

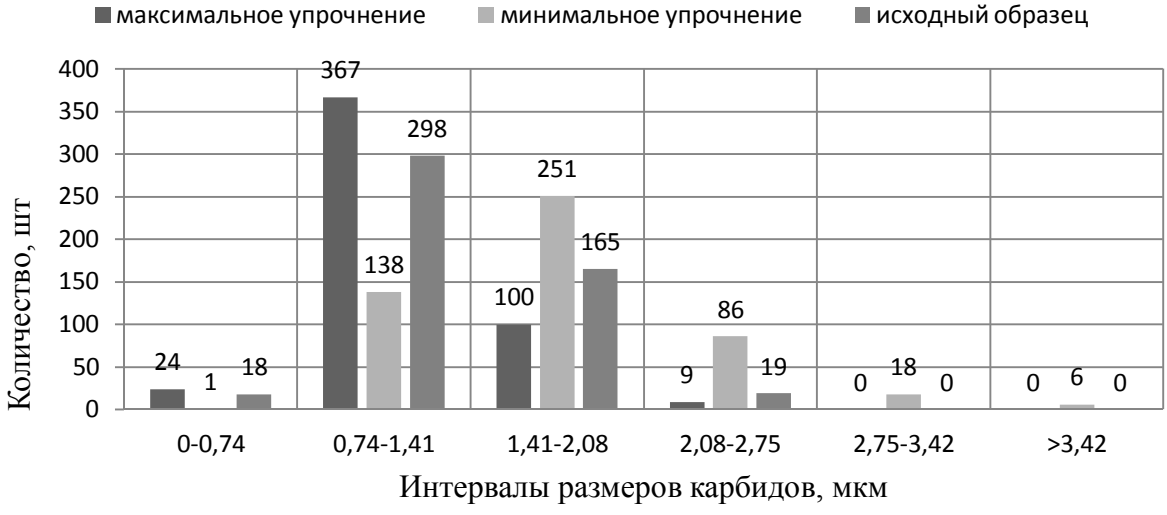


Рисунок 2 – Распределение карбидов по размерам в стали Р6М5

Полученные результаты говорят о том, что максимальному упрочнению соответствует структура с более мелкими (0,74–1,41мкм, 367 шт.) размерами карбидов. Сравнение с исходным образцом показывает увеличение количества карбидов в этой размерной группе с 298 до 367 шт. примерно на 23%. Это свидетельствует о том, что при резании происходит уменьшение размеров карбидной фазы вследствие её разрушения. На рисунке 3 хорошо видна трещина, разрушившая карбид на две части, и трещина у карбида.

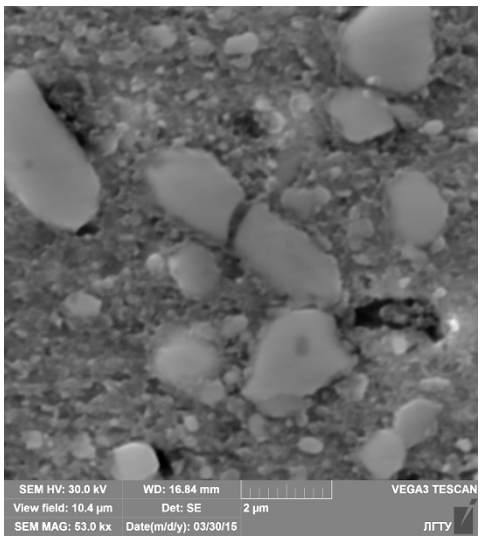
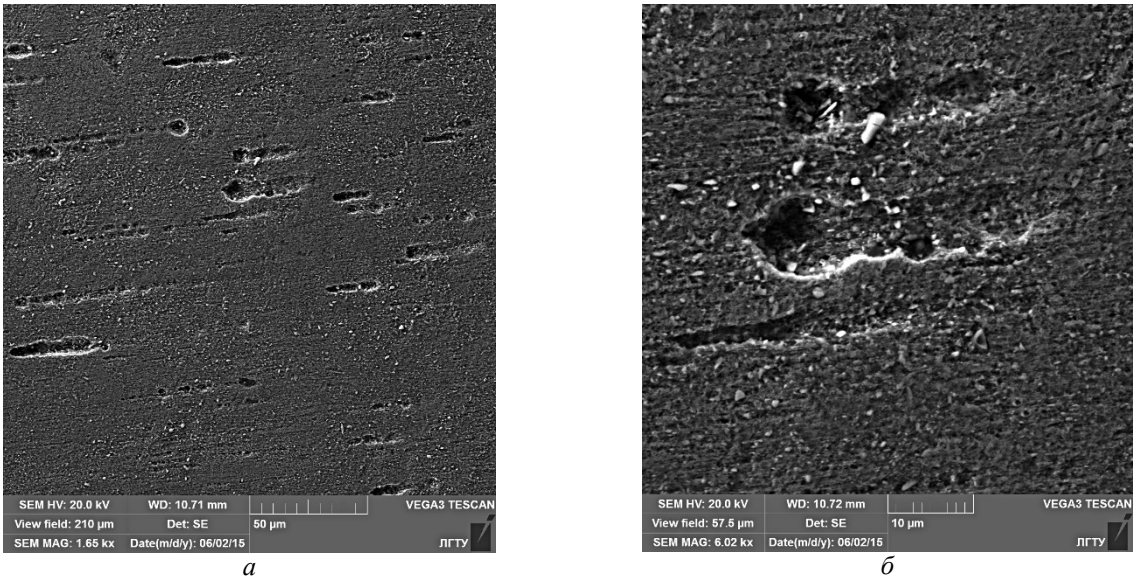


Рисунок 3 – Разрушение карбидов при резании стали Р6М5 и образование трещин по границам карбидов

На рисунке 4 видно, что структура перлита стали Х утратила первоначальный характер, карбиды не имеют пластинчатого вида, они измельчились. Полости, образованные в стружке стали Х, скорее всего, связаны с перемещением в этой зоне пор.



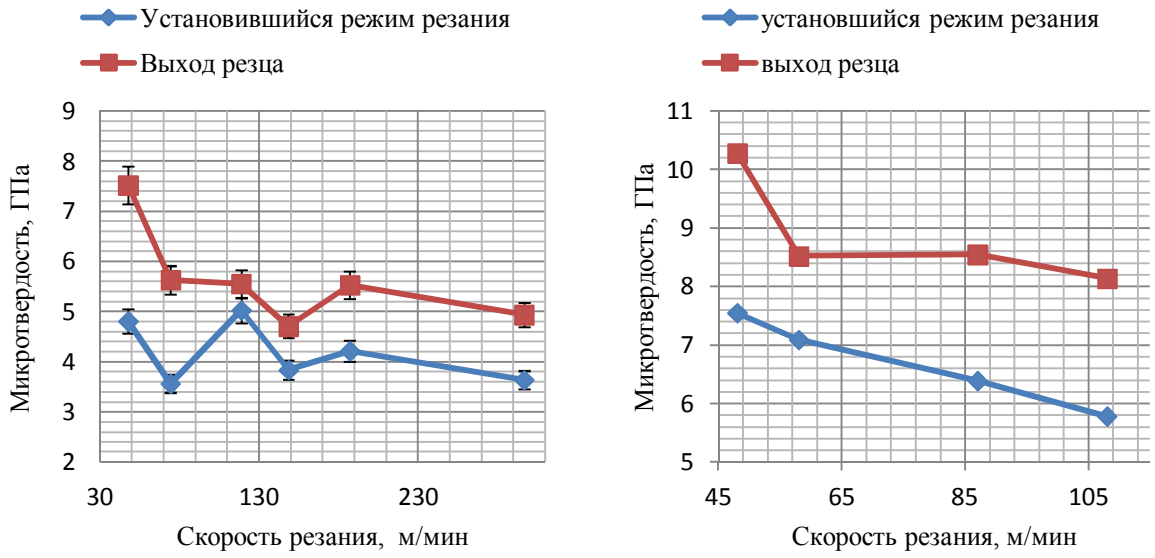
а *б*

Рисунок 4 – Образование пор в стали Х в зоне установившегося резания (а) и в зоне выхода резца (б)

На рисунках 5, 6 представлены графики зависимостей микротвёрдости от скорости резания и толщины срезаемого слоя на прирезцовой поверхности исследуемых участков стружки из сталей Р6М5 и Х, а также структура этих участков.

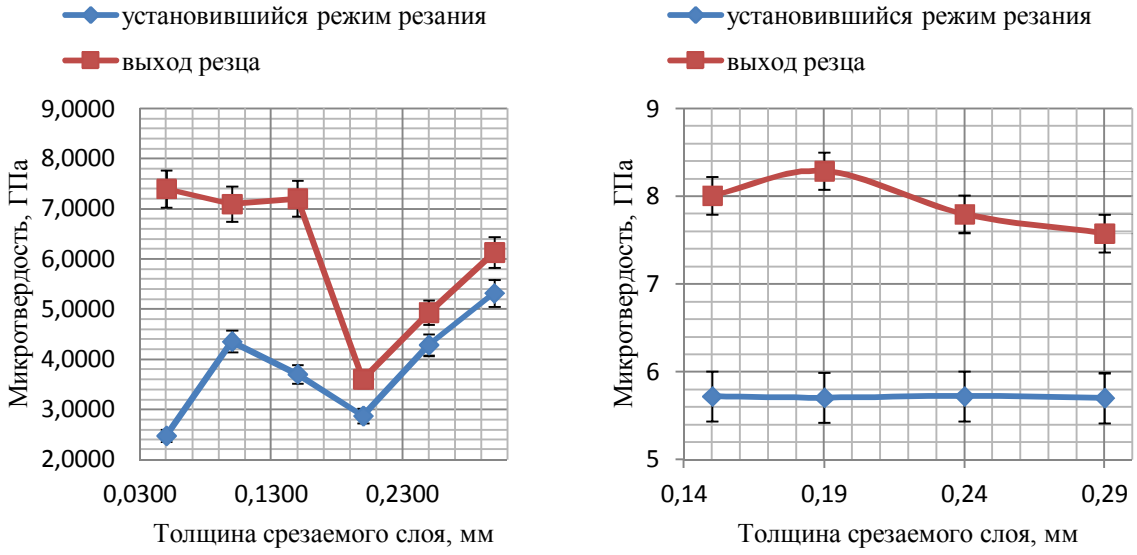
Определив относительную степень увеличения микротвердости, можно сказать о различии значений этого параметра в зонах установившегося резания и зонах выхода резца. Стружка, полученная в зоне выхода резца, имеет большую микротвердость, т.е. более наклепана и деформирована, чем стружка в зоне установившегося резания, в среднем на 66 % для стали Р6М5. Такое увеличение микротвердости при резании, а особенно в зоне выхода резца, может быть связано, по нашему мнению, с наклепом α–фазы и измельчением карбидной фазы, что было подтверждено нами при качественном и количественном изучении карбидной фазы в зоне выхода резца.

Для стали Х просматривается та же закономерность, что и для стали Р6М5. Стружка, полученная в зоне выхода резца имеет бóльшую микротвердость, т.е. более наклепана и деформирована, чем стружка в зоне установившегося резания, в среднем на 110 %.



а *б*

Рисунок 5 – Влияние скорости резания на микротвердость стали Х(а) и стали Р6М5(б)



а *б*

Рисунок 6 – Влияние толщины срезаемого слоя на микротвердость стали Х(а) и стали Р6М5(б)

Так как значение микротвердости связано со значением величины напряжения, действующего на резец, можно сказать, что на резец действует большее напряжение в зоне выхода из образца, чем в зоне установившегося резания. Таким образом, зона выхода резца является более опасной для материала резца.

Такая же зависимость, согласно нашим исследованиям, наблюдается и у сталей перлитного с феррито–перлитной структурой и аустенитного классов [2]. В стали 20 в зоне выхода резца, по сравнению с зоной установившегося резания, увеличение микротвердости составило 85%, в то время как у стали карбидного класса (Р6М5) эта же величина соответствует 66%, а у стали аустенитного класса 12Х18Н10 увеличение микротвердости равно 53%.

Сравнение этих классов сталей по степени увеличения микротвердости относительно исходных образцов, показывает, что у сталей перлитного класса это отношение соответствует 167 % в зоне установившегося резания и 319 % в зоне выхода резца, а у сталей карбидного класса 140 % и 217 % соответственно. Таким образом, можно сказать, что упрочнение стали перлитного класса с феррито–перлитной структурой в процессе резания относительно исходного образца примерно в 1,5 раза больше упрочнения стали карбидного класса.

Таблица 2 – Относительная степень увеличения микротвердости сталей различных классов в процессе резания различными режимами, относительно исходного образца

Класс стали	Сталь	Изменяемый параметр резания	Зона установившегося резания, %	Зона выхода резца, %	Относительная степень увеличения микротвердости, %
Перлитный	У8	Толщина срезаемого слоя	69	107	57
		Скорость резания	58	92	
	Сталь 20	Толщина срезаемого слоя	167	319	85
		Скорость резания	159	284	
	Х	Толщина срезаемого слоя	83	189	110
		Скорость резания	90	173	
Карбидный	Р6М5	Толщина срезаемого слоя	104	183	66
		Скорость резания	140	217	
Аустенитный	12Х18Н10	Толщина срезаемого слоя	48	61	53
		Скорость резания	34	61	

Из представленных классов сталей, в ходе обработки резанием наиболее сильно упрочняются стали перлитного класса.

Полученные сведения показывают, что структура обрабатываемой стали имеет весомое значение для выбора режима резания и является основой для изучения процессов, происходящих при резании.

Данное исследование может послужить дополнениями к разработке теории возрастания напряжений при выходе режущего клина из зоны обработки. Установленная связь величины напряжения со скоростью резания и толщиной срезаемого слоя позволит определить наилучшие значения данных параметров и минимизировать негативное влияние напряжения на режущий инструмент [3]. Тем самым увеличить его долговечность, качество работы и снизить экономические затраты.

Проведенное исследование микроструктуры и микротвердости стружки из сталей Р6М5 и Х, и анализ различных зон обработки позволяют сделать следующие выводы:

1. Различия в микроструктуре стали Р6М5 в разных зонах резания связаны с размерами карбидной фазы: в зоне выхода резца карбиды мельче.

2. Микротвердость стали Р6М5 и стали Х в зоне выхода резца выше, чем в зоне установившегося резания не зависимо от параметров – скорости резания и толщины срезаемого слоя.

3. Перлитный класс сталей при обработке резанием упрочняется относительно исходного состояния сильнее карбидного в 1,5 раза, и 2 раза сильнее аустенитного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 5950–2000 Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 40 с.

2. Волкова, А.Н. Взаимосвязь между изменением условий прерывистого резания, структурой и микротвёрдостью срезаемых слоёв / А.Н. Волкова, Е.Л. Торопцева, С.К. Амбросимов, А.Н. Большаков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3. – С. 61 – 65.

3. Андреев, Г.С., Повышение производительности обработки деталей в условиях периодического прерывистого резания / Г.С. Андреев // Вестник машиностроения. – 1978. – № 12. – С. 48 – 52.

4. Воронков, А.В. Экспериментальные исследования шероховатости при плоском шлифовании с поперечной осцилляцией заготовки / А.В. Воронков, А.А. Симаков, О.А. Василенко, Ю.В. Василенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3–2(293). – С. 104–109.

5. Симаков, А.А. Анализ форм колебаний возмущающей силы при плоском виброшлифовании / А.А. Симаков, Ю.В. Василенко, М.А. Бурнашов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 3–2(299). – С. 76–81.

Матюнин Андрей Геннадьевич
Липецкий государственный технический университет, г. Липецк
Аспирант, техник кафедры физического металловедения
Тел. 9–904–686–01–46
E–mail: faitmarik@bk.ru

Торопцева Елена Львовна
Липецкий государственный технический университет, г. Липецк
Кандидат технических наук, доцент кафедры физического металловедения
Тел. 8–910–350–59–09
E–mail: e.toroptseva@gmail.com

Большаков Алексей Николаевич
Кандидат технических наук
Тел. 8–951–305–36–62
E–mail: atbasarets@mail.ru

Косинова Ольга Анатольевна
Липецкий государственный технический университет, г. Липецк
Старший преподаватель кафедры физического металловедения
Тел. 8–904–689–71–26
E–mail: kosinova64@yandex.ru

Василенко Юрий Валерьевич
Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
директор Технологического института им. Н.Н. Поликарпова
Тел. 8-920-285-60-42
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

A.G. MATYUNIN, Ye.L. TOROPTSEVA, A.N. BOLSHAKOV,
O.A. KOSINOVA, Yu.V. VASILENKO

EFFECTS OF CUTTING CONDITIONS PARAMETERS TO CHANGE THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TOOL STEELS DEFORMATION ZONE

In this work we have investigated the structure and properties of carbide chips steels R6M5 and class X steel pearlitic class, processed on a lathe in various areas of cutting

***Keywords**: microstructure, microhardness, the exit area of the cutter, the area of the steady–state cutting, hardening, carbide phase.*

BIBLIOGRAPHY

1. GOST 5950–2000 Prutki, polosy i motki iz instrumentalnoy legirovannoy stali. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2001. – 40 s.

2. Volkova, A.N. Vzaimosvyaz mezhdu izmeneniyem usloviy preryvistogo rezaniya, strukturov i mikrotvordostyu srezayemykh sloyov / A.N. Volkova, Ye.L. Toroptseva, S.K. Ambrosimov, A.N. Bolshakov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 3. – S. 61 – 65.

3. Andreyev, G.S., Povysheniye proizvoditelnosti obrabotki detaley v usloviyakh periodicheskogo preryvistogo rezaniya / G.S. Andreyev // Vestnik mashinostroyeniya. – 1978. – № 12. – S. 48 – 52.

4. Voronkov, A.V. Eksperimentalnyye issledovaniya sherokhovatosti pri ploskom shlifovanii s poperechnoy ostsillyatsiyey zagotovki / A.V. Voronkov, A.A. Simakov, O.A. Vasilenko, YU.V. Vasilenko // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2012. – № 3–2(293). – S. 104–109.

5. Simakov, A.A. Analiz form kolebaniy vozmushchayushchey silv pri ploskom vibroshlifovanii / A.A. Simakov, YU.V. Vasilenko, M.A. Burnashov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 3–2(299). – S. 76–81.

Matyunin Andrey Gennadyevich
Lipetsk State Technical University, Lipetsk
Graduate, Technician of the department of physical metallurgy
Tel. 9-904-686-01-46
E-mail: faitmarik@bk.ru

Toroptseva Yelena Lvovna
Lipetsk State Technical University, Lipetsk
PhD, assistant professor of physical metallurgy
Tel. 8-910-350-59-09
E-mail: e.toroptseva@gmail.com

Bolshakov Aleksey Nikolayevich
PhD
Tel. 8-951-305-36-62
E-mail: atbasarets@mail.ru

Kosinova Olga Anatolyevna
Lipetsk State Technical University, Lipetsk
Senior lecturer of the department of physical metallurgy
Tel. 8-904-689-71-26
E-mail: kosinova64@yandex.ru

Vasilenko Yuriy Valervevich
Orel State University named after I.S. Turgenev
Director of the Institute of Technology them. NN Polikarpov
Tel. 8-920-285-60-42
E-mail: vyuv-post@yandex.ru

УДК 621.9–05

Д.М. ЗАБЕЛЬЯН, В.А. ПУХАЛЬСКИЙ

НОВЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ НОРМАТИВОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

В статье рассмотрены проблемы разработки и использования нормативов режимов резания. Основные закономерности и критерии, лежащие в основе существующих нормативов, требуют существенного совершенствования. Предложено осуществлять разработку нормативной базы на основе представлений об областях возможного использования продукции. Рекомендуемые режимы резания гарантируют получение максимальной величины целевого параметра для выбранной производительности обработки резанием. Эту нормативную базу вместе с линиями рационального использования продукции предлагается представлять как паспорт конкретного режущего инструмента. Сопровождение данным документом обяжет разработчиков гарантировать эксплуатационные характеристики режущего инструмента, что существенно упростит и рационализирует его использование потребителем.

Ключевые слова. *Нормативы, режимы резания, максимум целевого параметра, техническое совершенство.*

Нормативы режимов резания имеют чрезвычайно важное значение при разработке технологических процессов механической обработки.

Анализ современного состояния этой нормативной базы показал её серьёзные недостатки как с точки зрения точности, получаемых с их помощью результатов, так и самой их методологической основы [1,2].

Фактически современные нормативы режимов резания построены на основе критерия стойкости режущего инструмента, то есть времени его работы до предельно допустимого износа. Однако, во–первых в производственной практике используют большое количество других признаков выхода из строя режущего инструмента. Во вторых эти признаки определяют лишь момент остановки процесса, но не являются критериями его эффективности, позволяющими осуществить выбор того или иного варианта этого процесса.

Многообразие вариантов признаков, по которым прерывается процесс резания для внесения в него соответствующих корректив, в существующих нормативах не учтено. Они фактически разработаны для чернового инструмента, работающего до предельно допустимого износа. В основном в нормативах речь идёт о таком параметре, как ширина фаски износа по задней поверхности инструмента [4]. При этом экспериментальная – доказательная база о предельно допустимом износе чрезвычайно скудна и не может являться достаточным основанием для надежного прогнозирования работы инструмента. В последнее же время работы, связанные с установлением норм по предельно допустимому состоянию режущего инструмента, в связи с их большой трудоёмкостью и затратностью не проводятся вообще. Поэтому совершенно очевидно, что в настоящее время при определении длительности работы инструмента, надёжной альтернативы его работе до поломки, нет.

Анализируя в работе [3] показатели, которые предлагаются различными авторами для оценки эффективности продукции, мы пришли к выводу, что ни один из рассмотренных критериев, не может быть принят как интегральный для оценки качества режущего инструмента. При этом такой показатель должен быть комплексным, а параметры, используемые для его создания необходимо разделять на целевые и затратные. Кроме того, для режущего инструмента целевыми параметрами являются:

– для чернового инструмента объём снятого припуска;

– для чистового инструмента площадь обработанной поверхности.

Время же его работы является параметром затратным. Следовательно, понятие стойкости, в том виде как оно используется в существующих нормативах режимов резания, целевым параметром быть не может.

В работе [5] для определения рациональности использования продукции предложен метод оценки эффективности по областям ее возможного использования (ОВИ). Суть

данного метода уже изложена в работе [6], где речь идёт о необходимости определения на данном этапе существования продукции её технического уровня.

Технический уровень продукции – это относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей.

Техническое совершенство некоторой продукции определяется, прежде всего, ее потребительскими свойствами. Т.е. оценка технического совершенства должна осуществляться по показателям, являющимся определяющими с точки зрения эффективности продукции на стадии ее эксплуатации. Такого рода показатель можно получить путем сопоставления с его помощью величины получаемого целевого параметра с теми затратами, которые обеспечили получение данной величины целевого параметра на стадии эксплуатации продукции.

Затратными являются все остальные параметры, характеризующие как вход, так и выход процесса, в котором участвует продукция с целью удовлетворения потребности.

В соответствии с вышеизложенным дадим определение понятию показателя технического совершенства продукции.

Показатель технического совершенства продукции – это показатель, определяемый совокупностью свойств, проявляющихся на стадии эксплуатации, и обуславливающих эффективность продукции в соответствии с ее назначением.

Тогда технический уровень продукции можно определять как частное от деления соответствующих показателей технического совершенства.

Оценку же технического уровня следует производить на основании исходных данных, получаемых по строго определенным методикам в эталонных условиях, то есть в лаборатории.

В качестве параметров для оценки технического совершенства режущего инструмента используем:

T – время работы режущего инструмента до и между отказами;

Q – целевой параметр (например снимаемый объём припуска), за время T;

q – расход режущего инструмента за время T;

A – работа, совершенная с использованием данного режущего инструмента за время T.

Принятый набор параметров оценки не случаен. Он выбран таким образом, чтобы в нем были отражены все формы существования материального объекта: пространство, время и движение.

Значение показателя технического совершенства предлагается определять по областям возможного использования режущего инструмента.

Границы областей возможного использования определяются в координатах, показанных на рисунке 1. Необходимо отметить характерные для представленных квадрантов особенности.

$(\frac{Q}{T}=const)$. Серия экспериментов считается законченной лишь тогда, когда получено максимально возможное значение целевого параметра Q и дальнейшее варьирование входными параметрами эксплуатации не приводит к его увеличению. Это значение параметра Q и соответствующее ему значение T являются координатами экспериментальной точки, расположенной на границе области возможного использования режущего инструмента в первом квадранте.

Определение координат точек, расположенных на линии рационального использования продукции в первом квадранте, осуществляется следующим образом. Сначала значение T, полученное на данном луче производительности, для экспериментальной точки, расположенной на границе области возможного использования, уменьшается на величину, гарантирующую не наступление предельного состояния, то есть поломки режущего инструмента. Затем, исходя из величины производительности на данном луче, для уменьшенного значения T вычисляется значение Q. Линии границ возможного

использования определяются путём аппроксимации мод распределений значений, получаемых при повторной работе в условиях заключительных опытов каждой серии.

Количество серий экспериментов (количество лучей и конкретных значений производительностей) выбирается исходя из необходимого для построения (аппроксимации экспериментальных точек уравнением кривой) линии рационального использования режущего инструмента в первом квадранте. После определения уравнения, описывающего линию рационального использования режущего инструмента в первом квадранте, производится соответствующая корректировка значений Q и T для граничных точек.

В четвертом квадранте построение линии рационального использования режущего инструмента осуществляется аналогичным образом. Разница заключается в том, что в данном квадранте в отличие от первого рассматриваются лучи постоянных мощностей. Причем максимальное значение работы – A, совершенной за соответствующее время наработки продукции до отказа – T, получено при тех же условиях эксплуатации (V,S,t и т.д.), при которых за это время получено максимальное Q в первом квадранте.

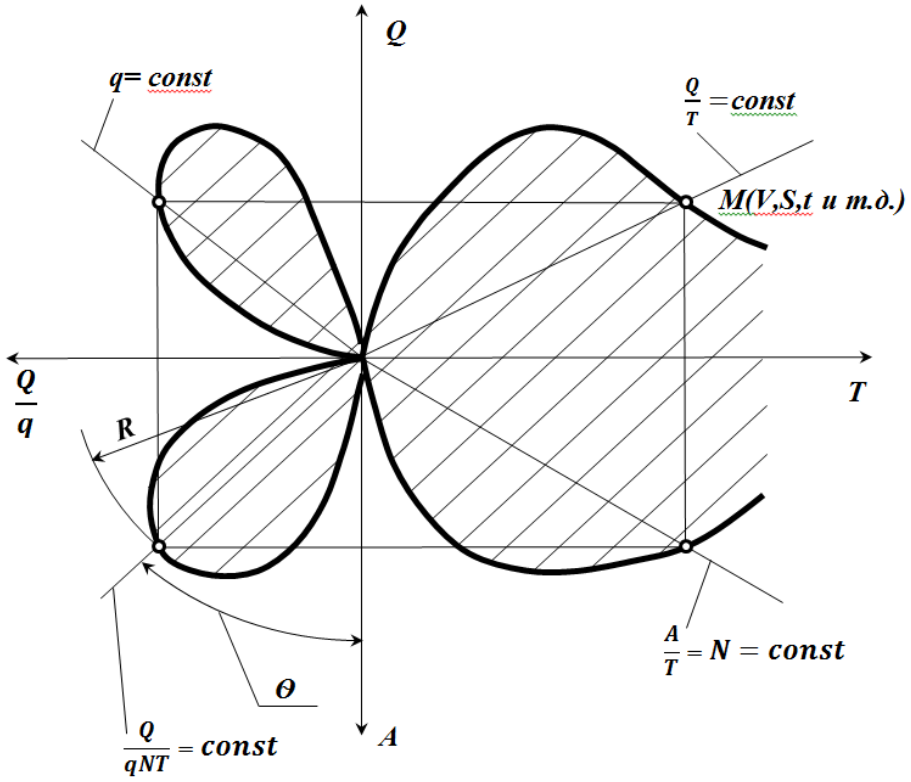


Рисунок 1 – Области возможного использования режущего инструмента:
V, S, t и т.д. – параметры условий эксплуатации режущего инструмента, при которых получена точка М, расположенная на границе области возможного использования

Лучи, проведенные из начала координат в первом квадранте, являются линиями постоянных производительностей в единицу времени, т.е. $\frac{Q}{T} = const$.

Во втором квадранте лучи, проведенные из начала координат, являются линиями постоянных расходов режущего инструмента, т.е. $q = const$. В четвертом – линиями постоянной мощности, т.е. $\frac{A}{T} = N = const$. В третьем квадранте – линиями постоянной эффективности режущего инструмента, т.е. $\frac{Q}{qNT} = const$.

Определение границ областей возможного использования режущего инструмента осуществляется по результатам его испытаний в лабораторных условиях.

Критерием завершения испытания в отдельном опыте является поломка инструмента.

Планирование экспериментов осуществляется таким образом, чтобы каждая их серия осуществлялась на отдельном луче производительности (см. рис.1, первый квадрант). Для каждого проведенного опыта фиксируются данные о том, при каких значениях параметров условий эксплуатации режущего инструмента: V – скорость, S – подача, t – глубина резания и т.д., какие значения выходных параметров (T,Q,A,q и т.д.) получаются. Варьирование параметрами эксплуатации осуществляется в широком диапазоне при всевозможных сочетаниях их значений, но при условии, что производительность остается постоянной

Во втором квадранте построение линии рационального использования режущего инструмента осуществляется по следующим правилам. Для тех же условий эксплуатации (V,S,t и т.д.), которые определены для точек линии рационального использования в первом квадранте, берутся те же значения Q. Значение выходного параметра q, полученное при определении границ возможного использования, с доведением режущего инструмента до поломки, должно быть скорректировано. Коррекция осуществляется в сторону уменьшения расхода продукции за время – T, исходя из того, что период наработки на отказ для точки, лежащей на линии рационального использования меньше, чем для точки, лежащей на границе области возможного использования. Это априори гарантирует эксплуатацию режущего инструмента с отказами, приводящими лишь к нарушению его работоспособного состояния, позволяющего его ремонт и восстановление.

В третьем квадранте построение линии рационального использования осуществляется путем проецирования соответствующих точек из второго и четвертого квадрантов. Показатель технического совершенства режущего инструмента определяется по следующей формуле:

$$\Im_{TC} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \theta R(\theta) d\theta,$$

где:

$$R = \sqrt{\left(\frac{Q}{q}\right)^2 + A^2}; \qquad tg\theta = \frac{Q}{qNT}.$$

Соответственно, показатель технического совершенства режущего инструмента будет тем лучше, чем будет больше его величина.

Далее следует отметить, что отдельные участки получаемых границ областей рационального использования, имеют как различные величины их доверительных интервалов, так и различные законы распределений получаемых значений. Данное положение представлено применительно к I–ому квадранту (рисунок 2).

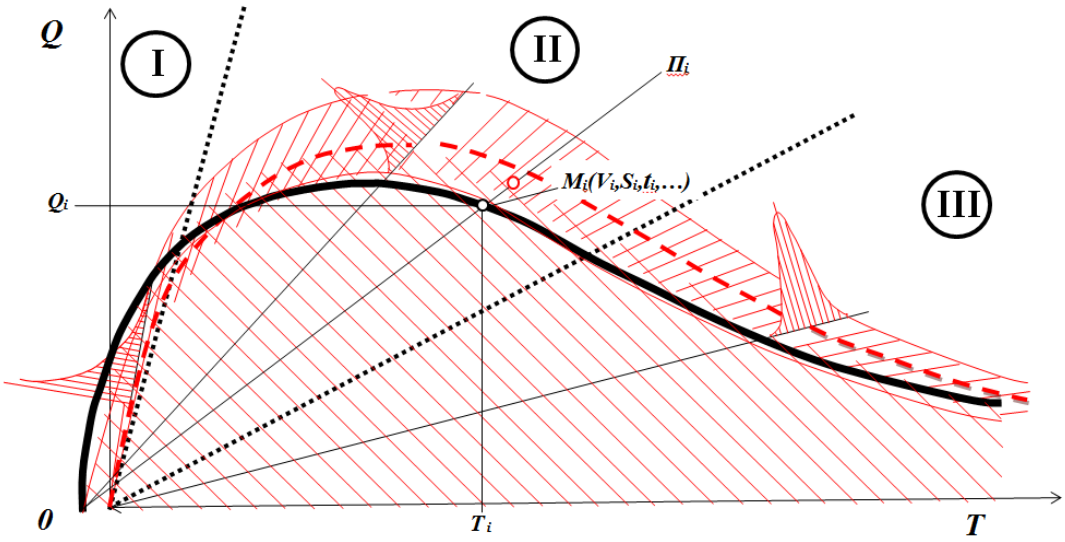


Рисунок 2 – Область возможного использования режущего инструмента с учетом вероятностного характера её границы:
$V_i,S_i,t_i,\ldots$ – *параметры режимов и условий резания, соответствующие точке* ***M_i;***
I, II, III – *зоны высокой, средней и низкой производительности соответственно*

Как видим, имеются три такие зоны.

I – ая зона имеет наибольший разброс получаемых результатов (Q,T) и частость появления конкретных случаев подчиняется экспоненциальному закону распределения.

II – ая зона имеет несколько меньший разброс получаемых результатов (Q,T) и частость появления конкретных случаев подчиняется закону распределения Вейбула.

III – я зона имеет наименьший разброс получаемых результатов (Q,T) и частость появления конкретных случаев подчиняется нормальному закону распределения.

Каждая точка на линии рационального использования (на рисунке 2 показана такая точка M_i) соответствует определенной производительности резания (луч $П_i$) и условиям эксплуатации инструмента (V_i,S_i,t_i,...), при которых эта точка получена. Граничные точки соответствуют максимальным величинам результирующих параметров, получаемых на заданном луче производительности.

Для того, чтобы у потребителя появилась возможность прогнозирования работы режущим инструментом с наивысшей эффективностью при различной производительности резания, строится специальная номограмма. Пример такой номограммы показан на рисунке 3.

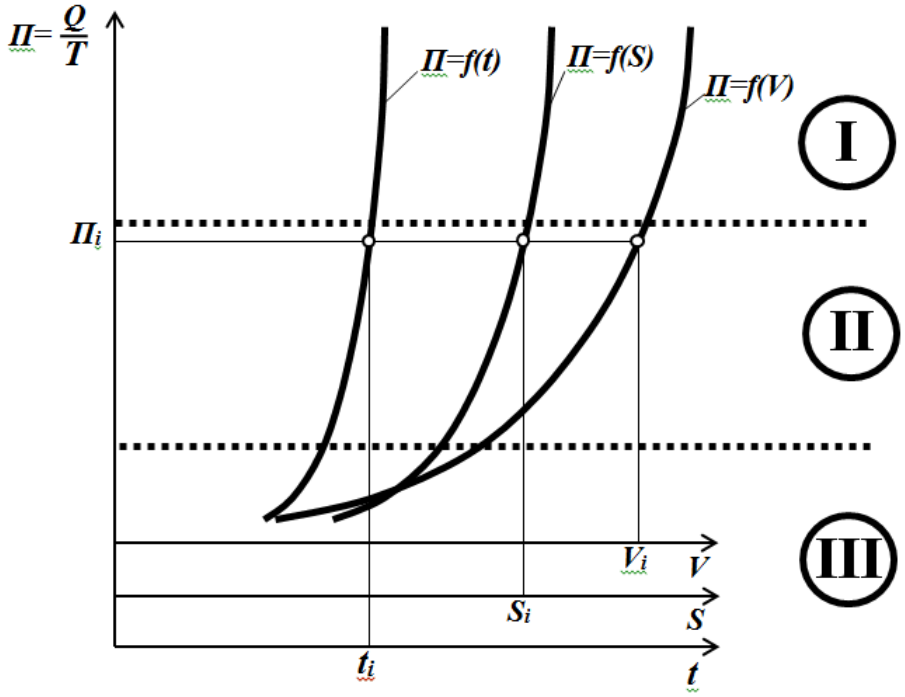


Рисунок 3 – Номограмма

Согласно номограмме, для получения значений результирующих параметров Q_i и T_i, соответствующих точке M_i, расположенной на линии рационального использования, для производительности $П_i$ задаются конкретные значения параметров условий эксплуатации инструмента. Эти номограммы по сути выполняют роль нормативов режимов резания, так как позволяют выбрать конкретные значения скорости резания (V), подачи (S) и глубины резания (t) для условия получения максимального объёма снятого припуска (Q) при требуемой производительности обработки ($П$).

Опыт определения областей возможного использования (ОВИ) продукции показал, что его применение требует существенных материальных затрат. Однако эти затраты единовременны и, следовательно, при дальнейшем применении данной продукции на производстве, могут потребоваться лишь выборочные испытания в конкретных точках. Номограммы же, с полученными линиями рационального использования, а также номограммы используемые как нормативы режимов резания, которые необходимо применять как паспортные данные на режущий инструмент, будут пригодными для использования на протяжении всего времени применения данной продукции. Это позволит потребителю использовать режущий инструмент с наибольшим эффектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синельщиков, А.К. Разработка основ создания общемашиностроительных нормативов, необходимых для расчёта режимов резания металлов лезвийным инструментом. Этап 2. Анализ существующих нормативов для расчёта режимов резания металлов. Тема 21–76 / А.К. Синельщиков, А.Д. Агеев, В.М. Башков, С.Ф. Гусев, А.И. Сосон. – М.: ВНИИ, 1976. – 253 с.

2. Забельян, Д.М. Анализ современных нормативов режимов резания / Д.М. Забельян // СТИН. – 2015. – № 11. – С. 31–33.

3. Пухальский, В.А. Анализ подходов к оценке качества режущего инструмента. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты Том VI. Коллективная монография / В.А. Пухальский, Д.М. Забельян. Под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр». – 2015. – С. 208–267

4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Справочник: В 2 т. /А.Д. Локтев, И.Ф. Гущин, Б.Н. Балашов и др. – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1 – 640 с., Т. 2 – 304 с.

5. Пухальский, В.А. Система менеджмента качества и обеспечение качества продукции. Стандарты и качество / В.А. Пухальский. – 2005. – № 4. – С. 62–67

6. Пухальский, В.А. Оценка эффективности продукции на заключительном этапе ее разработки. Методы оценки соответствия / В.А. Пухальский, П.В. Пухальский. – 2007. – № 12. – С.18–20.

Забельян Дмитрий Михайлович
Заместитель главного инженера–Главный технолог
Акционерное общество «Научно–производственный центр газотурбиностроения «САЛЮТ»

Пухальский Владимир Альфредович
Кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и стандартизации
Московский технологический институт

D.M. ZABELYAN, V.A. PUKHALSKIY

A NEW APPROACH TO CREATING REGULATIONS CUTTING

The article deals with the problems of development and use regulations of the cutting conditions. Basic laws and the criteria underlying the existing regulations require substantial improvement. Invited to develop a regulatory framework based on views on areas of possible use of products. Recommended cutting data guarantee the maximum value of the target setting for the selected machining performance. This regulatory framework along the lines of rational use of the products are invited to submit as a passport a concrete cutting tool. Accompaniment of this document would oblige developers to guarantee the operational characteristics of the cutting tool that greatly simplifies and streamlines its use by the consumer.

Keywords: *Regulations, cutting data, the maximum target setting, technical excellence.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sinelshchikov, A.K. Razrabotka osnov sozdaniya obshchemashinostroitelnykh normativov, neobkhodimykh dlya raschota rezhimov rezaniya metallov lezviynym instrumentom. Etap 2. Analiz sushchestvuyushchikh normativov dlya raschota rezhimov rezaniya metallov. Tema 21–76 / A.K. Sinelshchikov, A.D. Ageyev, V.M. Bashkov, S.F. Gusev, A.I. Soson. – M.: VNII, 1976. – 253 s.

2. Zabelyan, D.M. Analiz sovremennykh normativov rezhimov rezaniya / D.M. Zabelyan // STIN. – 2015. – № 11. – S. 31–33.

3. Pukhalskiy, V.A. Analiz podkhodov k otsenke kachestva rezhushchego instrumenta. Progressivnyye mashinostroitelnyye tekhnologii, oborudovaniye i instrumenty Tom VI. Kollektivnaya monografiya / V.A. Pukhalskiy, D.M. Zabelyan. Pod red. A.V. Kiricheka. – M.: Izdatelskiy dom «Spektr». – 2015. – S. 208–267

4. Obshchemashinostroitelnyye normativy rezhimov rezaniya. Spravochnik: V 2 t. /A.D. Loktev, I.F. Gushchin, B.N. Balashov i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 1991. – T. 1 – 640 s., T. 2 – 304 s.

5. Pukhalskiy, V.A. Sistema menedzhmenta kachestva i obespecheniye kachestva produktsii. Standarty i kachestvo / V.A. Pukhalskiy. – 2005. – № 4. – S. 62–67

6. Pukhalskiy, V.A. Otsenka effektivnosti produktsii na zaklyuchitelnom etape yeye razrabotki. Metody otsenki sootvetstviya / V.A. Pukhalskiy, P.V. Pukhalskiy. – 2007. – № 12. – S.18–20.

Zabelyan Dmitriy Mikhaylovich
Deputy Technical Director–Chief Technjljgist
Joint–stock company «Gas–Turbine Engineering Ressearch and Production Center «SALUT»

Pukhalskiy Vladimir Alfredovich
Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of metrology and standardization of Moscow technological Institute

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.01

Р.Я. ЛАБКОВСКАЯ, А.С. КОЗЛОВ, В.Л. ТКАЛИЧ, О.И. ПИРОЖНИКОВА

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассмотрены вопросы анализа динамических погрешностей мембранных электромеханических элементов систем управления при комплексном воздействии динамических нагрузок. Предложенная методика расчета элементов данного типа была внедрена при разработке запатентованной авторами работы серии магнитоуправляемых контактов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Данная серия предназначена для использования в системах охранной и пожарной сигнализаций.

Ключевые слова: *динамическая погрешность, комплексные воздействия, электромеханический элемент, патент, магнитоуправляемый контакт.*

При комплексном воздействии динамических нагрузок для установления взаимосвязи всех воздействий необходимо использовать унифицированный параметр. В качестве такого параметра можно выбрать линейную и угловую деформации мембранных электромеханических элементов (МЭЭ), в качестве которых могут выступать мембранные герконы и многофункциональные коммутирующие устройства. В работе [1] такой прием использован для анализа динамических погрешностей МЭЭ, также эту деформацию можно назвать ходом МЭЭ.

Достоинством МЭЭ являются высокая чувствительность и возможность коммутации больших токов (более 10 А), что обеспечивает повышенную мощность коммутации устройств систем управления. ММЭ могут быть использованы в системах автоматического управления радиоаппаратурой и пожарной безопасности. В случае аэро–, гидро–, механо– и термодинамического комплексного воздействия на МЭЭ необходимо рассчитывать результирующий динамический ход МЭЭ как сумму соответствующих аэро, гидро–, механо– и термодинамических ходов МЭЭ. Т.е. для линейной деформации получаем уравнение:

$$U_{дин} = U_{а.-г.} + U_{мех} + U_{терм},$$

где $U_{дин}$ – динамический ход от комплексного воздействия динамических нагрузок;

$U_{а.-г.}$ – аэро–, гидродинамический;

$U_{мех}$ – механодинамический;

$U_{терм}$ – термодинамический ходы – соответственно от каждой составляющей комплексного воздействия.

Для углового деформирования динамический ход $\varphi_{дин}$ МЭЭ будет представляться аналогичным уравнением:

$$\varphi_{дин} = \varphi_{а.-г.} + \varphi_{мех} + \varphi_{терм}.$$

Дифференциальные уравнения для всех типов УЧЭ при вибрации, пульсации и температурных процессах, как уже отмечалось в начале главы, схожи между собой и аналогичны дифференциальным уравнениям эквивалентных электрических цепей.

Динамические воздействия в виде ударов, гармонической вибрации и линейных нагрузок при измерении статических параметров, например статического давления, играют роль вредных воздействий и относятся к категории динамических погрешностей. В этом случае $U_{дин}$ рассматривается как $\Delta U_{дин}$, $U_{а.-г.}$ – как $\Delta U_{а.-г.}$, $U_{мех}$ – как $\Delta U_{мех}$, $U_{терм}$ – как $\Delta U_{терм}$ и, соответственно, суммарная динамическая погрешность УЧЭ может быть определена по формуле:

$$\Delta U_{дин} = \Delta U_{а.-г.} + \Delta U_{мех} + \Delta U_{терм},$$

и $\varphi_{дин}$ рассматривается как $\Delta\varphi_{дин}$, $\varphi_{а.-г.}$ – как $\Delta\varphi_{а.-г.}$, $\varphi_{мех}$ – как $\Delta\varphi_{мех}$ и $\varphi_{терм}$ – как $\Delta\varphi_{терм}$:

$$\Delta\varphi_{дин} = \Delta\varphi_{а.-г.} + \Delta\varphi_{мех} + \Delta\varphi_{терм}$$

Аэро–, гидродинамические погрешности ($U_{а.-г.}$ и $\varphi_{а.-г.}$) являются функциями рабочего объема *V(t)* внутренней полости приемного узла [2].

При линейной деформации УЧЭ расчет динамической погрешности осуществляется, исходя из закона сохранения энергии, согласно которому работа, совершаемая УЧЭ может быть определена по формуле:

$$P\Delta V = F\Delta U = PF_{эфф}\Delta U$$

где P – давление;

ΔV – приращение объема внутренней полости приемного узла за счет деформации УЧЭ под воздействием давления;

ΔU – ход УЧЭ;

F – перестановочное усилие на величине хода ΔU;

$F_{эфф}$ – эффективная площадь.

Согласно [2] для мембран:

$$\Delta U_{а.-г.} = \frac{24}{7\pi R^2} V(t),$$

где *V(t)* зависит от типа воздействия (удар, гармоническая пульсация, линейное нарастание нагрузки и т.д. и может быть определено по формулам, приведенным в [2].

Далее с учетом величины максимального линейного деформирования определяют функцию объема УЧЭ *V(t)* согласно линейной теории (при малых деформациях) или нелинейной теории (при больших смещениях).

Для определения динамических погрешностей достаточно приравнять $\Delta U_{мех.} = U(t)$ и $\Delta\varphi_{мех} = \varphi(t)$, где $U(t)$ и $\varphi(t)$ – решения дифференциальных уравнений динамики УЧЭ при механическом воздействии.

На практике наиболее распространенным и опасным из видов теплового воздействия на УЧЭ является случай теплового удара.

Для рассмотрения термодинамических погрешностей УЧЭ (или термоупругости УЧЭ) необходимо связать изменение температуры с деформацией УЧЭ.

Осесимметричные колебания круглых пластин (мембран) под действием внезапно подведенного к поверхности УЧЭ теплового потока плотности (при учете связности полей деформации и температуры) могут быть описаны формулой:

$$\Delta\omega_{темп} = \omega(Q) = q \cdot B$$

где B – функция, зависящая от геометрических размеров УЧЭ, а также теплофизических и упругих свойств его материала;

Q – количество теплоты в единицу времени.

Определив динамическую погрешность УЧЭ, можно перейти к определению общей погрешности $\Delta U_{общ}$ и $\Delta\varphi_{общ}$:

$$\Delta U_{общ.} = \Delta U_{ст.} + \Delta U_{дин.},$$

$$\Delta\varphi_{общ.} = \Delta\varphi_{ст.} + \Delta\varphi_{дин.},$$

где $\Delta U_{ст}$, $\Delta\varphi_{ст}$ – статические линейные и угловые погрешности УЧЭ.

При этом статическая погрешность от аэро–, гидродинамических воздействий является функцией нагрузки *P(t)*:

$$\Delta U_{ст.\,а.-г.} = U[P(t)] = \gamma P(t),$$

$$\Delta\varphi_{ст.\,а.-г.} = \varphi[P(t)],$$

где γ – статическая чувствительность УЧЭ по давлению.

Статическая погрешность по динамомеханическим воздействиям определяется по формуле:

$$\Delta U_{мех.} = U[F(t)] = \gamma^* F(t),$$

$$\Delta\varphi_{мех.} = \varphi[M(t)],$$

где $\gamma^* = \gamma^*_{ст}$ – статическая чувствительность УЧЭ по силе.

И статические погрешности от температурных воздействий определяются методами термоупругости:

$$\Delta U_м = U[T(t)],$$
$$\Delta \varphi_м = \varphi[T(t)],$$

где $T(t)$ – функция температурного воздействия во времени.

В условиях статического нагружения напряжения σ с деформацией U (или φ) связано определенными зависимостями:

$$\sigma_{ст} = \sigma(U),$$
$$\sigma_{ст} = \sigma(\varphi),$$

Если принять $U = U(t)$ и $\varphi = \varphi(t)$, то можно вычислить корреляционную зависимость:

$$\sigma_1 = \sigma[U(t)] = \sigma(t),$$
$$\sigma_2 = \sigma[\varphi(t)] = \sigma(t),$$

и соответственно:

$$\sigma_{экв.} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}\ .$$

Авторами проведена разработка новой серии магнитоуправляемых контактов, используемых в автоматике для коммутации высокоточных электрических цепей с учетом рассмотренных выше динамических погрешностей МЭЭ. Серия [3,4,5] предназначена для систем пожарной и охранной сигнализаций за счет использования в качестве упругого элемента дополнительно введенной термобиметаллической пружины в комбинации с МЭЭ и наличия контактных узлов, осуществляющих передачу светового сигнала. Световой контакт реализуется за счет использования оптоволоконного элемента. МЭЭ в этой серии снабжены наноструктурированной планарной поверхностью, что ведет к повышению износостойкости, понижению и стабилизации переходного контактного сопротивления. Также новая серия магнитоуправляемых контактов включает в себя мембранные ртутносмачиваемые герконы, что позволяет исключить вибрацию при замыкании и вредное явление дребезга.

Поставленная задача решена за счет достижения технического результата, заключающегося в повышении надежности работы магнитоуправляемого контакта, благодаря наличию регулярного микрорельефа рабочих поверхностей контактного узла, что позволяет исключить дребезг, залипание и спекание контактных поверхностей.

Предлагаемая серия магнитоуправляемых контактов имеет улучшенные эксплуатационные свойства и расширенные функциональные возможности [3,4,5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабковская, Р.Я. Метод повышения надёжности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматики / Р.Я. Лабковская, В.Л. Ткалич // Научно–технический вестник. – Санкт–Петербург: СПбГУ ИТМО. – 2011. – Вып. 1(71). – С. 136–137.

2. Корсунов, В.П. Упругие чувствительные элементы (статика, динамика, надежность) / В.П. Корсунов. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1980 – 264 с.

3. Пат. 136920 Российская Федерация, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И., Коробейников А.Г.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». – № 2013137233/07; заявл. 08.08.2013; опубл. 20.01.14, Бюл. № 2. – 2 с.

4. Пат. 144305 Российская Федерация, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И., Коробейников А.Г.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». – № 2014108108/07; заявл. 03.03.2014; опубл. 20.08.14. – 2 с.

5. Пат. 144304 Российская Федерация, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». – № 2014111614/07; заявл. 25.03.2014; опубл. 20.08.14. – 2 с.

Лабковская Римма Яновна
Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург
Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем
E–mail: studsovet_itmo@mail.ru

Козлов Алексей Сергеевич
Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург
Аспирант кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем
E–mail: zz.kozlov@gmail.com

Ткалич Вера Леонидовна
Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург
Доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем
E–mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

Пирожникова Ольга Игоревна
Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург
Кандидат технических наук, ассистент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем
E–mail: cheezecake@mail.ru

R.Ya. LABKOVSKAYA, A.S. KOZLOV, V.L. TKALICH, O.I. PIROZHNIKOVA

ANALYSIS OF DINAMIC INACCURACIES OF THE MEMBRANE ELECTROMECHANICAL ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS

The paper deals with the analysis of dynamic inaccuracies of the membrane electromechanical elements of control systems in complex action of dynamic loads. The proposed method of calculating the elements of this type was incorporated in the development patented by the authors of a series of magnetically operated contacts with improved performance. This series is intended for use in electronic security and fire alarm systems.

Keywords: *dynamic inaccuracy, complex action, electromechanical element, magnetically operated contacts.*

BIBLIOGRAPHY

1. Labkovskaya, R.Ya. Metod povysheniya nadyozhnosti uprugih chuvstvitelnyh yelementov sistem upravleniya i avtomatiki / R.Ya. Labkovskaya, V.L. Tkalich // Nauchno–tehnicheskiy vestnik. – Sankt–Peterburg: SPbGU ITMO. – 2011. – Vyp. 1(71). – S. 136–137.

2. Korsunov, V.P. Uprugie chuvstvitelnye yelementy (statika, dinamika, nadezhnost) / V.P. Korsunov. – Saratov: Izdatelstvo Saratovskogo universiteta, 1980 – 264 s.

3. Pat. 136920 Rossiyskaya Federaciya, MPK H01 H1/66. Magnitoupravlyaemyy kontakt // Labkovskaya R.Ya., Tkalich V.L., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G.; zayavitel i patentoobladatel FGAOU VO «Sankt–Peterburgskiy nacionalnyy issledovatelskiy universitet informacionnyh tehnologiy, mehaniki i optiki». – № 2013137233/07; zayavl. 08.08.2013; opubl. 20.01.14, Byul. № 2. – 2 s.

4. Pat. 144305 Rossiyskaya Federaciya, MPK H01 H1/66. Magnitoupravlyaemyy kontakt // Labkovskaya R.Ya., Tkalich V.L., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G.; zayavitel i patentoobladatel FGAOU VO «Sankt–Peterburgskiy nacionalnyy issledovatelskiy universitet informacionnyh tehnologiy, mehaniki i optiki». – № 2014108108/07; zayavl. 03.03.2014; opubl. 20.08.14. – 2 s.

5. Pat. 144304 Rossiyskaya Federaciya, MPK H01 H1/66. Magnitoupravlyaemyy kontakt // Labkovskaya R.Ya., Tkalich V.L., Pirozhnikova O.I.; zayavitel i patentoobladatel FGAOU VO «Sankt–Peterburgskiy nacionalnyy issledovatelskiy universitet informacionnyh tehnologiy, mehaniki i optiki». – № 2014111614/07; zayavl. 25.03.2014; opubl. 20.08.14. – 2 s.

Labkovskaya Rimma Yanovna
St. Petersburg National Research University of Information Technologies Mechanics and Optics, St. Petersburg
PhD, assistant professor of department of design and security of computer systems
E–mail: studsovet_itmo@mail.ru

Kozlov Aleksey Sergeyevich
St. Petersburg National Research University of Information Technologies Mechanics and Optics, St. Petersburg
Postgraduate student of department of design and security of computer systems
E–mail: zz.kozlov@gmail.com

Tkalich Vera Leonidovna
St. Petersburg National Research University of Information Technologies Mechanics and Optics, St. Petersburg
Doctor of Technical Sciences, professor of department of design and security of computer systems
E–mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

Pirozhnikova Olga Igorevna
St. Petersburg National Research University of Information Technologies Mechanics and Optics, St. Petersburg
PhD, assistant of department of design and security of computer systems
E–mail: cheezecake@mail.ru

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ

УДК 621.384.3:620.179.132]:621.316.57

С.Ю. РАДЧЕНКО, М.Д. ДУКОВ

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЕГО ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены основные проблемы контроля электрооборудования, показаны недостатки большинства способов контроля. В качестве универсального метода контроля представлен метод тепловизионного осмотра электрооборудования, приведен пример термографии автоматического выключателя. Рассмотрена перспектива использования тепловизоров.

Ключевые слова: *тепловизионный контроль, электрооборудование, термография, избыточная температура.*

Вследствие роста количества электрооборудования, отработавшего нормативный срок службы, но продолжающего находиться в состоянии эксплуатации, вопрос диагностики становится как никогда актуальным [1–3]. Замена оборудования требует больших финансовых вложений, поэтому предпочтительнее проводить комплексные обследования электроустановок для определения реального остаточного ресурса их работы.

В настоящий момент существует несколько способов диагностики электрооборудования, тем не менее, грамотная оценка его технического состояния не всегда является простой задачей. В качестве критерия для сравнения различных систем поиска неисправностей обычно используется среднее время обнаружения отказа [4–6].

Одним из методов неразрушающего контроля является визуальный осмотр, который позволяет определить наличие внешних повреждений электрооборудования, но не дает возможности точно определить его техническое состояние. Для проведения большинства более точных измерений требуется вывод оборудования из эксплуатации и перевод потребителя на резервные источники питания. Например, для оценки технического состояния автоматического выключателя необходимо отсоединять его контакты как минимум один раз в шесть лет для измерения сопротивления изоляции [7–9], что ведет в большинстве случаев к приостановке электроснабжения потребителей, и, следовательно, к финансовым потерям. Ещё хуже дела обстоят с распределительными подстанциями – некоторые из них, в зависимости от условий местности, должны подвергаться испытаниям раз в шесть месяцев, при этом необходимо отсоединять все линии электропередач [10]. Для увеличения вероятности своевременного обнаружения дефекта и предотвращения аварийной ситуации следует увеличивать частоту испытаний, однако при этом снижается ресурс коммутирующей аппаратуры.

В настоящее время активно развиваются системы автоматизированного и дистанционного контроля электрооборудования [11]. Это особенно актуально для высоковольтного электрооборудования, которое требует постоянного контроля технического состояния для обеспечения безаварийной эксплуатации. Однако, существующие системы обладают рядом недостатков: высокая стоимость, низкий уровень автоматизации, несоответствие отдельных технических характеристик приборов требованиям задач диагностики высоковольтного электрооборудования.

Большинство дефектов электрооборудования может быть определено по значениям избыточной температуры, так как перед аварийной ситуацией в большинстве случаев наблюдается перегрев проблемных элементов системы, поэтому для диагностики целесообразно использовать системы с датчиками температур. Однако, снимать показания температуры, непосредственно прикрепив датчик к электроустановке, не всегда удобно, а в некоторых ситуациях, например, в контактных соединениях, это вообще невозможно.

Таким образом, для контроля перегрева элементов систем электроснабжения актуальным представляется применение различных тепловизионных устройств (рисунок 1).

Тепловизионные обследования оборудования проводятся в процессе его эксплуатации, то есть без снятия нагрузки и напряжения, что неоспоримо является преимуществом, так как нет необходимости прерывать электроснабжение потребителей, и результаты осмотра являются более достоверными. В то же время, тепловизионное обследование дает возможность провести осмотр без отключения подстанции. Также при использовании тепловизионного контроля имеется возможность обнаруживать дефекты на любой стадии их развития, предотвращая аварийные ситуации, а значит, производственные травмы и дорогостоящий ремонт или замену электрооборудования.

Рисунок 1 – Тепловизионное обследование электрооборудования

Как показывает практика, стоимость оборудования для тепловизионного контроля всегда окупается [12], так как один тепловизор может контролировать сразу несколько элементов системы, а в случае применения элементов машинного зрения контроль за аварийной ситуацией и принятие оперативного решения может обходиться без непосредственного постоянного участия оператора.

При проведении измерений с использованием тепловизионного контроля необходимо строго придерживаться нормативных документов, а также инструкции по эксплуатации изготовителя прибора. Целью инфракрасного термографического обследования является определение мест потенциальных отказов оборудования путем замеров отклонений температур в компонентах электрораспределительной системы [13,14].

Любые тепловые отклонения представляются на странице отчета как термографическое изображение и цифровая фотография электрического узла. Для лучшего понимания серьезности проблемы производятся непосредственные измерения температуры оборудования и неисправных компонентов его, с определением разности температур.

Если измерения проводятся в нормальных условиях работы оборудования (при значениях тока больших 60% от номинального, $I_{ном}$), то их результатами можно пользоваться для принятия дальнейших решений (для непосредственной оценки состояния нагруженного оборудования). В данном случае согласно РД 153–34.0–20.363–99 оценка результатов измерения проводится по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры). Если термографическое обследование проводится при токах, меньших 60% Іном, то оценка проводится согласно РД 153–34.0–20.363–99 по избыточной температуре. При этом, если тепловизионные испытания проводятся при токах, меньших 30% Іном, обнаружить дефекты на ранних стадиях развития не представляется возможным.

Если узлы распределительной системы долгое время работают при температуре, превышающей определенный диапазон температур, предусмотренный проектом, их срок службы сокращается пропорционально превышению температуры [15].

Для классификации выявленных в ходе тепловизионного обследования дефектов вводится термин «избыточная температура». Под избыточной температурой принято понимать превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация выявленного дефекта по значению избыточной температуры (Основание: РД 153–34.0–20.363–99, табл. 4–3, ГОСТ 10434–82)

Степень неисправности	Значения избыточной температуры, °С, при токе нагрузки 0,5 $I_{ном}$	Рекомендация
допустимо	менее 5	Нормальное состояние контактного соединения
тревога	5–10	Обнаруженную неисправность следует держать под контролем, предусмотренным графиком
опасно	10–30	Учащенный контроль раз в месяц
аварийно–опасно	30	Аварийный дефект требующий немедленного устранения

Рисунок 2 – Тепловизор «Testo 875»

При тепловизионном контроле рекомендуется использовать тепловизоры, у которых разрешающая способность составляет 0,1...0,2°С. Рассмотрим пример обследования электрооборудования с использованием тепловизора Testo 875 (рисунок 2).

Погрешность измерения данного прибора составляет ±2°С, инфракрасное разрешение 160x120 пикселей, диапазон температур от –30°С до +350°С. Testo 875 внесен в Государственный Реестр средств измерений РФ. Полученные в ходе обследования термограммы открываются в программе IRSoft, бесплатно распространяемой на сайте изготовителя (рисунок 3).

На теплограмме изображен автоматический выключатель. Температура окружающего воздуха составляет +25°С. Температура контактных соединений достигает значений до +53°С. Результат измерений классифицируется согласно РД 153–34.0–20.363–99, таблица 4–3, как опасный дефект. Рекомендуется проводить учащенный контроль один раз в месяц, а также провести дополнительные исследования при значениях тока, близких к номинальным. Таким образом, мы получили информацию о состоянии автоматического выключателя без необходимости вывода его из эксплуатации. Без тепловизионного обследования выявить данный дефект было бы невозможно.

В перспективе развития тепловизионного контроля предполагается использовать стационарно установленный тепловизор. Например, установка тепловизора напротив электрического щита и вывод текущего температурного состояния электрооборудования на монитор в пункте диспетчеризации позволит оперативному персоналу, обслуживающему данный щит, вовремя среагировать на развивающийся дефект и устранить его. Это особенно актуально для электрооборудования, установленного в труднодоступных местах.

На сегодняшний день не существует программного обеспечения для автоматического обнаружения дефектов с экрана тепловизора. Разработка таких программ позволит снизить эксплуатационные расходы, а также подавать сигналы о неисправности на систему автоматического ввода резерва еще до возникновения аварийной ситуации. При использовании стационарно установленных тепловизоров следует использовать тепловизоры с высокой разрешающей способностью для более точного отслеживания температуры в каждом из контактных соединений.

Однако, покупка таких тепловизоров требует достаточно больших финансовых средств, поэтому производителям устройств тепловизионного контроля следует сделать упор на разработку дешевых моделей, возможно, с нешироким диапазоном определяемых температур.

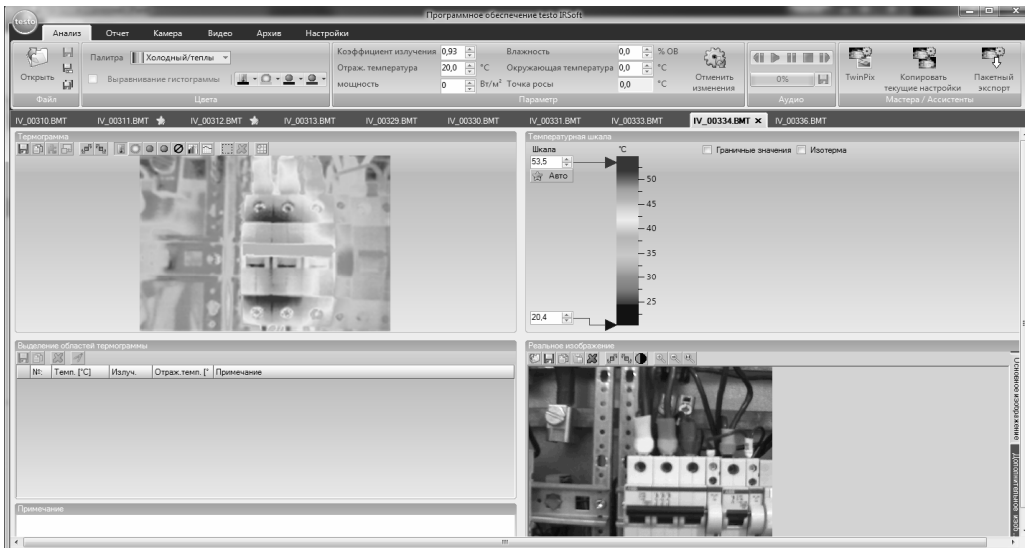


Рисунок 3 – Теплограмма автоматического выключателя в программе IRSoft

Вывод. Предлагаемый способ контроля позволяет:

● предупредить возникновение аварийных ситуаций в электрооборудовании и тем самым повысить надёжность электроснабжения потребителей;

● значительно снизить затраты на ремонты, поскольку повреждения выявляются на ранних стадиях;

● оценить действительное состояние электрооборудования с определением запаса его работоспособности, что особенно актуально для оборудования, отработавшего большие сроки (15 лет и более), при этом не прерывая электроснабжение потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин, В.Н. Монтаж и эксплуатация оборудования систем электроснабжения: Учебное пособие / В.Н. Костин. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 184 с.

2. Власов, А.Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики / А.Б. Власов. – М.: Колос, 2006. – 280 с.

3. Бажанов, С.А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств / С.А. Бажанов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 76 с.

4. Власов, А.Б. Анализ результатов статистической обработки данных тепловизионного контроля / А.Б. Власов // Вестник МГТУ. – 2002. – № 2. – С. 155–160.

5. Буторин, Д.В. Методика установления уровней факторов при испытании электрооборудования на надежность / Д.В. Буторин, Е.С. Глухов, И.В. Каргин // АПК России. – 2012. – Т. 60. – С. 35–36.

6. Корявин, А.Р. Современные проблемы отечественной стандартизации испытательных напряжений и методов испытаний электрооборудования высокого напряжения / А.Р. Корявин, О.В. Волкова, Е.А. Милкин // Электричество. – 2013. – № 7. – С. 30–35.

7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), изд. 7. – Москва:[б.и.], 2011.

8. РД 34.35.613–89 Правила технического обслуживания устройств релейной защиты и электроавтоматики электрических сетей 0,4–35 кВ. – Москва:[б.и.], 2000. – 136 с.

9. Янсюкевич, В.А. Общая методика испытания изоляции электрооборудования / В.А. Янсюкевич // Главный энергетик. – 2008. – № 4. – С. 25–31.

10. Ахметшин, Р.С. Комплектные распределительные устройства 6–10 кВ электрических подстанций / Р.С. Ахметшин, К.З. Фатыхов, Р.Г. Хакимов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2013. – № 3 (18). – С. 72–77.

11. Михеев, Г.М. Автоматизация испытаний высоковольтного электрооборудования в системе энергетики / Г.М. Михеев, Ю.А. Федоров // Электронные средства и системы управления. – 2007. – № 2. – С. 71–74.

12. Хренников, А.Ю. Экономическая эффективность тепловизионного контроля электрооборудования подстанций и промышленных предприятий / А.Ю. Хренников, М.Г. Сидоренко // Новое в российской электроэнергетике. – 2008. – № 10. – С. 34–43.

13. Поляков, В.С. Применение тепловизионных приемников для выявления дефектов высоковольтного оборудования / В.С. Поляков // Методические указания по контролю оборудования тепловизорами. – Л.: ЛИПКЭ, 1990. – 24 с.

14. Поляков, В.С. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования / В.С. Поляков //Сборник докладов научно–технического семинара «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». – 2000. – №11.

15. Афонин, А.В. Инфракрасная термография в энергетике. Технические средства приема инфракрасных излучений / А.В. Афонин, А.И. Таджибаев, С.С. Сергеев. – СПб: Изд. ПЭИПК, 2000. – 60 с.

Радченко Сергей Юрьевич
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет», г. Орел
Доктор технических наук, проф., проректор
E–mail: radsu@rambler.ru

Дуков Максим Дмитриевич
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
студент кафедры «Элекроснабжение промышленных предприятий»
Тел. 903 104 74 05
E–mail: maxdukov94@mail.ru

S.Yu. RADCHENKO, M.D. DUKOV

ELECTRICAL EQUIPMENTS THERMAL IMAGIC DIAGNOSTICS FEATURES AND PROSPECTS

The work contains view on the main probems of electrical equipments diagnostics, shortcomings of most methods are shown. Thermal imagic diagnostics method is represented as an universal method, thermography of a circuit breaker is shown as an example. The work considers prospects of using thermal imagers.

Keywords: *Thermal imagic diagnostics, electrical equipment, thermography, excessive temperature.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kostin, V.N. Montazh i ekspluatatsiya oborudovaniya sistem elektrosnabzheniya: Uchebnoye posobiye / V.N. Kostin. – SPb.: SZTU, 2004. – 184 s.
2. Vlasov, A.B. Modeli i metody termograficheskoy diagnostiki obyektov energetiki / A.B. Vlasov. – M.: Kolos, 2006. – 280 s.
3. Bazhanov, S.A. Infrakrasnaya diagnostika elektrooborudovaniya raspredelitelnykh ustroystv / S.A. Bazhanov. – M.: NTF «Energoprogress», 2000. – 76 s.
4. Vlasov, A.B. Analiz rezultatov statisticheskoy obrabotki dannykh teplovizionnogo kontrolya / A.B. Vlasov // Vestnik MGTU. – 2002. – № 2. – S. 155–160.
5. Butorin, D.V. Metodika ustanovleniya urovney faktorov pri ispytanii elektrooborudovaniya na nadezhnost / D.V. Butorin, Ye.S. Glukhov, I.V. Kargin // APK Rossii. – 2012. – T. 60. – S. 35–36.
6. Koryavin, A.R. Sovremennyye problemy otechestvennoy standartizatsii ispytatelnykh napryazheniy i metodov ispytaniy elektrooborudovaniya vysokogo napryazheniya / A.R. Koryavin, O.V. Volkova, Ye.A. Milkin // Elektrichestvo. – 2013. – № 7. – S. 30–35.
7. Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE), izd. 7. – Moskva:[b.i.], 2011.
8. RD 34.35.613–89 Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv releynoy zashchity i elektroavtomatiki elektricheskikh setey 0,4–35 kV. – Moskva:[b.i.], 2000. – 136 s.
9. Yansyukevich, V.A. Obshchaya metodika ispytaniya izolyatsii elektrooborudovaniya / V.A. Yansyukevich // Glavnyy energetik. – 2008. – № 4. – S. 25–31.
10. Akhmetshin, R.S. Komplektnyye raspredelitelnyye ustroystva 6–10 kV elektricheskikh podstantsiy / R.S. Akhmetshin, K.Z. Fatykhov, R.G. Khakimov // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2013. – № 3 (18). – S. 72–77.
11. Mikheyev, G.M. Avtomatizatsiya ispytaniy vysokovoltnogo elektrooborudovaniya v sisteme energetiki / G.M. Mikheyev, YU.A. Fedorov // Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya. – 2007. – № 2. – S. 71–74.
12. Khrennikov, A.YU. Ekonomicheskaya effektivnost teplovizionnogo kontrolya elektrooborudovaniya podstantsiy i promyshlennykh predpriyatiy / A.YU. Khrennikov, M.G. Sidorenko // Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. – 2008. – № 10. – S. 34–43.
13. Polyakov, V.S. Primeneniye teplovizionnykh priyemnikov dlya vyyavleniya defektov vysokovoltnogo oborudovaniya / V.S. Polyakov // Metodicheskiye ukazaniya po kontrolyu oborudovaniya teplovizorami. – L.: LIPKE, 1990. – 24 s.
14. Polyakov, V.S. Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya / V.S. Polyakov //Sbornik dokladov nauchno–tekhnicheskogo seminara «Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya». – 2000. – №11.
15. Afonin, A.V. Infrakrasnaya termografiya v energetike. Tekhnicheskiye sredstva priyema infrakrasnykh izlucheniy / A.V. Afonin, A.I. Tadzhibayev, S.S. Sergeyev. – SPb: Izd. PEIPK, 2000. – 60 s.

Radchenko Sergey Yurievich
Orel State Technical University, Orel
Doctor of Technical Science, Professor, Provost
E–mail: radsu@rambler.ru

Dukov Maxim Dmitrievich
National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow
Student
Tel. 903 104 74 05
E–mail: maxdukov94@mail.ru

УДК 629.7.018

Е.С. ЕФРЕМОВА

ИМИТАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ И КОНТРОЛЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ САМОЛЕТА

Рассматривается задача имитации параметров движения самолета относительно окружающей воздушной среды, особенности построения, алгоритмы формирования выходных сигналов и варианты реализации имитатора воздушных сигналов самолета для контроля функционирования и наземной отработке комплексов бортового оборудования на этапе производства.

***Ключевые слова**: самолет, комплексы бортового оборудования, контроль функционирования, воздушные сигналы, имитация, вихревая система, алгоритмы, функциональная схема имитатора.*

В состав комплексов бортового оборудования самолетов и других объектов авиационной техники входят системы измерения высотно–скоростных параметров, определяющих их движение относительно окружающей воздушной среды и получивших название воздушных сигналов [1, 2]. Поэтому на этапе производства при наземной отработке и контроле функционирования комплексов бортового оборудования самолетов возникает необходимость имитации реальных режимов полета по воздушным сигналам [3, 4].

При имитации воздушных сигналов самолета необходимо обеспечивать синхронное формирование выходных сигналов по барометрической высоте H, истинной воздушной скорости $V_{\text{В}}$, числу Маха M, приборной скорости $V_{\text{ПР}}$, истинному углу атаки α, температуре наружного воздуха $T_{\text{Н}}$, плотности окружающей среды $\rho_{\text{Н}}$ на высоте полета H. Для формирования указанных воздушных сигналов по традиционным алгоритмам [5, 6] имитатор должен включать задатчики большого числа входных информативных сигналов реальной бортовой системы воздушных сигналов: полное $P_{\text{П}}$ и статическое $P_{\text{СТ}}$ давления на заданной высоте полета H, температура $T_{\text{Т}}$ заторможенного набегающего воздушного потока, местные углы атаки α_M на правом и левом бортах фюзеляжа, угол скольжения β.

При этом имитатор системы воздушных сигналов самолета должен обеспечивать выдачу цифровых (кодовых) или при необходимости и аналоговых сигналов, пропорциональных барометрической высоте, истинной воздушной скорости, температуре наружного воздуха, числу Маха, приборной скорости, истинному углу атаки и другим воздушным сигналам на характерных этапах и режимах полета самолета с техническими и метрологическими характеристиками, близкими к характеристикам имитируемых бортовых систем воздушных сигналов.

Все это затрудняет создание полномасштабного имитатора бортовых систем воздушных сигналов, усложняет его конструктивную схему, повышает стоимость изготовления и эксплуатации.

Ниже раскрывается возможность создания сравнительно простого унифицированного имитатора выходных сигналов системы воздушных сигналов самолета для наземной отработки и контроля функционирования комплексов бортового оборудования, построенного на основе разработанной в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н. Туполева–КАИ оригинальной вихревой системы воздушных сигналов самолета [7, 8].

На рисунке 1 приведена схема, определяющая функциональные и конструктивные особенности вихревой системы воздушных сигналов самолета.

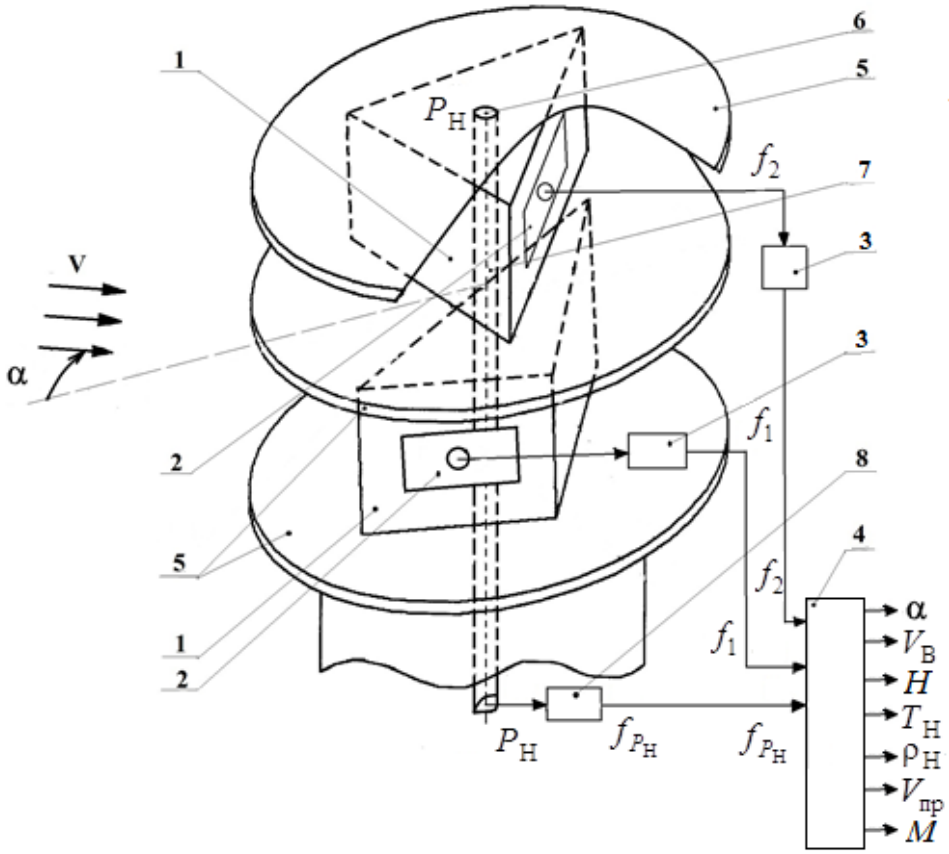


Рисунок 1 – Конструктивно–функциональная схема вихревой системы воздушных сигналов

Основным конструктивным элементом рассматриваемой системы воздушных сигналов является вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, который содержит два клиновидных тела 1, расположенных ортогонально друг к другу и своими основаниями встречно набегающему воздушному потоку, вектор скорости V которого равен по величине и обратный по знаку вектору $V_В$ истинной воздушной скорости самолета, т.е. $V = -V_В$. На тыльных поверхностях клиновидных тел расположены приемники 2 пульсаций давлений, выходы которых подключены к устройствам 3 регистрации частот f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами. Выходы устройств 3 регистрации частот вихреобразования подключены ко входу устройства обработки 4.

При работе в бортовых условиях вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости устанавливается на самолете таким образом, чтобы общая ось клиновидных тел 1 была перпендикулярна плоскости изменения измеряемого аэродинамического угла α, а рабочие сечения клиновидных тел, с ортогонально расположенными основаниями, находились в плоскости изменения контролируемого аэродинамического угла α.

При изменении аэродинамического угла α клиновидные тела 1 будут находится к направлению вектора скорости V набегающего воздушного потока под разными углами $\varphi_1 = \varphi_0 + \alpha$ и $\varphi_2 = \varphi_0 - \alpha$, где $2\varphi_0$ – угол установки оснований клиновидных тел, что приводит к изменению частот f_1 и f_2 вихреобразования за телами.

Приемники, расположенные за клиновидными телами, воспринимают пульсации давлений на тыльных поверхностях клиновидных тел, которые регистрируются пневмоэлектрическими преобразователями 2, установленными внутри клиновидных тел 1. Выходные сигналы пневмоэлектрических преобразователей 2 поступают на входы устройств регистрации частот 3, которые измеряют частоты f_1 и f_2 вихреобразования за

клиновидными телами 1.

Частоты f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами с характерным размером l, основания которых расположены ортогонально друг к другу под углом $2\varphi_0 = 90°$, будут определяться соотношениями вида [9]:

$$f_1 = \frac{Sh}{l}\frac{V_\text{В}}{\sin(\varphi_0+\alpha)} = \frac{Sh}{l}\frac{V_\text{В}}{\sin\varphi_0\cos\alpha+\cos\varphi_0\sin\alpha} = \sqrt{2}\frac{Sh}{l}\frac{V_\text{В}}{\cos\alpha+\sin\alpha};$$
$$f_2 = \frac{Sh}{l}\frac{V_\text{В}}{\sin(\varphi_0-\alpha)} = \frac{Sh}{l}\frac{V_\text{В}}{\sin\varphi_0\cos\alpha-\cos\varphi_0\sin\alpha} = \sqrt{2}\frac{Sh}{l}\frac{V_\text{В}}{\cos\alpha-\sin\alpha}. \quad (1)$$

Измеренные частоты f_1 и f_2 поступают на вход устройства обработки 4, выполненного в виде вычислителя, на выходе которого формируются значения аэродинамического угла α и истинной воздушной скорости $V_\text{В}$ в соответствии с уравнениями [7, 8]

$$\alpha = arctg\frac{f_2-f_1}{f_1+f_2}; \qquad V_\text{В} = \frac{l}{\sqrt{2}Sh}\frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2+f_2^2}}, \quad (2)$$

где f_1 и f_2 – частоты вихреобразования за клиновидными телами;

Sh – число Струхаля;

α и $V_\text{В}$ – измеряемый аэродинамический угол и истинная воздушная скорость.

При конструктивной реализации вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости клиновидные тела располагаются на одной оси друг над другом. С целью обеспечения измерения в трехмерном набегающем потоке и устранения влияния другого аэродинамического угла β самолета, перпендикулярно общей оси клиновидных тел установлены струевыпрямители, выполненные в виде тонких дисков 5, расположенных на верхних и нижних основаниях обоих клиновидных тел 1 и выделяющих в набегающем воздушном потоке зоны вихреобразования клиновидных тел. Это снижает влияние скоса набегающего потока в плоскости, перпендикулярной плоскости измерения, а, следовательно, уменьшает погрешности, обусловленные этим скосом потока.

Для расширения функциональных возможностей вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости и обеспечения измерения других высотно–скоростных параметров – барометрической высоты H, температуры $T_\text{Н}$ наружного воздуха на высоте полета H, плотности воздуха $\rho_\text{Н}$ на высоте H, приборной скорости $V_\text{ПР}$, числе Маха M и других связанных с ними параметров, на верхней или нижней поверхности одного струевыпрямителя 5, например, верхнего, установлен отверстие–приемник 6 статического давления $P_\text{Н}$ набегающего воздушного потока, который через пневмопровод 7 связан со входом пневмоэлектрического преобразователя (датчика) 8 абсолютного давления преимущественно с частотным выходным сигналом. Выход пневмоэлектрического преобразователя (датчика) 9 в виде частоты $f_{P_\text{Н}}$, пропорциональной статическому давлению $P_\text{Н}$ набегающего воздушного потока, подключен ко входу устройства обработки 4. Устройство обработки 4 выполнено в виде вычислителя, реализующего предложенные [9] алгоритмы определения всех высотно–скоростных параметров движения самолета относительно окружающей воздушной среды, в том числе:

1. По воспринимаемому статическому давлению $P_\text{Н}$ набегающего воздушного потока в соответствии со стандартными зависимостями, соответствующими ГОСТ 4401–81 [10], абсолютная высота полета в диапазоне [–200 м < H < 11000 м] определяется по формуле

$$H = \frac{T_0}{\tau}\left[1-\left(\frac{P_\text{Н}}{P_0}\right)^{\tau R}\right], \quad (3)$$

где T_0=288,15 К и P_0=101325 Па – абсолютная температура и давление на высоте H=0;

τ=0,0065 К – температурный градиент;

R=29,27125 м/К – газовая постоянная.

2. Используя ГОСТ 5212–74 [11], истинную воздушную скорость $V_{\text{В}}$, измеренную вихревым датчиком, можно представить в виде

$$V_{\text{В}} = \sqrt{2gRT_{\text{Н}}\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{P_{\text{П}}}{P_{\text{Н}}}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right]} = \sqrt{2gRT_{\text{Н}}\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(\frac{P_{\text{дин}}}{P_{\text{Н}}} + 1\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}, \quad (4)$$

где $g = 9{,}80665\text{м/с}^2$ – ускорение силы тяжести;

$P_{\text{П}} = P_{\text{Н}} + P_{\text{дин}}$ – полное давление набегающего воздушного потока;

$P_{\text{дин}} = \frac{\rho_{\text{Н}} V_{\text{В}}^2}{2}$ – динамическое давление (скоростной напор) набегающего воздушного потока;

k=1,4 – показатель адиабаты воздуха.

3. Плотность воздуха $\rho_{\text{Н}}$ на высоте H можно представить как [12]

$$\rho_{\text{Н}} = \rho_0 \frac{P_{\text{Н}} T_{\text{Н}}}{P_0 T_0}, \quad (5)$$

где $\rho_0 = 1{,}225\text{кг/м}^3 = 0{,}125\text{кГс}^2/\text{м}^4$ – массовая плотность воздуха на высоте H=0.

4. Подставив в выражение (4) значения параметров $V_{\text{В}}$ и $P_{\text{Н}}$, измеряемых вихревым датчиком, получим соотношение вида

$$T_{\text{Н}} = \frac{V_{\text{В}}^2}{2gR\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0T_0} T_{\text{Н}} V_{\text{В}}^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}, \quad (6)$$

которое устанавливает неявную, но однозначную связь измеряемой вихревым датчиком истинной воздушной скорости $V_{\text{В}}$ с абсолютной температурой $T_{\text{Н}}$ на высоте H.

5. Определяя из соотношения (6) абсолютную температуру $T_{\text{Н}}$, по зависимости (5) можно определить плотность воздуха $\rho_{\text{Н}}$ на высоте H.

6. В соответствии с ГОСТ 5212–74 [11] можно определить (вычислить) приборную скорость полета, т.е. истинную воздушную скорость $V_{\text{В}}$, приведенную к нормальным условиям на уровне H=0, по формуле

$$V_{\text{ПР}} = \sqrt{2gRT_0\left(\frac{k}{k-1}\right)\left[\left(1 + \frac{\rho_0}{2P_0} V_{\text{В}}^2\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right]}. \quad (7)$$

7. Число Маха M, характеризующее отношение истинной воздушной скорости $V_{\text{В}}$ к скорости звука $a_{\text{Н}} = \sqrt{kgRT_{\text{Н}}}$ на высоте H, для дозвуковых скоростей полета будет определяться уравнением

$$M = \sqrt{\frac{2}{k-1}\left[\left(1 + \frac{\rho_0 T_{\text{Н}}}{2P_0T_0} V_{\text{В}}^2\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}. \quad (8)$$

Таким образом, воспринимая и измеряя частоты f_1 и f_2 вихреобразования за клиновидными телами и абсолютное статическое давление $P_{\text{Н}}$ набегающего воздушного потока, по зависимостям (2) – (8) в вычислителе 4 определяются все высотно–скоростные параметры полета – воздушные сигналы самолета, существенно расширяя функциональные

возможности вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости.

По сравнению с известными системами воздушных сигналов вихревая система воздушных сигналов имеет ряд существенных преимуществ:

- Обеспечивает одновременное измерение всех высотно–скоростных параметров, определяющих движение самолета относительно окружающей воздушной среды.
- Измерение всех высотно–скоростных параметров движения самолета осуществляется с помощью одного неподвижного многофункционального малогабаритного приемника потока, практически не искажающего аэродинамику самолета и не влияющего на его аэродинамические характеристики.
- Измерение всех высотно–скоростных параметров обеспечивается без существенного усложнения конструктивной схемы вихревого датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости, а следовательно повышения себестоимости его производства.
- Использование в качестве первичной информации частотно–временных информативных сигналов позволяет снизить погрешности, обусловленные дрейфом нуля и изменением чувствительности элементов измерительной цепи восприятия, преобразования, передачи и обработки информации.
- Получение выходных сигналов по всем высотно–скоростным параметрам самолета в непосредственно цифровой форме упрощает их использование в современных системах отображения информации, системах управления и других технических системах, в том числе в имитаторе.

Указанные достоинства вихревой системы воздушных сигналов определяют перспективы построения на ее основе имитатора системы воздушных сигналов самолета для наземной отработки и контроля функционирования комплексов бортового оборудования.

При построении имитатора на основе вихревой системы воздушных сигналов самолета возможны два варианта.

Для реализации *первого варианта* необходима аэродинамическая труба или эталонная аэродинамическая установка, имитирующие воздушный поток, набегающий на многофункциональный приемник вихревой системы воздушных сигналов. При установке многофункционального приемника в рабочее поле аэродинамической трубы или эталонной аэродинамической установки и задании нормированной скорости воздушного потока на выходе вихревой системы воздушных сигналов будут заданы нормированные значения высотно–скоростных параметров полета самолета, соответствующих барометрической высоте полета, близкой к нулевой высоте. Сформированные вихревой системой воздушных сигналов нормированные значения высотно–скоростных параметров используются при контроле работоспособности бортовых систем самолета при стендовых испытаниях.

Достоинством данного варианта построения имитатора является близость процесса формирования имитируемых высотно–скоростных параметров к реальному процессу работы бортовых систем воздушных сигналов.

К недостаткам данного варианта имитатора можно отнести невозможность имитировать изменения барометрической высоты и необходимость использования сертифицированной аэродинамической трубы или эталонной аэродинамической установки.

При реализации *второго варианта* имитатора системы воздушных сигналов самолета изготавливается экспериментальный образец вихревой системы воздушных сигналов самолета. Проводятся тарировочные испытания каналов аэродинамического угла и истинной воздушной скорости в сертифицированной аэродинамической трубе и определяются зависимости частот вихреобразования f_1 и f_2 от различных (заданных) значений скорости V набегающего воздушного потока и аэродинамического угла α, которые затем используются для имитации бортовой системы воздушных сигналов.

На рисунке 2 приведена схема, раскрывающая функциональный состав такого имитатора системы воздушных сигналов самолета.

Рассматриваемый имитатор системы воздушных сигналов самолета в своем составе содержит:

– Экспериментальный образец вихревой системы воздушных сигналов с технологическим выходом штуцера для восприятия статического давления окружающей среды и технологическими входами схем регистрации частот вихреобразования f_1 и f_2 генераторов вихрей.

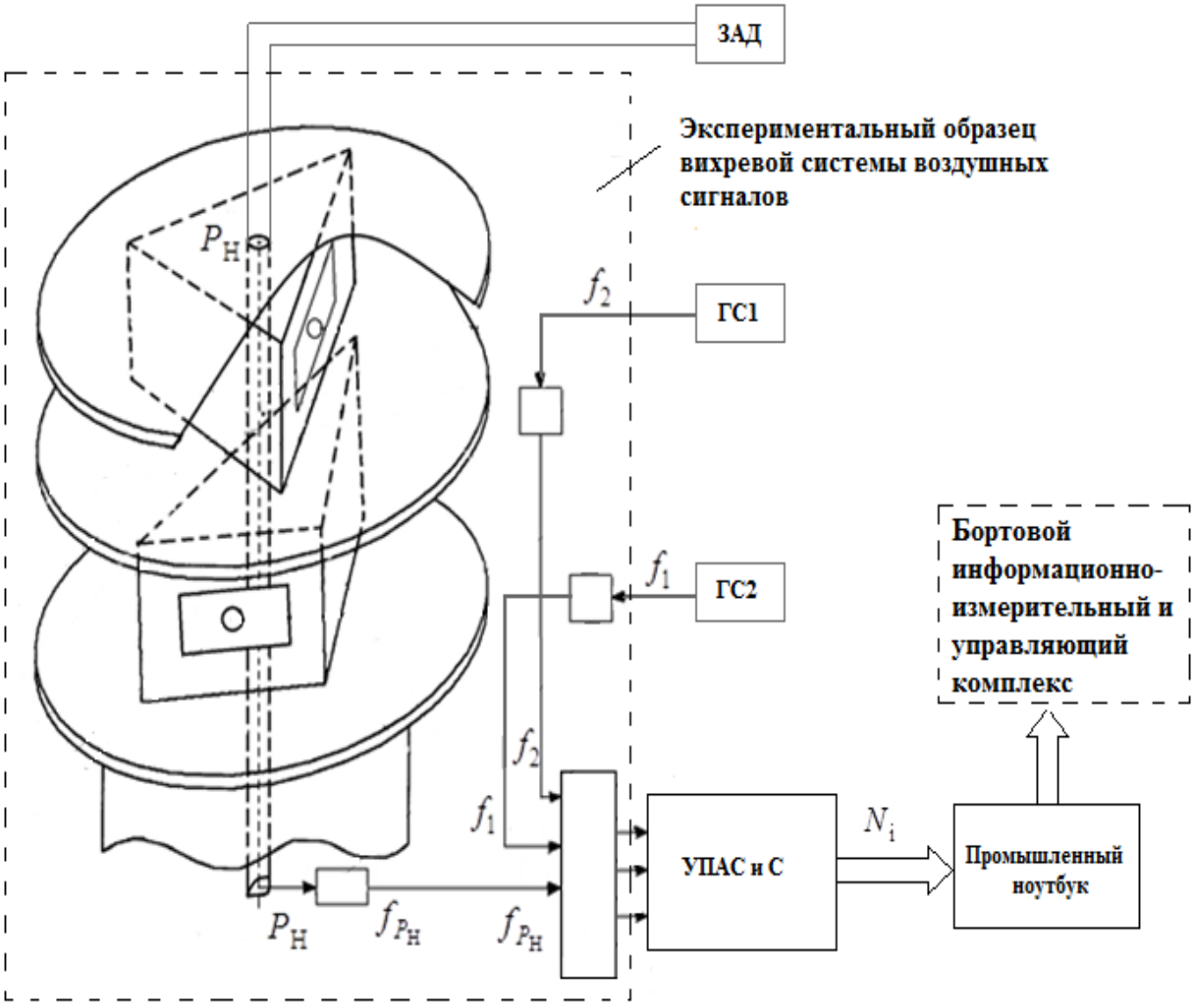


Рисунок 2 – Структурно–функциональная схема имитатора системы воздушных сигналов самолета

– Генераторы ГС1 и ГС2 прямоугольных или синусоидальных сигналов, имитирующих электрические сигналы с частотами вихреобразования f_1 и f_2 генераторов вихрей в диапазоне реальных частот вихреобразования.

– Задатчик абсолютного давления (ЗАД), имитирующий изменение статического давления на заданной высоте полета.

– Устройство преобразования аналоговых сигналов и сопряжения с PS–совместимыми персональным компьютером (УПАС и С).

– Промышленный ноутбук для обработки первичной информации по заданным алгоритмам и формирования выходных сигналов имитатора по высотно–скоростным параметрам самолета.

Используя полученные экспериментально зависимости частот вихреобразования f_1 и f_2 от скорости V и угла α, с помощью генераторов ГС1 и ГС2 можно задавать определенные значения частот f_1 и f_2 и имитировать заданные значения скорости воздушного потока V и

аэродинамического угла α.

Задаваемые от двух эталонных генераторов импульсных или гармонических сигналов ГС1 и ГС2 значения частот вихреобразования f_1 и f_2 подаются на входы схем регистрации частот вихреобразования экспериментального образца вихревой системы воздушных сигналов и на выходе вычислителя в соответствии с уравнения (2) формируются имитируемые значения аэродинамического угла α и истинной скорости $V_В$.

Для имитации барометрической высоты полета с помощью эталонного задатчика абсолютного давления (ЗАД), выполненного в виде автономной контрольно–поверочной аппаратуры (КПА) задается статическое давление $P_Н$ на заданной высоте полета H. К штуцеру, установленному на поверхности верхнего экранирующего диска вихревого датчика с помощью пневмопровода подключается выход задатчика абсолютного давления. При заданном значении давления $P_Н$, используя вычисленные значения аэродинамического угла α и истинной воздушной скорости, по зависимостям (3) – (8) в вычислителе вихревой системы воздушных сигналов определяются все другие имитируемые высотно–скоростные параметры полета самолета. Выходные сигналы вычислителя через устройство УПАС и С поступают на промышленный ноутбук, который осуществляет их индикацию и передачу в бортовой информационно–измерительный и управляющий комплекс.

Таким образом, на выходе имитатора системы воздушных сигналов формируются коды всех имитируемых высотно–скоростных параметров полета самолета, которые используются при наземной отработке и контроле функционирования бортового информационно–измерительного и управляющего комплекса самолета. При этом по сравнению с первым вариантом не требуется сертифицированная аэродинамическая труба или эталонная аэродинамическая установка, это определяет предпочтительность использования данного варианта имитатора системы воздушных сигналов для наземной отработки комплексов бортового оборудования самолетов различного класса и назначения.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию Минобрнауки России № 2014/55 (НИР № 990).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров, Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового арготического комплекса: Теория, проектирование, применение / Под ред. доктора техн. наук В.М. Солдаткина. – М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2009. – 760 с.

2. Ефанов, В.Н. Авиационные приборы и измерительно–вычислительные комплексы / В.Н. Ефанов, В.П. Токарев. – М.: Машиностроение, 2010. – 783 с.

3. Контроль функционирования больших систем / Г.П. Шибанов, В.А. Артеменко, В.А. Метешкин, Н.И. Циклинский; под ред. Г.П. Шибанова. – М.: Машиностроение, 1977. – 356 с.

4. Майоров, А.В. Выявление причин отказов авиационного оборудования: Справочник / А.В. Майоров, С.М. Мусин, Б.Ф. Янковский. – М.: Транспорт, 1996. – 286 с.

5. Браславский, Д.А. Авиационные приборы и автоматы / Д.А. Браславский, С.С. Логунов, Д.С. Пельпор. – М.: Машиностроение, 1970. – 432 с.

6. Авиационные приборы и измерительные системы / Под ред. В.Г. Воробьева. – М.: Транспорт, 1981. – 391 с.

7. Патент РФ №2506596, МПК G01P 5/00. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Заявл. 16.07.2012. Заявка №2012130111/28. Опубл. 10.02.2014. – Бюл. №4.

8. Патент РФ №2556760, МПК G01P 5/00. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / Солдаткин В.М., Солдаткина Е.С. Заявл. 21.047.2014. Заявка №2014116035/28. Опубл. 20.07.2015. – Бюл. №20.

9. Солдаткина, Е.С. Вихревая система воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата / Е.С. Солдаткина, В.М. Солдаткин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3. – С.110–116.

10. ГОСТ 4401–81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд–во Стандартов, 1981. – 179 с.

11. ГОСТ 5212–74. Таблицы аэродинамическая. Динамические давления и температуры торможения воздуха для скорости полета от 10 до 4000 км/ч. Параметры. – М.: Изд–во Стандартов, 1974. – 239 с.

12. Залманзон, Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления / Л.А.

Залманзон. – М.: Изд–во АН СССР, 1961. – 249 с.

Ефремова Елена Сергеевна
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ
Ассистент кафедры «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)
Тел.: +7–927–035–11–61
E–mail: w–soldatkin@mail.ru

E.S. EFREMOVA

SIMULATING OF AIR DATA SIGNALS DURING GROUND TESTING AND CONTROLING FUNCTION OF AVIONICS ONBOARD SYSTEMS OF AIRPLANE

The problem of simulating the motion parameters of airplane relative to the surrounding air environment, features of construction, the algorithms for generating output signals and implementation versions of the simulator of air data signals from airplane to control the functioning and ground testing of avionics onboard systems at the production stage are considered.

Keywords: *airplane, avionics systems, control of functioning, air data signals, simulation, vortex system, algorithms, functional diagram of the simulator.*

BIBLIOGRAPHY

1. Makarov, N.N. Sistemy obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya bortovogo argoticheskogo kompleksa: Teoriya, proyektirovaniye, primeneniye / Pod red. doktora tekhn. nauk V.M. Soldatkina. – M.: Mashinostroyeniye / Mashinostroyeniye – Polet, 2009. – 760 s.

2. Yefanov, V.N. Aviatsionnyye pribory i izmeritelno–vychislitelnyye kompleksy / V.N. Yefanov, V.P. Tokarev. – M.: Mashinostroyeniye, 2010. – 783 s.

3. Kontrol funktsionirovaniya bolshikh sistem / G.P. Shibanov, V.A. Artemenko, V.A. Meteshkin, N.I. Tsiklinskiy; pod red. G.P. Shibanova. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 356 s.

4. Mayorov, A.V. Vyyavleniye prichin otkazov aviatsionnogo oborudovaniya: Spravochnik / A.V. Mayorov, S.M. Musin, B.F. Yankovskiy. – M.: Transport, 1996. – 286 s.

5. Braslavskiy, D.A. Aviatsionnyye pribory i avtomaty / D.A. Braslavskiy, S.S. Logunov, D.S. Pelpor. – M.: Mashinostroyeniye, 1970. – 432 s.

6. Aviatsionnyye pribory i izmeritelnyye sistemy / Pod red. V.G. Vorobyeva. – M.: Transport, 1981. – 391 s.

7. Patent RF №2506596, MPK G01P 5/00. Vikhrevoy datchik aerodinamicheskogo ugla i istinnoy vozdushnoy skorosti / Soldatkin V.M., Soldatkina Ye.S. Zayavl. 16.07.2012. Zayavka №2012130111/28. Opubl. 10.02.2014. – Byul. № 4.

8. Patent RF №2556760, MPK G01P 5/00. Vikhrevoy datchik aerodinamicheskogo ugla i istinnoy vozdushnoy skorosti / Soldatkin V.M., Soldatkina Ye.S. Zayavl. 21.047.2014. Zayavka №2014116035/28. Opubl. 20.07.2015. – Byul. № 20.

9. Soldatkina, Ye.S. Vikhrevaya sistema vozdushnykh signalov dozvukovogo letatelnogo apparata / Ye.S. Soldatkina, V.M. Soldatkin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 3. – S.110–116.

10. GOST 4401–81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd–vo Standartov, 1981. – 179 s.

11. GOST 5212–74. Tablitsy aerodinamicheskaya. Dinamicheskiye davleniya i temperatury tormozheniya vozdukha dlya skorosti poleta ot 10 do 4000 km/ch. Parametry. – M.: Izd–vo Standartov, 1974. – 239 s.

12. Zalmanzon, L.A. Protochnyye elementy pnevmaticheskikh priborov kontrolya i upravleniya / L.A. Zalmanzon. – M.: Izd–vo AN SSSR, 1961. – 249 s.

Efremova Elena Sergeevna
Kazan national research technical university named after A.N.Tupolev–KAI
Assistant of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph. +7–927–035–11–61
E–mail: w–soldatkin@mail.ru

УДК 629.7.05.67: 629.7.054.44

А.В. НИКИТИН, В.В. СОЛДАТКИН, В.М. СОЛДАТКИН

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРТОЛЕТА

Рассматривается важность и проблема контроля скорости и направления ветра, других параметров окружающей воздушной среды при эксплуатации вертолета. Раскрываются способы повышения помехоустойчивости системы контроля метрологических параметров на стартовых и взлетно–посадочных режимах вертолета.

Ключевые слова: *вертолет, эксплуатация, окружающая среда, состояние, контроль, система, помехоустойчивость, стартовые и взлетно–посадочные режимы.*

Эксплуатация вертолетов происходит в приземном возмущенном слое атмосферы в условиях воздействия опасных ветровых возмущений, влияющих на безопасность эксплуатации. При этом важное значение имеет контроль скорости и угла направления ветра относительно продольной оси вертолета, достоверность которого позволяет предотвратить опрокидывание вертолета, соударение лопастей несущего винта с земной поверхностью, хвостовой балкой и между собой, предотвращение других авиационных происшествий [1, 2].

Традиционные аэродромные средства метеорологических измерений [3, 4] не позволяют обеспечить достоверный контроль угла направления ветра относительно продольной оси вертолета. На работу бортовых средств контроля параметров окружающей воздушной среды [5, 6] существенное влияние оказывают индуктивные потоки несущего винта. Это обусловливает необходимость поиска эффективных способов повышения помехоустойчивости системы контроля параметров окружающей среды на борту вертолета.

Для снижения влияния индуктивных потоков несущего винта вертолета на точность контроля состояния и параметров окружающей среды на борту вертолета предложено для целей измерения использовать информацию аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта [7, 8].

В качестве информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта предложено использовать вектор скорости $\boldsymbol{V}_\Sigma$ результирующего воздушного потока вихревой колонны, который предложено представить в виде трех составляющих: стационарной составляющей $\boldsymbol{V}$, обусловленной поступательным движением вертолета относительно окружающей воздушной среды с учетом параметров вектора ветра $\boldsymbol{W}$, стационарной составляющей $\boldsymbol{V}_i$ индуктивного потока и воздушного потока за счет силы тяги несущего винта и флуктуационной составляющей $\boldsymbol{V}_\text{ф}$, обусловленной маховыми движениями лопастей и работой автомата перекоса и приводящей к пульсациям индуктивной скорости и углов скоса вихревой колонны [8].

Так как круговые частоты $\omega_{\text{ф}i}$ флуктуационных составляющих $V_{\text{ф}i}$ вектора $\boldsymbol{V}_\text{ф}$ кратны угловой скорости $\omega_\text{н}$ вращения несущего винта, то для повышения помехоустойчивости каналов контроля параметров окружающей среды по информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта вектор флуктуационной скорости $\boldsymbol{V}_\text{ф}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны должен быть выделен и в значительной степени отфильтрован от составляющих $\boldsymbol{V}$ и $\boldsymbol{V}_i$ в каналах системы.

На рисунке 1, *а* приведена запись флуктуационной составляющей модуля вектора скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, полученной при летных испытаниях системы воздушных сигналов вертолета (СВС–В), выполненной на основе свободно ориентированного приемника воздушных давлений, установленного в зоне вихревой колонны несущего винта вертолета Ми–28 [9].

Как показывает анализ [9], значительная часть кривой спектральной плотности помехи от флуктуационной составляющей модуля скорости V_Σ находится в интервале частот $f_{\text{ф}i} = 0{,}8...1\,\text{Гц}$, вследствие чего модуль V_Σ вектора скорости результирующего воздушного

потока вихревой колонны несущего винта имеет существенное рассеяние, среднеквадратическое значение которого можно оценить величиной $\sigma_{\Delta V_\Sigma} \approx 7{,}5$ км/ч .

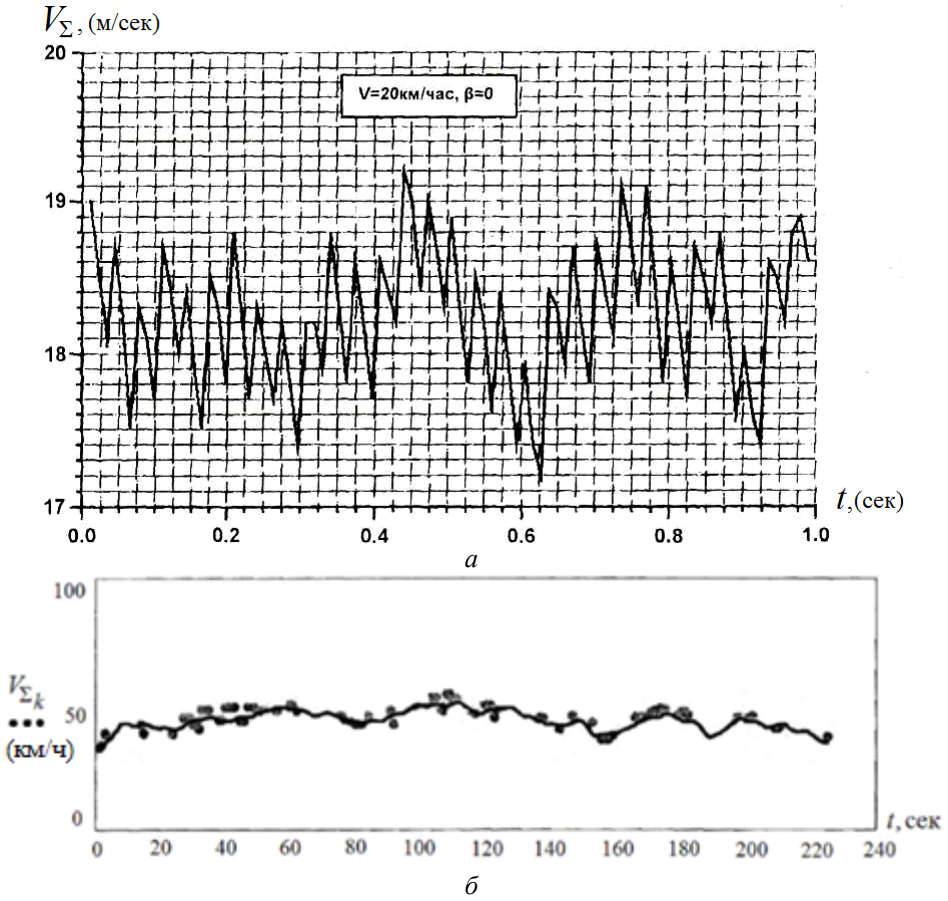


Рисунок 1 – Записи флуктуаций модуля вектора скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемой аэрометрическим приемником системы воздушных сигналов на вертолете Ми–28 до (а) и после фильтрации (б)

Для уменьшения влияний пульсаций вектора скорости V_Σ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, а, следовательно, повышения помехоустойчивости системы контроля параметров окружающей среды на основе информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта в ее каналах целесообразно установить соответствующие фильтры.

На рис. 1,*б* показаны флуктуации модуля V_Σ вектора скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта СВС–В при использовании цифрового фильтра, описываемого разностным уравнением [9]

$$Y_n = \frac{\Delta^2(x_n + 2x_{n-1} + x_{n-2}) + 2(4T - \Delta)Y_{n-1} - (4T^2 - 4\xi T\Delta + \Delta^2)Y_{n-2}}{4T^2 + 4\xi T\Delta + \Delta^2}, \qquad (1)$$

где Δ – интервал дискретизации (шаг счета вычислителя);

x_n, x_{n-1}, x_{n-2} и Y_n, Y_{n-1}, Y_{n-2} – значения входного и выходного сигналов фильтра, соответствующих моментам времени $t_n = n\Delta, t_{n-1} = n\Delta - \Delta, t_{n-2} = n\Delta - 2\Delta$;

начальные условия $x_{n-1} = x_{n-2} = 0;\ Y_{n-1}, Y_{n-2} = 0;\ Y_0 = x_0;\ T = 0{,}5$ с; $\xi = 0{,}7$.

Как видно из рисунка 1,*б* рассеяние модуля V_Σ вектора скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта при использовании рекурсивного фильтра второго порядка существенно уменьшается и определяется среднеквадратическим значением $\sigma_{\Delta V_\Sigma} \approx 3{,}7$ км/ч .

Таким образом, использование фильтрации позволяет существенно ослабить

флуктуационную составляющую $\boldsymbol{V}_{\phi}$ вектора $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта вертолета.

Тогда информативным параметром аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта будет являться отфильтрованный от флуктуационных составляющих вектор скорости $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны в виде геометрической суммы вектора $\boldsymbol{V}$ воздушного потока, формируемого при движении вертолета относительно окружающей среды, и вектора скорости $\boldsymbol{V}_i$ индуктивного воздушного потока, создаваемого несущим винтом вертолета, т.е.

$$\boldsymbol{V}_{\Sigma} = \boldsymbol{V} + \boldsymbol{V}_i = \boldsymbol{V}_i - \boldsymbol{V}_{\text{В}}, \tag{2}$$

где $\boldsymbol{V}_{\text{В}} = -\boldsymbol{V}$ – вектор истинной воздушной скорости вертолета.

Для восприятия информативного параметра аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта предложено [8, 10] использовать неподвижный пространственно–распределенный многофункциональный аэрометрический приемник, конструктивная схема которого приведена на рисунке 2.

Многофункциональный аэрометрический приемник (рисунок 2) содержит неподвижный многоканальный проточный аэрометрический приемник 1, выполненный в виде двух разнесенных по высоте экранирующих дисков 2 и 3, между внутренними профилированными поверхностями которых в азимутальной плоскости под одинаковыми углами расположены трубки полного давления 4 для забора давлений P_i, определяющих величину W и угол направления ψ вектора ветра $\boldsymbol{W}$ в горизонтальной плоскости на стоянке до запуска силовой установки несущего винта.

На внутренних поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены кольцевые каналы 6 для забора дросселированного статического давления $P_{\text{СТ.Д}}$. На внутренних профилированных поверхностях экранирующих дисков 2 и 3 расположены отверстия 5 для забора давлений $P_{\alpha i}$ и $P_{\alpha i-1}$, определяющих угол ветра в вертикальной плоскости.

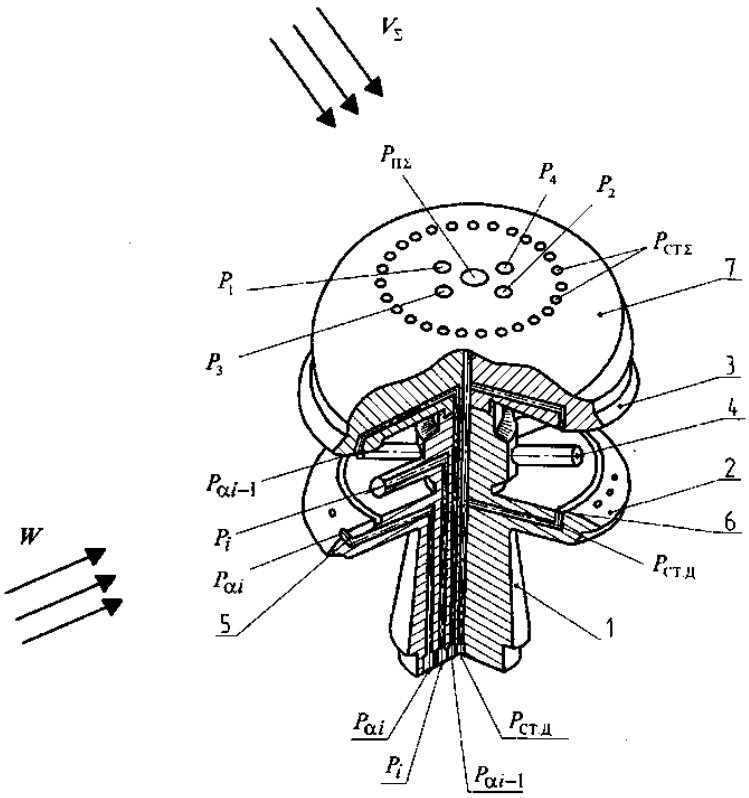


Рисунок 2 – Конструктивная схема неподвижного многофункционального аэрометрического приемника

Для восприятия аэрометрической информации при запуске силовой установки и вращении несущего винта, на режиме руления и маневрирования вертолета по земле (стартовые режимы) и на взлетно–посадочных режимах, когда неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник находится в створе вихревой колонны несущего винта, на наружной поверхности экранирующего диска 3 установлен дополнительный аэрометрический приемник 7 в виде полусферы с диаметром, равным диаметру верхнего экранирующего диска. На поверхности полусферы на оси симметрии расположено отверстие, являющееся приемником полного давления $P_{\text{ПΣ}}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны.

В плоскости, параллельной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{01} к оси симметрии, симметрично расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений P_1 и

P_2. В плоскости, перпендикулярной плоскости симметрии вертолета, под углом φ_{02} к оси симметрии, расположены отверстия, являющиеся приемниками давлений P_3 и P_4. Перпендикулярно оси симметрии сферического приемника на его поверхности, например по окружности расположены отверстия, являющиеся приемниками статического давления $P_{\text{СТ}\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны.

При рулении и маневрировании по земле и на взлетно–посадочных режимах, за меру величин составляющих вектора скорости ветра $\boldsymbol{W}$ и вектора истинной воздушной скорости $\boldsymbol{V}_{\text{в}}$ вертолета принимается угловое положение вектора скорости $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, определяемое углами φ_1 и φ_2, которые регистрируются ортогонально расположенными приемниками давлений P_1 и P_2, P_3 и P_4.

Давления P_1 и P_2, P_3 и P_4, $P_{\text{ПΣ}}$ и $P_{\text{СТ}\Sigma}$, воспринимаемые дополнительным аэрометрическим приемником 3, подключены ко входам пневмоэлектрических преобразователей, выходы которых через последовательно соединенные мультиплексор и аналого–цифровой преобразователь подключены к микропроцессору. На вход микропроцессора также подключены выходы приемника температуры торможения результирующего набегающего воздушного потока вихревой колонны несущего винта и выходы пневмоэлектрических преобразователей давлений P_i, $P_{\alpha i}$, $P_{\alpha i-1}$, $P_{\text{СТ.Д}}$, воспринимаемых неподвижным многоканальным проточным аэрометрическим приемником 1. Выход микропроцессора является выходом бортовой системы по величине W и углу направления ψ или продольной W_x и боковой W_z составляющим вектора скорости ветра $\boldsymbol{W}$, другим параметрам окружающей среды.

На стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта вектор скорости $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта можно представить в виде геометрической суммы вектора скорости ветра $\boldsymbol{W}$ и стационарной составляющей $\boldsymbol{V}_{i0}$ вектора скорости воздушного потока, создаваемого несущим винтом, т.е.

$$\boldsymbol{V}_{\Sigma} = \boldsymbol{W} + \boldsymbol{V}_{i0}; \quad \boldsymbol{W} = \boldsymbol{V}_{\Sigma} - \boldsymbol{V}_{i0}. \tag{3}$$

Для конкретного типа вертолета и места установки неподвижного многофункционального аэрометрического приемника на фюзеляже вертолета составляющие V_{ix}, V_{iy}, V_{iz} вектора $\boldsymbol{V}_{i0}$ скорости индуктивного потока вихревой колонны несущего винта в связанной системе координат можно описать уравнениями вида [8]

$$V_{ix} = K_{ix} V_{i0}; \quad V_{iy} = K_{iy} V_{i0}; \quad V_{iz} = K_{iz} V_{i0}, \tag{4}$$

где $V_{i0} = \sqrt{\dfrac{Gn_y}{2\chi\rho_H F}}$ – модуль вектора $\boldsymbol{V}_{i0}$ скорости индуктивного потока несущего винта на режиме висения;

K_{ix}, K_{iy}, K_{iz} – безразмерные коэффициенты, функционально связанные с параметрами режима полета и определяемые при летных испытаниях данного типа вертолета для конкретного места установки датчика воздушных сигналов;

G – вес вертолета; n_y – нормальная перегрузка $\left(n_y = \dfrac{1}{g}\dfrac{d^2H}{dt^2} - 1 \right)$;

$\rho_н$ – плотность воздуха на данной высоте H;

F – площадь, ометаемая несущим винтом вертолета;

χ – коэффициент заполнения диска несущего винта;

$g = 9{,}80665$ – ускорение свободного падения.

Величину (модуль) вектора скорости $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта можно определить по полному $P_{\text{ПΣ}}$ и статическому $P_{\text{СТ}\Sigma}$ давлениям и температуре $T_{\text{ТΣ}}$ торможения результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта, воспринимаемой приемником температуры торможения, установленного на фюзеляже в зоне действия вихревой колонны несущего винта, используя соотношение [8]:

$$V_{\Sigma} = 44{,}826\sqrt{\frac{T_{T\Sigma}\left[\left(\frac{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}}{P_{CT\Sigma}}+1\right)^{0{,}2857143}-1\right]}{\left(\frac{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}}{P_{CT\Sigma}}+1\right)^{0{,}2857143}}}. \qquad (5)$$

Проекции вектора $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ скорости результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего на оси связанной системы координат определяются как

$$V_{\Sigma x} = V_{\Sigma}\cdot\sin\varphi_1; \quad V_{\Sigma y} = V_{\Sigma}\cdot\cos\varphi_1\cdot\cos\varphi_2; \quad V_{\Sigma z} = V_{\Sigma}\cdot\sin\varphi_2. \qquad (6)$$

где φ_1 и φ_2 – углы, определяющие положение вектора скорости $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего относительно осей полусферического аэрометрического приемника, которые определяются по давлениям P_1, P_2 и P_3, P_4.

Используя соотношения для определения давления на поверхности полусферического аэрометрического приемника, приведенные в работе [11], углы φ_1 и φ_2, определяющие положение вектора скорости $\boldsymbol{V}_{\Sigma}$ результирующего набегающего воздушного потока вихревой колоны несущего винта, будут определяться соотношениями

$$\varphi_1 = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{4}{9\sin 2\varphi_{01}}\frac{P_1-P_2}{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}}\right); \quad \varphi_2 = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{4}{9\sin 2\varphi_{02}}\frac{P_3-P_4}{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}}\right), \qquad (7)$$

где φ_{10} и φ_{20} – углы расположения отверстий для забора давлений P_1, P_2 и P_3, P_4.

Тогда в соответствии с выражениями (4) – (7) продольная W_x, боковая W_z составляющие и модуль (величина) $W_{\text{г}}$ горизонтального ветра $\boldsymbol{W}$ на стоянке при запуске силовой установки и вращении несущего винта будут определяться как:

$$\begin{gathered} W_x = V_{\Sigma}\frac{4}{9\sin 2\varphi_{01}}\frac{P_1-P_2}{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}} - K_{ix}V_{i0}; \quad W_z = V_{\Sigma}\frac{4}{9\sin 2\varphi_{02}}\frac{P_3-P_4}{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}} - K_{iz}V_{i0}; \\ W_{\text{г}} = \sqrt{W_x^2+W_z^2}; \qquad \psi = \operatorname{arctg}\frac{W_z}{W_x}. \end{gathered} \qquad (8)$$

На режиме руления и маневрирования вертолета по земной поверхности в качестве исходного уравнения для определения параметров вектора скорости ветра вместо выражения (4) необходимо использовать соотношение

$$\boldsymbol{V}_{\Sigma} = -\boldsymbol{V}_{\text{в}} + \boldsymbol{V}_{i\text{c}} + \boldsymbol{V}_{\text{р}}, \qquad (9)$$

где $\boldsymbol{V}_{\text{р}}$ – вектор скорости руления и маневрирования вертолета по земной поверхности, продольная $V_{\text{р}x}$ и боковая $V_{\text{р}z}$ составляющие которого можно определить, используя информацию от спутниковой навигационной системы, установленной на вертолете.

Тогда, используя соотношения (4) – (9), выражения для определения продольной W_x и боковой W_z составляющих и величина (модуль) $W_{\text{г}}$ горизонтального ветра $\boldsymbol{W}_{\text{г}}$ при рулении и маневрировании по земной поверхности будут иметь вид

$$\begin{gathered} W_x = V_{\Sigma}\frac{4}{9\sin 2\varphi_{01}}\frac{P_1-P_2}{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}} - K_{ix}V_{i0} - V_{\text{р}x}; \quad W_z = V_{\Sigma}\frac{4}{9\sin 2\varphi_{02}}\frac{P_3-P_4}{P_{\Pi\Sigma}-P_{CT\Sigma}} - K_{iz}V_{i0} - V_{\text{р}z}; \\ W_{\text{г}} = \sqrt{W_x^2+W_z^2}; \qquad \psi = \operatorname{arctg}\frac{W_z}{W_x}. \end{gathered} \qquad (10)$$

На взлетно–посадочных режимах вертолета в качестве исходного уравнения для определения параметров вектора скорости ветра вместо выражения (4) необходимо использовать соотношения вида

$$\boldsymbol{V}_{\Sigma} = -\boldsymbol{V}_{\text{в}} + \boldsymbol{V}_{i\text{c}}; \quad \boldsymbol{V}_{\text{в}} = \boldsymbol{W} + \boldsymbol{V}_{\text{п}}, \qquad (11)$$

где $\boldsymbol{V}_{\text{п}}$ – вектор путевой скорости вертолета, параметры которого определяются доплеровским измерителем скорости и угла сноса (ДИСС);

$\boldsymbol{V}$ – вектор скорости воздушного потока с учетом вектора ветра $\boldsymbol{W}$, набегающего на неподвижный полусферический аэрометрический приемник.

Поскольку неподвижный многофункциональный аэрометрический приемник

расположен на фюзеляже на определенном радиус–векторе $\boldsymbol{R}$ от центра масс вертолета, то при вращении вертолета относительно центра масс имеет место кинематическое искажение вектора скорости $\boldsymbol{V}$ воздушного потока, набегающего на аэрометрический приемник, которое определяется векторным уравнением вида

$$\boldsymbol{V}_{\text{к}} = \boldsymbol{V} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{R}(x,\ y,\ z)\,, \tag{12}$$

где $\boldsymbol{V}_{\text{к}}$ – кинематически искаженный вектор скорости набегающего воздушного потока в месте установки неподвижного многофункционального аэрометрического приемника;

$\boldsymbol{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – вектор угловой скорости вращения вертолета относительно центра масс;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости вращения вертолета относительно осей связанной системы координат;

x, y, z – координаты места установки неподвижного панорамного меточного датчика аэродинамического угла и воздушной скорости с установленным над его системой приемных электродов полусферическим аэрометрическим приемником в связанной системе координат, центр которой находится в центре масс вертолета.

Проекции вектора скорости $\boldsymbol{V}_{\text{к}}$ на оси связанной системы координат будут определяться системой уравнений вида

$$V_{\text{кx}}=V_x+(\omega_y z \square \omega_x y); \qquad V_{\text{ку}}=V_y+(\omega_z x \square \omega_x z); \qquad V_{\text{кz}}=V_z+(\omega_x y \square \omega_y x), \tag{13}$$

где V_x, V_y, V_z – проекции вектора истинной воздушной скорости $\boldsymbol{V}_{\text{в}}$ на оси связанной системы координат.

Продольная и боковая составляющие V_x, V_z и величина (модуль) $\boldsymbol{V}_{\text{в}}$ вектора истинной воздушной скорости $\boldsymbol{V}_{\text{в}}$, углы атаки α и скольжения β вертолета, статическое давление P_H, температура T_H, плотность ρ_H и барометрическая высота H будут определяться соотношениями:

$$V_x = V_\Sigma \sin\left[\frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{4}{9\sin 2\varphi_{01}}\frac{P_1-P_2}{P_{\text{ПΣ}}-P_{\text{СТΣ}}}\right)\right]\times$$

$$\times\cos\left[\frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{4}{9\sin 2\varphi_{02}}\frac{P_3-P_4}{P_{\text{ПΣ}}-P_{\text{СТΣ}}}\right)\right]-K_{ix}V_{i0}-(\omega_y z-\omega_x y);$$

$$V_z = V_\Sigma \sin\left[\frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{4}{9\sin 2\varphi_{02}}\frac{P_3-P_4}{P_{\text{ПΣ}}-P_{\text{СТΣ}}}\right)\right]-K_{iz}V_{i0}-(\omega_x y-\omega_y x);$$

$$V_{\text{в}}=\sqrt{V_x^2+V_y^2+V_z^2}; \qquad \alpha=\operatorname{arctg}\frac{V_y}{V_x}; \qquad \beta=\arsin\frac{V_z}{V_{\text{В}}}; \tag{14}$$

$$P_H = P_{\text{СТΣ}} - K_p\frac{\rho_\Sigma V_\Sigma^2}{2}; \qquad \rho_\Sigma=\frac{P_{\text{СТΣ}}}{287{,}05287\,T_{\text{ТΣ}}}\left(\frac{P_{\text{ПΣ}}-P_{\text{СТΣ}}}{P_{\text{СТΣ}}}+1\right)^{0{,}2857143};$$

$$H=\frac{T_0}{\tau}\left[1-\left(\frac{P_H}{P_0}\right)^{\tau R}\right]; \qquad T_H=T_0+\tau H; \qquad \rho_H=\frac{P_H}{RT_H},$$

где P_0=101325 Па и T_0=288,15 К – абсолютное давление и абсолютная температура воздуха на высоте H = 0 стандартной атмосферы;

R – удельная газовая постоянная воздуха (R = 287,05287 Дж/кг·К);

τ – температурный градиент (τ = 0,0065 К/м);

$K_{\text{р}}$ – безразмерный коэффициент, определяющий связь $P_{\text{СТΣ}}$ и P_H, который определяется при летных испытаниях для конкретного типа вертолета и места установки на фюзеляже многофункционального аэрометрического приемника;

K_{iy} – безразмерный коэффициент, определяемый аналогично K_{ix} и K_{iz}.

Используя информацию о величине $V_{\text{п}}$ и угле сноса $\psi_{\text{с}}$ вектора путевой скорости $\boldsymbol{V}_{\text{п}}$ от доплеровского измерителя скорости и угла сноса и составляющих вектора истинной воздушной скорости $\boldsymbol{V}_{\text{в}}$, продольная W_x, боковая W_z составляющие, величина (модуль) W и

направление ψ горизонтального вектора ветра $\boldsymbol{W}$ на взлетно–посадочных режимах вертолета определяются соотношениями:

$$W_x = |V_x| \square V_{\text{п}} \cos\psi_{\text{с}}; \quad W_z = |V_z| \square V_{\text{п}} \sin\psi_{\text{с}}; \quad \psi = \beta + \psi_{\text{с}}; \quad W_{\text{г}} = \sqrt{W_x^2 + W_z^2}\,. \qquad (15)$$

Широкие возможности по повышению помехоустойчивости к аэродинамическим возмущениям из–за турбулентности атмосферы и неотфильтрованным флуктуациям результирующего воздушного потока вихревой колонны несущего винта открывает комплексирование рассмотренной аэрометрической системы контроля параметров окружающей среды, построенной на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника, и аэромеханической измерительно–вычислительной системы с наблюдателем Люэнбергера, особенности построения и алгоритмы которой приведены в работах [8, 12, 13].

На рисунке 3 приведена структурно–функциональная схема системы контроля параметров окружающей среды на вертолете.

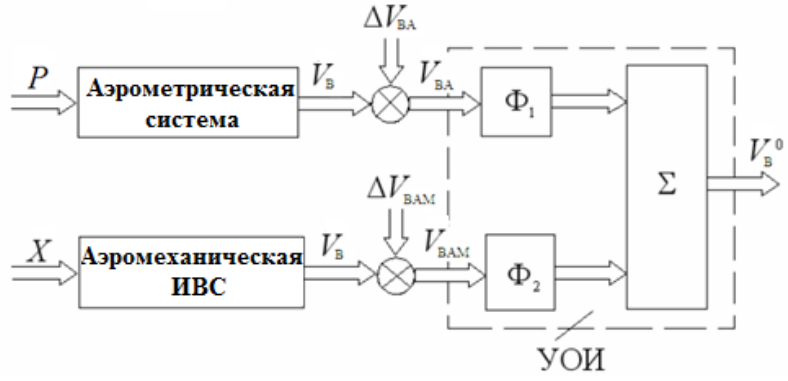


Рисунок 3 – Обобщенная структурно–функциональная схема комплексной системы контроля параметров окружающей среды на вертолете

Вектор $\boldsymbol{P}$ отражает массив входных давлений аэрометрической системы контроля параметров окружающей среды на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника. Вектор $\boldsymbol{V}_{\text{ВА}}$ выходного сигнала аэрометрической системы кроме полезной составляющей $\boldsymbol{V}_{\text{В}}$ содержит в общем случае случайную динамическую погрешность $\Delta\boldsymbol{V}_{\text{ВА}}$.

Вектор $\boldsymbol{X}$ информативных сигналов, отражающих состояние вертолета как динамической аэромеханической системы, используется в аэромеханической измерительно–вычислительной системе (ИВС) для определения составляющих вектора воздушной скорости с учетом вектора ветра $\boldsymbol{W}$ с помощью наблюдателя Люэнбергера. Вектор $\boldsymbol{V}_{\text{ВАМ}}$ выходного сигнала аэромеханической ИВС кроме полезной составляющей $\boldsymbol{V}_{\text{В}}$ включает в себя случайную динамическую погрешность $\Delta\boldsymbol{V}_{\text{ВАМ}}$. Устройство обработки информации (УОИ) алгоритмическим путем реализует фильтрацию выходных сигналов $\Delta\boldsymbol{V}_{\text{ВА}}$ и $\boldsymbol{V}_{\text{ВАМ}}$, их последующее суммирование и формирование выходного сигнала $\boldsymbol{V}_{\text{В}}^0$ комплексной системы. При этом вектор $\boldsymbol{V}_{\text{В}}^0$ является оценкой измеряемого вектора истинной воздушной скорости вертолета $\boldsymbol{V}_{\text{В}}$.

Задачей анализа комплексной системы контроля параметров окружающей среды на вертолете является оценка эффективности комплексирования, т.е. оценки остаточных погрешностей комплексной системы.

Для оценки остаточных погрешностей комплексной системы контроля параметров окружающей среды на вертолете можно считать [14], что в выходных сигналах комплексируемых измерительных каналов присутствуют аддитивно наложенные на полезный сигнал случайные погрешности $\xi_1(t) = \Delta V_{\text{ВА}}$, $\xi_2(t) = \Delta V_{\text{ВАМ}}$. В устройстве обработки информации комплексной системы алгоритмическим путем реализуется фильтрация выходных сигналов $V_{\text{В}i}(t)$ обоих измерительных систем.

Опыт исследования аэрометрических систем измерения высотно–скоростных параметров вертолета показывает [15], что корреляционную функцию случайной погрешности аэрометрического канала контроля параметров окружающей среды можно представить в виде:

$$K_{\xi 1}(\tau) = \sigma_1^2 e^{-a_1|\tau|}\left[\cos b_1\tau + \frac{a_1}{b_1}\sin b_1\tau\right], \tag{16}$$

где σ_1, a_1 и b_1 – параметры, определяющие преобладающий уровень и спектр частот случайной погрешности аэрометрического канала.

Учитывая возможную мультипликативную погрешность измерения составляющих воздушной скорости вертолета аэромеханической системы с наблюдателя Люэнбергера, корреляционную функцию погрешности аэрометрического канала представим в виде:

$$K_{\xi 2}(\tau) = \sigma_2^2 e^{-a_2|\tau|}(1 + a_2|\tau|), \tag{17}$$

где σ_2, a_2 – параметры, определяющие преобладающий уровень аддитивной и мультипликативной составляющих случайной погрешности канала.

Погрешность двухкомпонентной комплексной системы контроля определяется параметрами одного из фильтров, так как структура и параметры другого фильтра определяются из условия инвариантности. Поэтому можно построить схему двухкомпонентной комплексной системы с одним фильтром, например по схеме со следящей системой или по схеме разностного сигнала [16].

Если передаточную функцию аэромеханического канала определения составляющих воздушной скорости принять в виде колебательной модели:

$$W_2(p) = \frac{1}{1 + 2\alpha Tp + T^2p^2}, \tag{18}$$

где α и T – параметры передаточной функции. Тогда передаточная функция $W_\Phi(p)$ корректирующего фильтра будет иметь вид:

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{T^2}\frac{1 + 2\alpha Tp}{p}. \tag{19}$$

Если по корреляционным функциям погрешностей комплексируемых каналов вида (16) и (17) построить спектральные плотности мощности погрешностей компонентов, то получим:

$$S_{\xi 1}(\omega) = \frac{2\sigma_1^2 a_1}{\pi}\frac{a_1^2 + b_1^2}{\left(\omega^2 + a_1^2 - b_1^2\right)^2 + 4a_1^2\omega^2}; \qquad S_{\xi 2}(\omega) = \frac{2\sigma_2^2 a_2}{\pi}\frac{1}{\omega^2 + a_2^2}. \tag{20}$$

Тогда дисперсии составляющих остаточной погрешности комплексной системы контроля параметров окружающей среды на вертолете будут определяться следующими соотношениями [14]:

$$D_1 = \frac{2\sigma_1^2 a_1}{\pi}(a_1^2 + b_1^2)\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\left|1 + 2\alpha Tj\omega\right|^2}{(\omega^2 + a_1^2 - b_1^2)^2 + 4a_1^2\omega^2}\cdot\frac{1}{[1 + 2\alpha Tj\omega + T^2(j\omega)^2]^2}d\omega;$$

$$D_2 = \frac{2\sigma_2^2 a_2}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\left|T^2(j\omega)^2\right|^2}{(\omega^2 + a_2^2)[1 + 2\alpha Tj\omega + T^2(j\omega)^2]^2}d\omega \quad . \tag{21}$$

Если ввести следующие обозначения для верхнего канала фильтрации $d_0 = T^2$; $d_1 = 2T(\alpha + a_1T)$; $d_2 = 1 + (a_1^2 + b_1^2)T^2 + 4\alpha a_1T$; $d_3 = 2[a_1 + \alpha T(a_1^2 + b_1^2)]$; $d_4 = (a_1^2 + b_1^2)$; $g_0 = g_1 = 0$; $g_2 = -4\alpha^2T^2$; $g_3 = 1$ и аналогичные обозначения для нижнего канала фильтрации $d_0 = T^2$; $d_1 = 2T(\alpha + a_2T)$; $d_2 = 1 + a_2^2T + 4\alpha T$; $d_3 = 2[a_2 + \alpha a_2^2T$; $d_4 = a_2^4$; $g_0 = g_2 = g_3 = 0$; $g_1 = T^4$, тогда выражение для определения составляющих дисперсий остаточной погрешности комплексной системы принимает вид:

$$D_i = \frac{d_4d_1g_3 + g_3(d_0d_3 - d_1d_2)}{2d_4(d_0d_3^2 + d_1^2d_4 - d_1d_2d_3)}. \tag{22}$$

Как показали расчеты [14], при независимости случайных погрешностей

комплексируемых каналов дисперсия суммарной остаточной погрешности комплексной системы будет равна $D = D_1 + D_2 = 53{,}4 \cdot 10^{-2}$ (м/с)^2; $\sigma_V = \sqrt{D} = 0{,}73$ м/с $= 2{,}63$ км/ч; предельная погрешность системы $\Delta_{\text{пред}} = \pm 3\sigma = \pm 7{,}79$ км/ч.

Рассмотренные способы повышения помехоустойчивости и точности контроля параметров окружающей среды на вертолете определяют перспективность и области эффективного применения системы на основе информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта и неподвижного многофункционального аэрометрического приемника.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки РФ № 2014/55 (НИР № 990).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми–8 (издание 4–ое). – М.: Авторитет, 1996. – 554с.

2. Ерусалимский, М.А. Экипажам вертолетов – информационную поддержку / М.А. Ерусалимский, В.Н. Егоров // Авиасоюз. – 2011. – № 2. – С. 24–26.

3. Приборы и установки для метеорологических измерений на аэродромах / Под ред. Л.П. Африногенова и Е.В. Романова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 296 с.

4. Азбукин, А.А. Автоматические метеостанции АМК–03 и их модификации / А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, А.А. Кобзов и др. // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 42–52.

5. Алексеев, Н.В. Системы измерения воздушных сигналов нового поколения / Н.В. Алексеев, Е.С. Вождаев, В.Г. Кравцов и др. // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 8. – С. 31–36.

6. Козицин, В.К. Анализ принципов построения систем измерения воздушных сигналов вертолета / В.К. Козицин, Н.Н. Макаров, А.А. Порунов, В.М. Солдаткин // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 10. – С. 2–13.

7. Солдаткин, В.В. Аэрометрическая система измерения малых воздушных скоростей вертолета на основе информации о положении вихревой колонны несущего винта / В.В. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2009. – № 4. – С. 52–56.

8. Солдаткин, В.В. Система воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного аэрометрического приемника и информации аэродинамического поля вихревой колонны несущего винта: Монография / В.В. Солдаткин. – Казань: Изд–во Казан. гос. техн. ун–та, 2012. – 284 с.

9. Семенов, А.В. Повышение точности и помехоустойчивости элементов бортовых систем обеспечения безопасности полета летательных аппаратов: Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / А.В. Семенов. – Ульяновск: Ульяновск. гос. техн. ун–та. – 2008. – 18 с.

10. Никитин, А.В. Бортовая система измерения параметров вектора ветра на стартовых и взлетно–посадочных режимах вертолета / А.В. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. –№ 3. – С. 117–125.

11. Петунин, А.Н. Методы и техника измерения параметров газового потока (Приемники давления и скоростного напора) / А.Н. Петунин. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.

12. Порунов, А.А. Измерительно–вычислительная система определения малых воздушных скоростей вертолета // Мехатроника, автоматизация, управление / А.А. Порунов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 11. – С. 43–51.

13. Солдаткин, В.В. Комплексная система измерения малых воздушных скоростей вертолета с наблюдателем Люэнбергера / В.В. Солдаткин, А.В. Никитин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2. – С. 9–15.

14. Солдаткин, В.В. Анализ комплексной системы измерения малых воздушных скоростей вертолета / В.В. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 52–57.

15. Солдаткин, В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов/ В.М. Солдаткин. – Казань: Изд–во Казан. гос. техн. ун–та, 2001. – 448 с.

16. Иванов, Ю.П. Комплексирование информационно–измерительных устройств летательных аппаратов / Ю.П. Иванов, А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 208 с.

Никитин Александр Владимирович
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ
Кандидат технический наук, старший преподаватель кафедры «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)
Тел. 8–987–220–50–20
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Солдаткин Вячеслав Владимирович
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ
Доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)
Тел. 8–917–289–06–75
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Солдаткин Владимир Михайлович
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева–КАИ
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы и информационно–измерительные системы» (ПИИС)
Тел. 8–987–290–81–48
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

A.V. NIKITIN, V.V. SOLDATKIN, V.M. SOLDATKIN

ENSURING JAM–RESISTANT OF CONTROL SYSTEM OF SURROUNDING AIR ENVIRONMENTS PARAMETERS DURING OPERATION OF THE HELICOPTER

Importance and problem of controlling the speed and direction of wind, other parameters of surrounding air environment during operation of the helicopter are considered. Methods of increase jam–resistant of control system of metrological parameters on the launch and take–off and landing modes of the helicopter are disclosed.

Keywords: *helicopter, operation, environment, state, control, system, space, jam–resistant, launch and take–off and landing modes.*

BIBLIOGRAPHY

1. Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii vertoleta Mi–8 (izdaniye 4–oye). – M.: Avtoritet, 1996. – 554s.
2. Yerusalimskiy, M.A. Ekipazham vertoletov – informatsionnuyu podderzhku / M.A. Yerusalimskiy, V.N. Yegorov // Aviasoyuz. – 2011. – № 2. – S. 24–26.
3. Pribory i ustanovki dlya meteorologicheskikh izmereniy na aerodromakh / Pod red. L.P. Afrinogenova i Ye.V. Romanova. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 296 s.
4. Azbukin, A.A. Avtomaticheskiye meteostantsii AMK–03 i ikh modifikatsii / A.A. Azbukin, A.YA. Bogushevich, A.A. Kobzov i dr. // Datchiki i sistemy. – 2012. – № 3. – S. 42–52.
5. Alekseyev, N.V. Sistemy izmereniya vozdushnykh signalov novogo pokoleniya / N.V. Alekseyev, Ye.S. Vozhdayev, V.G. Kravtsov i dr. // Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. – 2003. – № 8. – S. 31–36.
6. Kozitsin, V.K. Analiz printsipov postroyeniya sistem izmereniya vozdushnykh signalov vertoleta / V.K. Kozitsin, N.N. Makarov, A.A. Porunov, V.M. Soldatkin // Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. – 2003. – № 10. – S. 2–13.
7. Soldatkin, V.V. Aerometricheskaya sistema izmereniya malykh vozdushnykh skorostey vertoleta na osnove informatsii o polozhenii vikhrevoy kolonny nesushchego vinta / V.V. Soldatkin // Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2009. – № 4. – S. 52–56.
8. Soldatkin, V.V. Sistema vozdushnykh signalov vertoleta na osnove nepodvizhnogo aerometricheskogo priyemnika i informatsii aerodinamicheskogo polya vikhrevoy kolonny nesushchego vinta: Monografiya / V.V. Soldatkin. – Kazan: Izd–vo Kazan. gos. tekhn. un–ta, 2012. – 284 s.
9. Semenov, A.V. Povysheniye tochnosti i pomekhoustoychivosti elementov bortovykh sistem obespecheniya bezopasnosti poleta letatelnykh apparatov: Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. kand. tekhn. nauk / A.V. Semenov. – Ulyanovsk: Ulyanovsk. gos. tekhn. un–ta. – 2008. – 18 s.
10. Nikitin, A.V. Bortovaya sistema izmereniya parametrov vektora vetra na startovykh i vzletno–posadochnykh rezhimakh vertoleta / A.V. Nikitin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. –№ 3. – S. 117–125.
11. Petunin, A.N. Metody i tekhnika izmereniya parametrov gazovogo potoka (Priyemniki davleniya i skorostnogo napora) / A.N. Petunin. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 332 s.
12. Porunov, A.A. Izmeritelno–vychislitelnaya sistema opredeleniya malykh vozdushnykh skorostey vertoleta // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye / A.A. Porunov, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Aviakosmicheskoye priborostroyeniye. – 2004. – № 11. – S. 43–51.
13. Soldatkin, V.V. Kompleksnaya sistema izmereniya malykh vozdushnykh skorostey vertoleta s nablyudatelem Lyuenbergera / V.V. Soldatkin, A.V. Nikitin // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 2. – S. 9–15.
14. Soldatkin, V.V. Analiz kompleksnoy sistemy izmereniya malykh vozdushnykh skorostey vertoleta / V.V. Soldatkin // Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2004. – № 3. – S. 52–57.
15. Soldatkin, V.M. Metody i sredstva izmereniya aerodinamicheskikh uglov letatelnykh apparatov/ V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd–vo Kazan. gos. tekhn. un–ta, 2001. – 448 s.
16. Ivanov, YU.P. Kompleksirovaniye informatsionno–izmeritelnykh ustroystv letatelnykh apparatov / YU.P. Ivanov, A.N. Sinyakov, I.V. Filatov. – L.: Mashinostroyeniye, 1974. – 208 s.

Nikitin Aleksandr Vladimirovich
Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev–KAI
Candidate of technical science, master teacher of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: 8–987–220–50–20
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Soldatkin Vladimir Mihailovich
Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev–KAI
Doctor of technical science, professor, head of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: +79872908148
E–mail: nikitin.rf@mail.ru

Soldatkin Viacheslav Vladimirovich
Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI (KNRTU–KAI)
Doctor of technical science, docent, docent of department «Devices and information–measurement systems» (DIMS)
Ph.: +79172890675
E–mail: w–soldatkin@mail.ru

УДК 621.314

И.Н. БАЖЕНОВ, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД МЕТОДОМ ОЦЕНКИ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Представлен анализ средств контроля магнетитовых руд методом измерения магнитной восприимчивости. Предложено портативное устройство оперативного контроля, обеспечивающее повышение чувствительности и точности измерения магнитной восприимчивости среды при снижении влияния неровностей рудосодержащей породы и энергопотребления

Ключевые слова: *измерения, магнитная восприимчивость, магнетитовая руда, резонансный режим, индукционный зонд.*

Анализ существующих средств контроля.

Горно-металлургическое производство представляет собой синтез трех мощных индустриальных производств – горнодобывающего, обогатительного и металлургического, объединённых общей технологической цепью. Горнодобывающая промышленность находится в начале общей технологической цепи производства металлов, поэтому она оказывает непосредственное влияние на последующие звенья этой цепи и на конечные результаты её функционирования. Экономическая эффективность горнодобывающих предприятий определяется полнотой извлечения запасов из недр, а также совершенствованием технических схем рудоподготовки и обогащения минерального сырья [1, 2].

Для оперативной оценки качества магнетитовой руды на стенках горных выработок, а также в навалах, вагонетках и на самосвалах широко применяются магнитные, электрические и электромагнитные методы [3-5], при этом одним из наиболее перспективных на наш взгляд, является метод измерения магнитной восприимчивости [6]. В настоящее время в качестве переносных средств измерения магнитной восприимчивости используются рудничный измеритель магнитного влияния среды РИМВ-3 [7] и прибор магнитного опробования МКС-4В [8].

В основе работы данных устройств лежит метод измерения магнитной восприимчивости $\chi = M/H$, определяемый по отношению намагниченности породы M от воздействия магнитного поля напряженностью H, о значении которой судят по относительному приращению ΔE вторичной ЭДС, индуцируемой в измерительной катушке [5, 6]:

$$\Delta E = E_0 G \chi, \qquad (1)$$

где E_0 – ЭДС, создаваемая в измерительной катушке при отсутствии магнитной среды;

G – коэффициент чувствительности, учитывающий влияние формы поверхности и размеры измерительного зонда, который устанавливается экспериментально;

χ – магнитная восприимчивость контролируемой среды.

Принцип работы данных приборов основан на возбуждении электромагнитного поля в окружающем пространстве и измерении относительного изменения напряженности этого поля в зависимости от магнитных свойств исследуемой среды. Под воздействием электромагнитного поля в измерительной катушке наводится ЭДС, значение которой максимально при расположении зонда с индукционным преобразователем в воздухе и понижается при увеличении магнитной восприимчивости горной породы или руды. Приращение ЭДС измерительной катушки зависит от количественного содержания магнитного компонента в контролируемой среде.

Недостатками данного метода являются сравнительно невысокая точность измерений, обусловленная влияния зазора между корпусом зонда и рудной массой, изменение которого на 18 мм приводит к уменьшению сигнала на 5 % [9]. Кроме того, на точность измерения магнитных свойств влияет методическая погрешность, обусловленная волнообразной зависимостью чувствительности прибора от расстояния между зондом и исследуемой средой (рисунок 1, *а*). Вследствие этого максимальное значение коэффициента формы зонда при фиксированном расстоянии между генераторной и приемной обмотками достигается только при оптимальной высоте зонда над поверхностью исследуемой среды, составляющей [9]. Приближение зонда к контролируемой среде или неровность поверхности среды приводят к снижению чувствительности прибора и, в итоге, к увеличению погрешности измерения магнитной проницаемости.

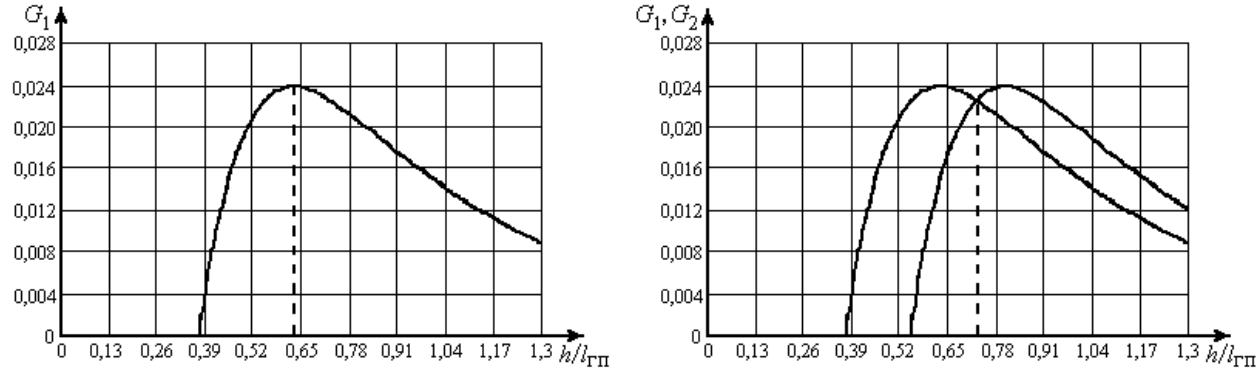


Рисунок 1 – Зависимость геометрического фактора устройства от расстояния до исследуемой среды и размеров зонда

С целью уменьшения влияния расстояния от измерительного зонда до исследуемой среды используют две дополнительные компенсационные катушки, которые размешают на расстояниях и от генераторной катушки [9]. При этом зависимость чувствительности прибора от расстояния между зондом и исследуемой средой принимает вид, представленный на рисунке 1, *б*, и аппроксимируется выражением:

(2)

(3)

где – расстояние от зонда до исследуемой среды;

– расстояние от генераторной до измерительной катушки;

– расстояние от генераторной до первой компенсационной катушки;

– расстояние между генераторной и второй компенсационной катушками.

Применение дополнительных компенсационных обмоток позволяет расширить диапазон измерения и повысить чувствительность прибора в окрестности пересечения графиков и (рисунок 1, *б*). Однако, как и в предыдущем случае, к основным недостаткам данного устройства относятся малая амплитуда сигналов на приемной и компенсационных обмотках, а также уменьшение чувствительности прибора при разных отклонениях зонда от оптимального расстояния до поверхности исследуемой среды.

В частности, при подаче синусоидального напряжения с частотой 1 кГц и амплитудой 50 В на генераторную катушку значение ЭДС на приемной и компенсационных катушках в воздушной среде составляет не более 20,5 мВ, т. е. примерно в 2400 раз меньше при одинаковом числе витков в генераторной и приемной катушках. При этом диапазон измеряемого напряжения не превышает нескольких милливольт, что практически

ограничивает точность контроля магнитной восприимчивости из-за влияния инструментальных погрешностей прибора и воздействия внешних помех. Например, при использовании зонда длиной $l_{\text{гп}} = 40$ см и допустимой погрешности от неровной поверхности среды в ±5 % необходимо размещать зонд на оптимальном расстоянии от поверхности исследуемой среды $h_{\text{опт}} = 25$ см при его допустимом отклонении Δh не более ±10 см.

Таким образом, для повышения чувствительности и точности устройств, предназначенных для оперативного опробования магнетитовых руд, устранения влияния неровностей рудосодержащей породы на достоверность результатов измерений и снижения энергопотребления переносных приборов необходимо совершенствование средств контроля, основанных на методе измерения магнитной восприимчивости окружающей среды.

Средство контроля магнетитовых руд с улучшенными характеристиками.

Для компенсации инструментальных погрешностей и снижения энергопотребления предложено использовать резонансный режим работы зонда. Для получения резонансных колебаний параллельно первой и второй компенсационным и измерительной катушкам, размещенным в одной плоскости перпендикулярно поверхности исследуемой среды, подключаются три конденсатора. При этом компенсация инструментальных погрешностей достигается использованием двух усилительно-преобразовательных и общего вычислительного блока. Кроме того, для ослабления влияния неровностей рудосодержащей породы на точность измерения ее магнитных свойств целесообразно использовать дополнительный ультразвуковой датчик расстояния, подключенный к вычислительному блоку.

Структурная схема устройства, реализующего метод контроля магнитной восприимчивости магнетитовых руд с учетом предложенных мер, приведена на рисунке 2.

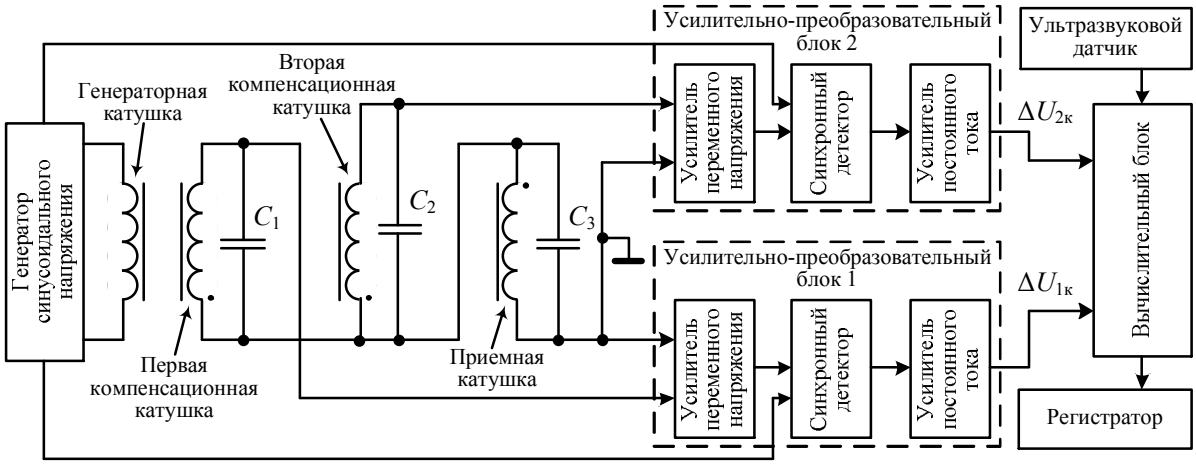


Рисунок 2 – Структурная схема устройства контроля магнитной восприимчивости среды

В составе устройства контроля магнетитовых руд применен генератор гармонического напряжения, нагруженный на генераторную катушку, две компенсационных катушка с конденсаторами C_1, C_2 и приемная катушку с конденсатором C_3. Конструктивно все катушки размещены в зонде на разных расстояниях от генераторной катушки параллельно друг другу в одной плоскости перпендикулярно поверхности исследуемой среды. К обмотке приемной катушки подключены объединенные выводы первой и второй компенсационных катушек, которые включены встречно. Усилительно-преобразовательные блоки выполнены по одинаковой схеме и содержат усилители и синхронные детекторы, на управляющие входы которых подаются управляющие сигналы от генератора. Выходы усилительно-преобразовательных блоков подключены к двум входам вычислительного

блока, на третий вход которого подается сигнал от ультразвукового датчика. Выход вычислительного блока подключен к цифровому регистратору для вывода результатов контроля магнитной восприимчивости исследуемой среды.

Устройство контроля магнетитовых руд работает следующим образом.

При протекании переменного тока от генератора синусоидального напряжения по виткам генераторной катушки в окружающем пространстве создается переменное электромагнитное поле. При отсутствии магнитной среды это поле индуцирует на двух компенсационных катушках равные по амплитуде и противоположные по фазе ЭДС E_1 и E_2.

При размещении зонда с генераторной, двумя компенсационными и приемной катушками над исследуемой средой происходит ее намагничивание переменным электромагнитным полем. Появляющееся вторичное магнитное поле индуцирует в приемной и в компенсационных катушках ЭДС разной амплитуды. В результате этого на входах усилительно-преобразовательных блоков появляются разностные ЭДС ΔE_1 и ΔE_2, которые после усиления и синхронного детектирования преобразуются в постоянные или медленно меняющиеся сигналы. Эти сигналы дополнительно усиливаются и поступают на два входа вычислительного блока, содержащего коммутатор, аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер для получения и обработки результатов измерений в цифровой форме. На третий вход вычислительного блока поступают импульсы от ультразвукового датчика, определяющего расстояние h от зонда до исследуемой среды для коррекции результатов преобразования, которые после обработки полученных данных выводятся на цифровой регистратор для оценки магнитной восприимчивости исследуемой среды.

При размещении зонда над плоской поверхностью исследуемой среды формируются разностные ЭДС $\Delta E_1 = E_0 G_1 \chi$ и $\Delta E_2 = E_0 G_2 \chi$, пропорциональные наводимой ЭДС E_0 и магнитной восприимчивости среды χ. Геометрические факторы зонда G_1 и G_2 зависят от взаимного размещения генераторной, приемной и компенсационных катушек, а также изменяются в зависимости от расстояния h между зондом и исследуемой средой.

Разностные ЭДС ΔE_1, ΔE_2 усиливаются и детектируются двумя усилительно-преобразовательными блоками, имеющими коэффициенты преобразования K_1, K_2 соответственно, поэтому напряжения на двух входах вычислительного блока составляют

$$\begin{aligned} \Delta U_{1к} &= K_1 E_0 G_1 \chi \,, \\ \Delta U_{2к} &= K_2 E_0 G_2 \chi \,. \end{aligned} \qquad (4)$$

Для получения одинаковых максимальных напряжений $\Delta U_{1\max} = \Delta U_{2\max}$ необходимо выполнение условия: $K_1 G_{1\max} = K_2 G_{2\max}$. При равенстве коэффициентов преобразования $K_1 = K_2$ такое условие обеспечивается при одинаковых геометрических факторах зонда $G_{1\max} = G_{2\max}$. Выполнение последнего равенства можно обеспечить уменьшением в 4 раза количества витков в первой компенсационной катушке относительно числа витков во второй компенсационной катушке (при их размещении на расстояниях $0{,}2 l_{\text{гп}}$ и $0{,}8 l_{\text{гп}}$ от генераторной катушки в зонде).

Ультразвуковой датчик в зависимости от расстояния h от зонда до исследуемой среды подает импульсы разной длительности на третий вход вычислительного блока, который автоматически изменяет коэффициенты масштабирования сигналов $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$, поступающих от усилительно-преобразовательных блоков. Кроме того, микроконтроллер выполняет их сравнение и выделяет наибольший из них, по величине которого вычисляется значение магнитной восприимчивости исследуемой среды для ее вывода на регистратор.

В схеме устройства (рисунок 2) две компенсационные катушки с конденсаторами C_1, C_2 и приемная катушка с конденсатором C_3 образуют три колебательных контура. Для повышения чувствительности резонансная частота $f_{\text{р}}$ этих контуров с учетом индуктивностей L_1, L_2 и L_3 компенсационных и приемной катушек и емкостей C_1, C_2 и C_3 конденсаторов должна задаваться равной частоте генератора по условию [10]:

$$f_{\text{р}} = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1} = 1/2\pi\sqrt{L_2C_2} = 1/2\pi\sqrt{L_3C_3}\,, \quad (5)$$

где L_1, L_2 – индуктивности первой и второй компенсационных катушек, Гн;

L_3 – индуктивность приемной катушки, Гн;

C_1, C_2, C_3 – емкости первого, второго и третьего конденсаторов, Ф.

Сопротивление колебательных контуров на частоте резонанса в десятки раз превышает индуктивное сопротивление компенсационных и приемной катушек, что позволяет значительно повысить амплитуду сигналов на этих контурах при изменении магнитной восприимчивости среды и уменьшить инструментальную погрешность преобразования.

Кроме того, увеличение амплитуды сигналов на приемном и компенсационных контурах также позволяет использовать усилители с небольшими коэффициентами усиления и формировать на входах синхронных детекторов напряжения в единицы вольт. Этим уменьшается влияние инструментальных погрешностей синхронных детекторов и температурного дрейфа усилителей постоянного тока на точность преобразования. Одновременно ослабляется относительное влияние внешних наводок и помех и уменьшается случайная погрешность преобразования устройства.

Для оценки эффективности предложенного технического решения было проведено моделирование устройства на ПЭВМ в программе *Electronics Workbench Pro*, в результате которого установлено следующее:

1) при подаче на генераторную катушку синусоидального напряжения с амплитудой $U_1 = 10$ В и частотой $f_1 = 1$ кГц изменение индуктивности одной из компенсационных катушек на 10 % относительно начального значения $L_{\text{нач}} = 0{,}1$ Гн приводит к появлению разностного напряжения $\Delta U_1 \approx 2{,}28$ мВ;

2) при подключении конденсаторов с одинаковой емкостью $C = 200$ нФ параллельно компенсационным катушкам изменение индуктивности одной из них на ±10% изменяет разностное напряжение на $\Delta U_{1\text{к}} \approx 80$ мВ при входных сопротивлениях усилителей переменного тока, составляющих 10 кОм, т. е. амплитуда измеряемого сигнала увеличивается примерно в $K = \Delta U_{1\text{к}}/\Delta U_1 = 80/2{,}28 \approx 35$ раз.

Следовательно, применение резонансных контуров позволяет практически в десятки раз повысить чувствительность устройства к изменению электромагнитного поля.

В экспериментальном образце разработанного устройства линеаризация характеристики преобразования выполнялась при его калибровке в следующем порядке.

Зонд с генераторной, двумя компенсационными и приемной катушками размещался горизонтально на металлическом листе с габаритными размерами $2 \times 1{,}2$ м. Затем зонд постепенно поднимался, и в процессе его подъема через каждый 1 см выполнялось измерение расстояния до листа ультразвуковым датчиком, ширина выходных импульсов которого измерялась микроконтроллером вычислительного блока. Полученный цифровой код расстояния $N_{\text{т}}$ использовался как адрес ячейки оперативного запоминающего устройства, входящего в состав микроконтроллера. При этом аналого-цифровым преобразователем также кодировались выходные напряжения $\Delta U_{1\text{к}}$ и $\Delta U_{2\text{к}}$ усилительно-преобразовательных блоков, выполнялось сравнение полученных кодов ΔN_1 и ΔN_2 микроконтроллером и запись наибольшего из них по адресу $N_{\text{т}}$, определяемому расстоянием от зонда до листа.

После завершения процесса подъема зонда до максимального расстояния от металлического листа выполнялся процесс линеаризации характеристики прибора. При этом микроконтроллером вычислительного блока определялось максимальное значение кода $\Delta N_{\max}$, соответствующее оптимальному расстоянию $h_{\text{опт}}$ до металлического листа, которое принималось за образцовую величину, относительно которой должны корректироваться показания устройства. Затем вычислялись отношения кодов, записанных в ячейки оперативного запоминающего устройства, к максимальному коду и определялись

поправочные коэффициенты $K_k = \Delta N_{\max}/\Delta N_k$. После этого каждое значение ΔN_k, записанное ранее в ячейку оперативной памяти, умножалось на вычисленный для него поправочный коэффициент K_k и переписывалось в ячейку памяти постоянного запоминающего устройства по аналогичному адресу, соответствующему расстоянию зонда до металлического листа, измеренному ультразвуковым датчиком.

В результате выполнения таких операций вычислительный блок формировал значения магнитной восприимчивости, практически не зависящие от изменения расстояния до исследуемой среды. Реально для оценки магнитных свойств различных пород следует учитывать их конкретные параметры, т.е. полученные результаты калибровки умножать на некоторый постоянный коэффициент, который должен определяться экспериментально и затем вводиться в микроконтроллер при окончательной настройке прибора.

Применение ультразвукового датчика с таким алгоритмом обработки сигналов в микроконтроллере позволяет ослабить влияние расстояния между зондом и поверхностью среды на результаты контроля и линеаризовать характеристику преобразования прибора. Экспериментально установлено, что применение ультразвуковой коррекции позволяет использовать прибор при измерении магнитной восприимчивости среды с погрешностью менее 1,5 % в расширенном диапазоне $h/l_{\text{гп}} = 0{,}4 \ldots 1{,}5$, который примерно в 1,5 раза превышает диапазон измерения аналогичных устройств магнитных параметров среды.

Таким образом, применение ультразвукового датчика и резонансного режима работы зонда позволяет повысить чувствительность и точность автономных средств оперативного контроля магнетитовых руд за счет автоматической обработки сигналов с учетом расстояния между зондом и исследуемой средой, а также повысить помехоустойчивость за счет получения большой амплитуды сигналов при относительно низком энергопотреблении.

В экспериментальном образце устройства применен ультразвуковой датчик типа *HC-SR*04 [11] с диапазоном измерения 2 – 400 см и разрешением 3 мм, катушки индуктивности, имеющие по 1000 витков провода ∅0,3 мм, конденсаторы по 2 мкФ и вычислительный блок на микроконтроллере *TMP*90*C*840*P* с выводом данных на ПЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожиев, Х.Х. Рудничные системы управления качеством минерального сырья / Х.Х. Кожиев, Г.Г. Ломоносов. – М.; Изд-во МГТУ, 2005 – 294 с.

2. Ломоносов, Г.Г. Повышение качества продукции отечественного горнорудного производства как основа повышения ее конкурентоспособности / Г.Г. Ломоносов // Горный журнал. – 2004. – № 10.

3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн. 1: А.И. Евлампиев, Е.Д. Попов, С.Г. Сажин, Л.Д. Муравьева С.А. Добротин, А.В. Половинкин, Ю.А. Кондратьев. Контроль герметичности. Кн 2: Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, Ю.Я. Останин Вихретоковый контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.

4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль.Кн. 2: К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужицкий. Электрический контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с.

5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: В.В. Клюев, В.Ф. Мужицкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. Кн. 2: В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль. Кн. 3: В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.

6. Запорожец, В.М. Геофизические методы исследования скважин. Справочник геофизика / В.М. Запорожец. - М.: Недра, 1983. – 591 с.

7. Госреестр средств измерений № 13420–92. Аппаратура РИМВ-3.

8. Прибор магнитного опробования МКС-4В. Продукция ООО «Уралрудоавтоматика». – Режим доступа: http://uralrudoavtomatika.ru/. – Загл. с экрана.

9. Пат. 2006888 Российская Федерация, МПК G01V3/165, G01V3/18. Устройство для опробования магнетитовых руд / Кудрявцев Ю.П., Микляев Ю.В.; заявитель и патентообладатель Кудрявцев Ю.П., Микляев Ю.В. - № 5042909/25; заявл. 28.04.1992; опубл. 30.01.1994, Бюл. № 1. – 3 с.

10. Изюмов, Н.М. Основы радиотехники / Н.М. Изюмов, Д.П. Линде. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
11. Документация на *HC-SR*04. – Режим доступа: http://arduino-kit.ru/catalog/id/ultrazvukovoy-datchik-hc-sr04. Arduino Library For Ultrasonic Ranging Module *HC-SR*04. – Загл. с экрана.

Баженов Иван Николаевич
Академия ФСО России, г. Орел.
Преподаватель
E-mail: bazhen-orel77@mail.ru

Подмастерьев Константин Валентинович
Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева.
заведующий кафедрой приборостроения, метрологии
и сертификации д.т.н., профессор
E-mail: asms-orel@mail.ru

I.N. BAZHENOV, K.V. PODMASTERYEV

MAGNETITE ORE CONTROLS BY MAGNETIC SUSCEPTIBILITY EVALUATION

The analysis of magnetite ore controls by magnetic susceptibility measurements. Proposed portable operational control, providing increased sensitivity and accuracy of magnetic susceptibility measurement while reducing the influence of breed irregularities containing ore and power consumption.

Keywords: *measurements, magnetic susceptibility, magnetite ore, resonant mode, the induction probe.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kozhiyev, KH.KH. Rudnichnyye sistemy upravleniya kachestvom mineralnogo syrya / KH.KH. Kozhiyev, G.G. Lomonosov. – M.; Izd-vo MGTU, 2005 – 294 s.
2. Lomonosov, G.G. Povysheniye kachestva produktsii otechestvennogo gornorudnogo proizvodstva kak osnova povysheniya yeye konkurentosposobnosti / G.G. Lomonosov // Gornyy zhurnal. – 2004. – № 10.
3. Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik: V 8 t. / Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T. 2: V 2 kn. Kn. 1: A.I. Yevlampiyev, Ye.D. Popov, S.G. Sazhin, L.D. Muravyeva S.A. Dobrotin, A.V. Polovinkin, YU.A. Kondratyev. Kontrol germetichnosti. Kn 2: YU.K. Fedosenko, V.G. Gerasimov, A.D. Pokrovskiy, YU.YA. Ostanin Vikhretokovyy kontrol. – 2-ye izd., ispr. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – 688 s.
4. Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik: V 8 t. / Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T. 5: V 2 kn. Kn. 1: V.P. Vavilov. Teplovoy kontrol.Kn. 2: K.V. Podmasteryev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Nogacheva, Ye.V. Pakholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhitskiy. Elektricheskiy kontrol. – 2-ye izd., ispr. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – 679 s.
5. Nerazrushayushchiy kontrol: Spravochnik: V 8 t. / Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. T. 6: V 3 kn. Kn. 1: V.V. Klyuyev, V.F. Muzhitskiy, E.S. Gorkunov, V.Ye. Shcherbinin. Magnitnyye metody kontrolya. Kn. 2: V.N. Filinov, A.A. Ketkovich, M.V. Filinov. Opticheskiy kontrol. Kn. 3: V.I. Matveyev. Radiovolnovoy kontrol. – 2-ye izd., ispr. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – 832 s.
6. Zaporozhets, V.M. Geofizicheskiye metody issledovaniya skvazhin. Spravochnik geofizika / V.M. Zaporozhets. - M.: Nedra, 1983. – 591 s.
7. Gosreyestr sredstv izmereniy № 13420–92. Apparatura RIMV-3.
8. Pribor magnitnogo oprobovaniya MKS-4V. Produktsiya OOO «Uralrudoavtomatika». – Rezhim dostupa: http://uralrudoavtomatika.ru/. – Zagl. s ekrana.
9. Pat. 2006888 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01V3/165, G01V3/18. Ustroystvo dlya oprobovaniya magnetitovykh rud / Kudryavtsev YU.P., Miklyayev YU.V.; zayavitel i patentoobladatel Kudryavtsev YU.P., Miklyayev YU.V. - № 5042909/25; zayavl. 28.04.1992; opubl. 30.01.1994, Byul. № 1. – 3 s.
10. Izyumov, N.M. Osnovy radiotekhniki / N.M. Izyumov, D.P. Linde. – M.: Radio i svyaz, 1983. – 376 s.
11. Dokumentatsiya na HC SR04. – Rezhim dostupa: http://arduino-kit.ru/catalog/id/ultrazvukovoy-datchik-hc-sr04. Arduino Library For Ultrasonic Ranging Module HC-SR04. – Zagl. s ekrana.

Bazhenov Ivan Nikolayevich
The Academy of the Federal security service of Russia,
Orel
Teacher
E-mail: bazhen-orel77@mail.ru

Podmasteryev Konstantin Valentinovich
Orel State University name I.S. Turgenev
Head of the Department Instrumentation, Metrology and Certification
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: asms-orel@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

• Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

• Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

• Водном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.

• Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0.Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

• Структура статьи:

УДК;
Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;
Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;
Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;
Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;
Текст статьи;
Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.
Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:
Фамилия, имя, отчество;
учреждение или организация;
ученая степень, ученое звание, должность;
адрес;
телефон;
электронная почта.

• Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке *ЗА СТАТЬЕЙ***.

• Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «**( )**». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

• Рисунки – черно–белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подрисуночные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

• Рисунки с подрисуночной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте **www.gu–unpk.ru**.

Плата за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес учредителя:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно–научно–производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42–00–24
Факс (4862) 41–66–84
www.gu–unpk.ru
E–mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет – учебно–научно–производственный комплекс»
302020. г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 54–15–19, 55–55–24, +7(906)6639898, 41–98–48, 41–98–03

www.gu–unpk.ru
E–mail: tiostu@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 14.03.2016 г.
Дата выхода в свет 18.04.2016 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,56.

Тираж 600 экз. Цена договорная.
Заказ 106/16п2

Отпечатано с готового оригинал–макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.