

Юбилейный выпуск

Машиностроительный

техникум

90

лет



НИИ ЛегМаш

50

лет



Технологический

институт

5

лет



**Редакционный совет**

- Голенков В.А. д-р техн. наук,  
 проф., председатель  
 Радченко С.Ю. д-р техн. наук,  
 проф., зам. председателя  
 Вороненков М.И. канд. техн. наук, доц.  
 Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.  
 Иванов 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.  
 Погова Л.В. д-р экон. наук, проф.  
 Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

**Редакция**

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

**Заместители главного редактора**

- Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.  
 Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.  
 Поддистерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

**Члены редколлегии**

- Бабичев А.И. д-р техн. наук, проф.  
 Давыдов С.И. д-р техн. наук, проф.  
 Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф.,  
 член-кор. РАН  
 Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.  
 Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.  
 Зубанчиков В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.  
 Ивьялов Б.Р. д-р техн. наук, проф.  
 Колесников К.С. д-р техн. наук,  
 проф., академик РАН  
 Кошлов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.  
 Коридорф С.Ф. д-р техн. наук, проф.  
 Машинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.  
 Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.  
 Осалчий В.Я. д-р техн. наук, проф.  
 Панин В.Е. д-р техн. наук, проф.,  
 академик РАН  
 Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.  
 Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

**Ответственный за выпуск**

Морозова А.В.

**Адрес редколлегии**

302020, г. Орел, Науторское шоссе, 29  
 (4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
 41-98-03

www.ostu.ru

E-mail: met\_lii@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе  
 по надзору в сфере связи и массо-  
 вых коммуникаций. Свидетельство:  
 ПИ № ФС77-35719  
 от 24 марта 2009 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу «Пресса  
 России»

© Орел ТУ, 2010

## Содержание

### Машиностроительные технологии и инструменты

|   |    |
|---|----|
| Амбросимов С.К., Козлов А.М., Амбросимов К.С. Исследование параметров срезаемых слоев металла при ДРП с косоугольным резанием .....   | 7  |
| Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Максимов Д.В., Прокопец Г.А., Медведев М.В., Смирнов В.М., Шельпатская Е.А. Исследование и технологическое применение ударноволновых процессов при упрочняющей обработке силовых деталей высокотехнологичных изделий ..... | 15 |
| Коптев А.И., Кузовкин А.В. Силовые и тепловые факторы при формообразовании мелко-модульных зубчатых колес .....   | 21 |
| Киричек А.В., Морин В.В. Волновое нагружение деформирующе-режущих протяжек .....  | 27 |
| Маслов А.В. Критерии оценки локализующих свойств растворов электролитов .....   | 28 |
| Никитенко А. В., Давыдов В. М. Автоматизация выбора параметров инструмента при обработке формообразующих поверхностей мелкогабаритной модельной оснастки .....  | 32 |
| Сопельцев А.В. Теплофизика процесса обдирочного шлифования .....  | 36 |
| Шолев А.Н. Технологическое обеспечение оптимальной продольной формы рабочей поверхности кулачков .....  | 39 |

### Конструирование, расчеты и материалы

|   |    |
|---|----|
| Васин А.Н., Бочкарев П.Ю., Бочкарев А.П. Три задачи, решаемые при производстве полых тел сферической формы .....                                    | 46 |
| Гордиенко А.И., Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л. Электромеханика нанесения ферропорошковых покрытий в пульсирующем электромагнитном поле .....             | 49 |
| Плешаков В.В., Албагачиев Д.А., Юрлов О.В. Повышение усталостной прочности деталей машин .....  | 55 |
| Тырс В.Р., Косаревский С.В. Экспериментальная оценка метода численной компенсации при сканировании резьбы на координатно-измерительной машине ..... | 60 |

### Моделирование технологических процессов

|  |    |
|--|----|
| Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струнного потока свободных абразивных частиц ..... | 65 |
| Галаган П.В. Системный подход к использованию информационных технологий в процессах напыления упрочняющих покрытий .....   | 71 |
| Герасимов С.А., Майоров С.В., Стручков А.А. Математическая модель упругодеформерной со-<br>вмещенной осевой опоры .....  | 75 |
| Гусев В. Г., Швагирев П. С., Жигалов Р. В. Моделирование съема металла при плоском торцо-<br>вом шлифовании в условиях изменяющейся жесткости шпиндельного узла .....                      | 80 |

### Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

|  |     |
|--|-----|
| Абрамов А.В., Родичева М.В., Родичева П.А. Исследование динамики влагосодержания швей-<br>ных материалов .....   | 88  |
| Гущина Т.В. Экологическая безопасность производства сельхозпродукции .....   | 91  |
| Емельянов К.А., Сотников Ю.К., Тимаков А.С. Устройство автоматического пеноподавления<br>при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме ..... | 98  |
| Родичева М.В., Абрамов А.В., Родичева П.А. Разработка методики контактного измерения<br>средневозвешенной температуры кожи .....                             | 103 |

### Приборостроение и биотехнические системы

|  |     |
|--|-----|
| Иванов Ю. Б., Санников Д. П. Прибор фотоэлектрического контроля с компенсацией неста-<br>бильности источника светового излучения .....           | 107 |
| Лисичкин В.Г. Повышение фазовой чувствительности приборов вихретокового контроля .....   | 112 |
| Поляков Р.Н., Герасимов С.А. Повышение рабочих характеристик подшипников скольжения<br>за счет применения наноструктурированных материалов ..... | 119 |

## Editorial council

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
president  
**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president  
**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof.  
**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.  
**Ivanova T.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Popova L.V.** Doc. Sc. Ec., Prof.  
**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editorial Committee

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

## Editor-in-chief Assistants

**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Podmasteryev K.V.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof

## Member of editorial board

**Babichev A.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Vdovin S.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Dmitriev A.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Corresponding Member of RAS  
**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Zubarev Y.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Subchaninov V.G.** Doc. Sc. Ph-Math, Prof.  
**Ivanov B.R.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolesnikov K.S.** Doc. Sc. Tech.,  
Prof., Academician of RAS  
**Korndorf S.F.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Malinin V.G.** Doc. Sc. Ph-Math, Prof.  
**Mulyukin O.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Osadchy V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Panin V.E.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Academician of RAS  
**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Smolnzen V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Responsible for edition

**Morozova A.V.**

## Address

302020 Orel,  
Naugorskoye Chaussee, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21  
www.osu.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Department for Mass Communication. The certificate of registration ПИ № ФС77-35719 from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi» 29504

© OSTU, 2010

## Contents

### Machine building technology and toolware

|  |    |
|--|----|
| <i>Ambrosimov S.A., Kozlov A.M., Ambrosimov K.S.</i> Research of parameters cut of layers of metal and at DCS with oblique-angled cutting .....  | 7  |
| <i>Babichev A.P., Motrenko P.D., Maximov D.V., Medvedev M.B., Smirnov V.N., Scelpackaya E.A., Koval N.S.</i> Research and technological application shock wave of processes at strengthening processing power details of HI-tech products..... | 15 |
| <i>Koptev A.I., Kuzovkin A.V.</i> Power and thermal factors at formation of the form the fine module cogwheels .....   | 21 |
| <i>Kirichek A.V., Morin V.V.</i> Wave loading of deforming-cutting pulling broaches.....   | 27 |
| <i>Maslov A.V.</i> Criterion for comparative estimation of localising properties of electrolyte solutions.....   | 28 |
| <i>Nikitenko A. V., Davydov V.M.</i> Automation of the choice of parameters of the tool at processing form-building surfaces fine size of modelling equipment .....  | 32 |
| <i>Sopeltsev A.V.</i> Thermophysics roughing grinding process .....  | 36 |
| <i>Shoeev A. N.</i> Technological maintenance of the optimum longitudinal form of a working surface of cams .....  | 39 |

### Construction, calculation, material

|  |    |
|--|----|
| <i>Vasin A.N., Bochkarev P.YU., Bochkarev A.P.</i> Three problems. solved at production flap tel spherical.....  | 46 |
| <i>Gordienko A.I., Heifetz M.L., Gretckiy N.L.</i> Electromechanics of drawing ferro-powder of coverings in the pulsing electromagnetic field .....                    | 49 |
| <i>Pleshakov V.V., Albagachiev D.A., Yurlov O.V.</i> Improving fatigue strength of machinery .....   | 55 |
| <i>Tyrs V.R., Kosarevskiy S.V.</i> Experimental estimation of the method of numerical indemnification at scanning the groove by the coordinate measuring machine ..... | 60 |

### Process modeling

|   |    |
|---|----|
| <i>Stepanov J.U.S., Badsukov G.V., Mikheyev A.V.</i> Modelling of destruction multilayered barrier with a gas backlash under action supersonic jet stream free abrasive particles ..... | 65 |
| <i>Galagan P.V.</i> The system approach to use of information technologies in processes spraying strengthening coverings .....  | 71 |
| <i>Gerasimov S.A., Majorov S.V., Struchkov A.A.</i> Mathematical model elastic-deformation of the combined axial support .....  | 75 |
| <i>Gusev V.G., Shvagirev P.S., Gugalov R.V.</i> Modelling of remove of metal at flat face grinding in conditions of changing rigidity spindle of unit .....                             | 80 |

### Machine, apparatus, technology light and food industry

|   |     |
|---|-----|
| <i>Abramov A.V., Rodicheva M.V., Rodicheva P.A.</i> Research of dynamics containing a moisture sewing materials .....   | 88  |
| <i>Guchshina T.V.</i> Ecology safety's production farm agribusiness products .....  | 91  |
| <i>Emelyanov K.A., Sotnikov YU.K., Timakov A.S.</i> Apparatus of foam automatic depression at evaporation of watery agricultural raw material in vacuum ..... | 98  |
| <i>Rodicheva M.V., Abramov A.V., Rodicheva P.A.</i> Development of the technique of contact measurement of the average temperature of the skin .....          | 103 |

### Instrument making and biotechnological system

|  |     |
|--|-----|
| <i>Ivanov J.B., Sannikov D.P.</i> The device of the photo-electric control over indemnification of instability of the source of light radiation .....    | 107 |
| <i>Lisichkin V.G.</i> Increase of phase sensitivity of the vortical current control devices .....  | 112 |
| <i>Polyakov R.N., Gerasimov S.A.</i> Increase of performance data of bearings of sliding due to application nano-structured subsurface of materials..... | 119 |

# **ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ**

**Технологический институт ОрелГТУ**

**УИПКЦ «НИИЛегмаш»**

**Политехнический колледж ОрелГТУ**

Технологический институт ОрелГТУ является по сути старейшим на Орловщине образовательным учреждением, занимающимся подготовкой специалистов технического профиля. Свою историю он ведет с 1920 года, когда в Орле впервые были созданы курсы чертежников. В своей нынешней форме институт существует с 2005 года, когда на базе двух факультетов ОрелГТУ и Политехнического колледжа был создан Технологический институт ОрелГТУ. В 2007 году в структуре Технологического института ОрелГТУ был создан Научно-исследовательский институт «Технологии машиностроения», объединивший десять научно-технических центров, проблемных научно-исследовательских лабораторий, учебное проектно-конструкторское бюро и учебно-исследовательский проектно-конструкторский центр «НИИЛегмаш», который в этом году отметил свое пятидесятилетие.

Основной задачей Технологического института ОрелГТУ является подготовка специалистов для машиностроительного комплекса страны по системе непрерывного практикоориентированного профессионального образования. Сегодня в Технологическом институте ОрелГТУ обучается около двух тысяч студентов, получающих начальное профессиональное, среднее профессиональное и высшее профессиональное образование, ведется подготовка по нескольким направлениям магистратуры, аспирантуры и докторантуры в области наиболее

актуальных проблем современного машиностроения, работает докторский диссертационный совет.

В состав Технологического института ОрелГТУ входят три факультета, десять кафедр (в том числе и две старейшие кафедры университета - кафедра «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика» и кафедра «Автоматизированные станочные и инструментальные системы», которые входят в десятку лучших в университете, за все время своего существования ими было подготовлено свыше 5 тысяч специалистов), Научно-исследовательский институт «Технологии машиностроения», десять исследовательских центров и специализированных лабораторий, экспериментальное производство, а также учебно-производственные мастерские. Активно внедряемая в деятельность Технологического института Система менеджмента качества позволяет объективно оценивать результаты работы коллектива и оперативно реагировать на возникающие проблемы.

Одним из ведущих направлений инновационного развития Технологического института ОрелГТУ является информатизация и компьютеризация учебного процесса. Ватманы, линейки и карандаши уступили свое место компьютерам и прикладным программам, обеспечивающим автоматизацию конструкторско-технологической подготовки производства. Каждый десятый дипломный проект признается государственной аттестационной комиссией годным для реального производства, а каждый четвертый студент ВПО выполняет дипломный проект с элементами научно-исследовательской работы.

Самое серьезное внимание в Технологическом институте ОрелГТУ уделяется научно-исследовательской работе и инновационной деятельности в различных ее формах: выполнению работ по грантам и хозяйственным договорам; подготовке кадров высшей квалификации через аспирантуру и докторантуру ОрелГТУ; сотрудничеству как с российскими, так и с зарубежными научно-исследовательскими институтами, техническими вузами и инновационными центрами, патентно-лицензионной работе, проведению и участию в научных конференциях и выставках различного уровня, научно-исследовательской рабо-

те студентов, выпуску монографий и другой научной печатной продукции. В настоящее время Технологическим институтом ОрелГТУ заключено более 40 договоров о стратегическом партнерстве с российскими и зарубежными промышленными предприятиями, вузами и инновационными центрами. Научная деятельность оказывает положительное влияние на качество подготовки специалистов и является свидетельством плодотворной работы коллективов кафедр. Только за последние четыре года коллектив кафедр Технологического института издал более 40 монографий, учебных пособий и справочников в области технологии машиностроения и металлообработки, а также получил более 220 патентов на изобретения, а объем выполненных каждым преподавателем, имеющим ученые степени или ученые звания, НИР превысили в 2009 году 100 тыс.руб.

У Технологического института ОрелГТУ давние и прочные связи с ведущими техническими вузами и научными школами Москвы, Тулы, Брянска, Ростова, Курска и многих других городов. Ежегодно проводится международная научно-техническая конференция. Неоднократно такие конференции проводились совместно с вузами и производственными фирмами других стран – в Швеции, Турции, Финляндии, Египте, Израиле, Китае. Стала уже традиционной и студенческая региональная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительных производств», на которой студенты докладывают о наиболее интересных своих научных разработках.

Одним из приоритетных направлений развития образовательного пространства Технологического института ОрелГТУ является выявление студентов, склонных к изобретательской и исследовательской деятельности, и вовлечение их в техническое творчество уже на ранних этапах обучения. Результатом решения такой стратегической задачи является не только массовое участие, но и победы студентов в таких конкурсах и олимпиадах как Всероссийская выставка-конкурс научно-технического творчества молодежи, Программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса – У.М.Н.И.К.», Всероссийский конкурс «Национальное достояние России», Молодежный инновационный

конвент «Зворыкинская премия», Всероссийский конкурс научно-исследовательских и творческих работ студентов «Меня оценят в XXI веке», Всероссийский конкурс научно-исследовательских и творческих работ «ЮНЭКО», Всероссийская конференция «Юность. Наука. Культура», Всероссийский научно-технический конкурс «Молодежь и наука XXI века» и другие.

Технологический институт ОрелГТУ по-своему уникален, так как в нем реализован полный комплекс как учебной, так и научной подготовки кадров высшей квалификации. Преподавательский состав Технологического института ОрелГТУ представляет собой дружный коллектив единомышленников, которые сами являются ищущими творческими специалистами.

Аспиранты института практически ежегодно становятся именными стипендиатами Губернатора, Правительства и Президента. Ежегодно сотрудниками института защищаются кандидатские и докторские диссертации. Высокая активность Технологического института ОрелГТУ в научной сфере и является залогом того, что знания, которые получают студенты – самые передовые, и могут с успехом применяться ими в дальнейшем.

*Редакционный Совет и редакционная коллегия журнала «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» поздравляет коллектив Технологического института ОрелГТУ, который динамично развивается и активно реагирует на вызовы времени, сохраняя при этом верность классической традиции подготовки специалистов, имеющих не только определенную совокупность профессиональных знаний, но и активную жизненную позицию, позволяющую выпускникам быть конкурентоспособными на современном рынке труда и занимать достойное место в жизни.*

# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.919.2

С.К. АМБРОСИМОВ, А.М. КОЗЛОВ, К.С. АМБРОСИМОВ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕЗАЕМЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА ПРИ ДРП С КОСОУГОЛЬНЫМ РЕЗАНИЕМ**

*В статье представлен метод исследования параметров срезаемых слоев металла при ДРП с косоугольным резанием. В ней помощью алгебры-логики (R-функций) описаны формы срезаемых слоев металла, определены их размеры и веса и подтверждены экспериментально.*

*Ключевые слова:* деформирующе-режущее протягивание, косоугольное резание, форма срезаемого слоя.

*The article method of research parameter cutting layers of metal deforming-oblique cutting broaching process, is presented. In this one with aid Boolean-algebra (R-function) is described cutting layers forms of metal, determined its sizes and weights and confirmed by experimental research.*

*Key words:* deforming- cutting broaching process, oblique cutting, cutting layers forms.

Для окончательной обработки отверстий деформирующе-режущим протягиванием разработан метод ДРП с косоугольным резанием, который применяется после чернового растачивания или сверления. Этот метод позволяет уменьшить отклонение профиля продольного сечения в 2...2,5 раза и снизить шероховатость от  $R_z 80$  до  $R_z 20[1]$  при натягах 0,4...0,6 мм с удельной осевой силой приходящейся на один погонный мм от 800 до 1200 Н/мм. При обработке длинных отверстий больших диаметров усилие возрастаеткратно увеличению диаметра, например, при обработке отверстия вала наматывателя полосы проката диаметром 200 мм длиной сила протягивания (прошивания) составит 480...720 кН/мм. Протяжные станки с такими усилиями протягивания (например модели 7545) дороги и нерентабельны в условиях серийного производства. Высокого эффекта можно достигнуть при использовании существующего оборудования, например расточного станка модели РТ296100. Однако максимальная сила подачи для этого станка составляет 50 кН, что требует значительного снижения натяга на деформирующе-режущий элемент и, соответственно, исходной шероховатости. Подобные исследования с минимальными натягами, обеспечивающими минимальные величины сечений срезаемых слоев с одновременным механическим упрочением поверхности при минимальной исходной шероховатости от  $R_a 6,3$  до  $R_a 3,2$  в диапазоне натягов от 0,03 мм до 0,10 мм не проводились. Поэтому важной задачей является построение модели для исследования формы и размеров срезаемых слоев металла в зависимости от натяга и диаметра деформирующего элемента, что позволяет прогнозировать припуск на деформирующе-режущее протягивание и энергосиловые затраты.

Конструкция протяжки [1], содержащая цельные деформирующе-режущие элементы 1 (рис. 1), смонтированные на оправке 2. На рабочей поверхности деформирующе-режущих элементов выполнены канавки 3, ширина  $b$  которых (рис. 1, 2) равна ширине образованных выступов 4. Канавки выполнены под углом  $\gamma_1$  к оси протяжки в плоскости поперечного сечения деформирующе-режущего элемента, причем угол  $\gamma_1$  выполнен положительным с левой стороны переднего торца каждого элемента при правом расположении канавок и, наоборот, положительным с правой стороны переднего торца элемента при левом расположении канавок. Кроме того, канавки выполнены под углом  $\lambda$  (рис. 1, рис. 3) к оси протяжки так, чтобы точка  $A$ , определяющая начало образования выступов на обрабатываемой поверхности рас-

полагалась от начала цилиндрической ленточки на расстоянии  $l$  по оси протяжки, величина которого определяется по формуле:

$$l = \frac{b \cdot \cos(\arctg(\sin \lambda \cdot \operatorname{tg} \alpha))}{\sin \lambda \cdot \cos \gamma} \quad (1)$$

где угол  $\gamma$  (рис. 3) определяется в сечении, нормальном к боковой поверхности канавки, а величина его равна статическому переднему углу режущей кромки, которая образуется при пересечении заборного конуса, выполненного под углом  $\alpha$  к оси элемента, цилиндрической ленточки и обратного конуса с левой боковой поверхности канавки при правом их расположении. Таким образом, точка  $A$  определяет начало режущей кромки на заборном конусе, а расстояние от точки  $A$  до начала цилиндрической ленточки – длину рабочего участка режущей кромки на заборном конусе. Задний торец деформирующе-режущего элемента выполняют на расстоянии не меньше, чем  $l$  (рис. 3) по оси протяжки от точки  $E$ , определяющей начало цилиндрической ленточки. Каждый предыдущий деформирующе-режущий элемент располагается на оправке таким образом, чтобы точка  $B$ , располагающаяся на пересечении правой боковой поверхности (от переднего торца элемента), заборного конуса и плоскости поперечного сечения, проходящей через точку  $A$ , определяющую начало образования выступов, то есть начало рабочего участка режущей кромки на заборном конусе, в осевом направлении совпадала с точкой  $A_1$  последующего деформирующего элемента. Протяжка работает следующим образом. Во время рабочего хода первый элемент входит в отверстие заборной частью в точке  $A$  (рис. 3) и начинает пластически увеличивать диаметр отверстия в зоне выступов деформирующе-режущего элемента и в меньшей степени в зоне канавок, за счет чего на поверхности отверстия образуются выступы, испытывающие окружные растягивающие напряжения. Но поскольку левая боковая поверхность канавки при правом их расположении на элементе встает на пути движения образующегося на поверхности отверстия выступа последний начинает срезаться. При этом резание осуществляется в зоне растяжения, что способствует снижению сил резания, так как предварительное растяжение способствует накоплению степени разрушения в срезаемом слое, а также увеличивает показатель напряженного состояния в зоне резания.

Процесс срезания стружки начинается в точке  $A$ , то есть в зоне образования выступа на обрабатываемой поверхности, и по мере продвижения деформирующе-режущего элемента ширина стружки увеличивается. При вхождении точки  $B$  в зону обработки ширина стружки равна длине отрезка главной режущей кромки  $AE$ , определяемой по формуле :

$$AE = \frac{l}{\cos \alpha \cdot \cos \lambda} \quad (2)$$

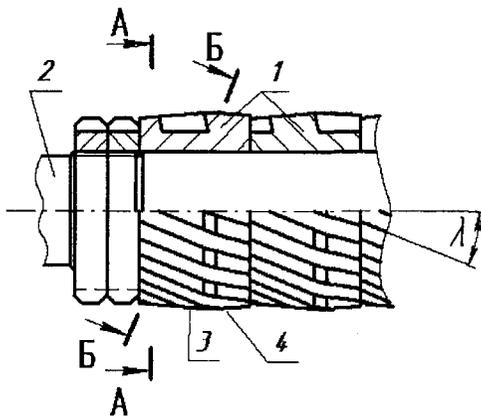


Рисунок 1 - Деформирующе-режущая протяжка с косоугольным резанием

где  $\alpha$  – угол заборного конуса деформирующе-режущего элемента. При этом увеличивается и толщина срезаемого слоя  $a$ , максимальная величина  $a_{MAX}$  которого равна максимальной высоте  $h$  образующихся выступов.

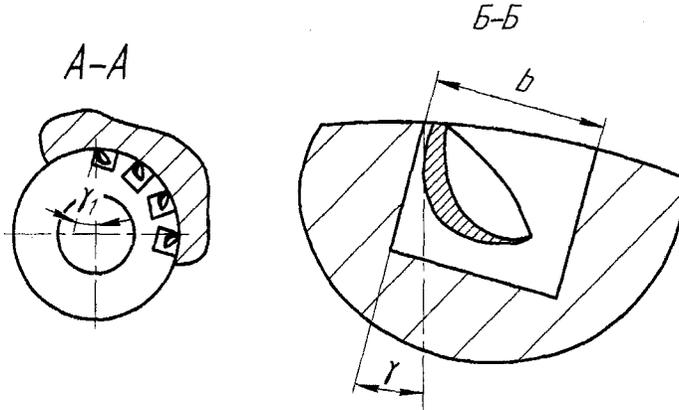


Рисунок 2 - Поперечные сечения протяжки

При дальнейшем движении протяжки материальная точка  $C$  заготовки должна войти в зону обработки последней в точке  $D$  режущей кромки, пройдя путь, равный  $2l$ . При этом материальная точка  $C$  испытает максимальную степень деформации, так как она пройдет максимальный отрезок  $CF$  по заборному конусу элемента, то есть в этих точках высота образованного выступа будет равна нулю. Таким образом, в точке  $D$  режущей кромки процесс резания происходить не будет, поэтому ширина стружки, продолжая увеличиваться, достигнет величины  $AD$ , а толщина стружки будет уменьшаться до нуля.

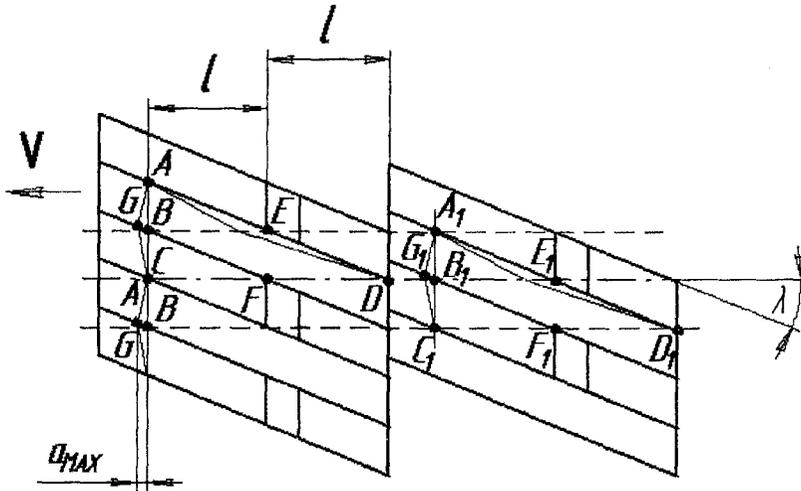


Рисунок 3 - Развертка рабочей поверхности деформирующе-режущего элемента

То есть при перемещении деформирующе-режущего элемента на величину  $2l$  процесс стабилизируется, ширина стружки будет равна  $2l$  до выхода элемента из отверстия. При выходе из отверстия ширина стружки будет изменяться в обратном порядке, уменьшаясь до нуля. Соответственно, сила резания и деформирования при входе элемента в зону резания и выходе из нее будет изменяться не скачкообразно, а постепенно, что значительно снижает вибрации и, как следствие, волнистость обработанной поверхности. Выполнение канавок под углом  $\lambda$  к вектору главного движения значительно снижает силы резания, так как увеличивается кинематический передний угол  $\gamma_K$ , определяемый по формуле (3), а

процесс резания становится косоугольным. Максимальная толщина  $BG=a_{MAX}$  находится в средней части срезаемого слоя.

$$\gamma_k = \text{arctg} \frac{\text{tgy}}{\sin \lambda}, \tag{3}$$

При угловом смещении предыдущего элемента относительно следующего за счет совмещения по оси точки  $B$  предыдущего элемента с точкой  $A_1$  следующего, достигается равномерное удаление припуска по окружности отверстия. Максимальная толщина срезаемого следующим элементом слоя  $B_1G_1$  совпадает с точками  $A$  и  $C$ , в которых материал не срезается предыдущим элементом. Кроме того, равномерное срезание слоев металла по окружности обеспечивается только при четном количестве деформирующе-режущих элементов. При чистовом протягивании с небольшими припусками возможно использование одного элемента.

Таким образом, эффективно увеличивается диаметр отверстия за счет пластической деформации, а также обеспечивается срезание механически упрочненного поверхностного слоя, что приводит к повышению качества обработанной поверхности.

Для исследования формы срезаемого слоя последний рассматривается в системе координат [2]  $XOY$  (рис. 4).

При выполнении условия (4) форма срезаемого слоя представляет собой фигуру (рис. 5) ограниченную линиями  $f_1, f_2, f_4, f_5$ .

$$2f \geq b / (\cos \gamma \cdot \sin \omega) \tag{4}$$

Площадь срезаемого слоя в этом случае вычисляется по формуле :

$$S_2 = S(f_1) + S(f_2) - S(f_4)_2 - S(f_5), \tag{5}$$

Площадь срезаемого слоя  $S_P$  (рис.) определяется по выражению:

$$S_P = S \cdot \sin \omega, \tag{6}$$

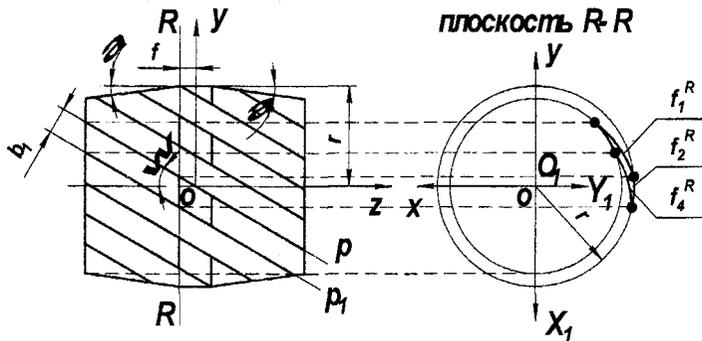


Рисунок 4 - Расположение деформирующе-режущего элемента в системе координат  $OXYZ$

$S = S_2$  при выполнении деформирующе-режущих элементов с параметрами по условию (4).

Функция  $f_1$ :

$$S(f_1) = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_{K3}}{a_{K3}} \cdot \left[ -(t + q_{K3}) \cdot \sqrt{a_{K3}^2 - (t + q_{K3})^2} + (w_1 + q_{K3}) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{a_{K3}^2 - (w_1 + q_{K3})^2} - a_{K3}^2 \cdot \left( \arcsin \frac{t + q_{K3}}{a_{K3}} - \arcsin \frac{w_1 + q_{K3}}{a_{K3}} \right) \right] \tag{7}$$

Функция  $f_2$ :

$$S(f_2) = \frac{b_H}{a_H} \cdot \left( t \cdot \sqrt{a_H^2 - t^2} + a_H^2 \cdot \arcsin \frac{t}{a_H} \right) \quad (8)$$

Функция  $f_4$ :

$$S(f_4) = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_{KO}}{a_{KO}} \cdot \left[ (w_2 + q_{KO}) \cdot \sqrt{a_{KO}^2 - (w_2 + q_{KO})^2} - (t + q_{KO}) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{a_{KO}^2 - (t + q_{KO})^2} + a_{KO}^2 \cdot \left( \arcsin \frac{w_2 + q_{KO}}{a_{KO}} - \arcsin \frac{t + q_{KO}}{a_{KO}} \right) \right] \quad (9)$$

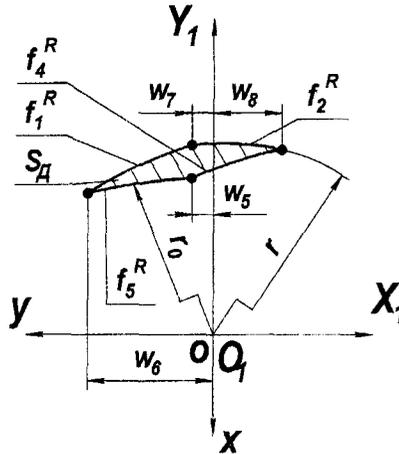


Рисунок 5 - Форма срезаемого слоя

Функция  $f_5$ :

$$S(f_5) = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_o}{a_o} \cdot \left[ w_1 \cdot \sqrt{a_o^2 - w_1^2} - w_3 \cdot \sqrt{a_o^2 - w_3^2} + a_o^2 \times \right. \\ \left. \times \left( \arcsin \frac{w_1}{a_o} - \arcsin \frac{w_3}{a_o} \right) \right] \quad (10)$$

При выполнении условия (4)  $w_4 = t/2$

$$f = b / (\cos \gamma \cdot \sin \omega) \quad (11)$$

Далее автор [2] исследует формы срезаемых слоев с использованием интегрирования по функциям 7 – 10. Однако такой способ достаточно трудоемок. Значительно проще для расчетов срезаемых слоев использовать алгебрологические функции В.П.Рвачева (рис. 5). При этом замена функций эллипсов окружностями, диаметр которых равен диаметру деформирующе-режущего элемента, как показали сравнительные исследования, упрощает расчеты при незначительном снижении точности.

Форму срезаемого слоя (рис.6), ограниченного окружностями  $f_1, f_2, f_4, f_5$  можно описать с помощью R-функций:

$$F_L = (f_2 \wedge f_5) \vee (f_1 \wedge f_4), \quad (12)$$

где  $f_2 \leq 0; f_5 \geq 0; f_1 \leq 0; f_4 \geq 0$

Это означает следующую запись, например для при диаметре ДРП 30 мм:

$$f_2 = 225 - x^2 - y^2 \leq 0; \quad (13)$$

$$f_5 = x^2 + (y - h)^2 - 225 \geq 0 \quad (14)$$

где  $h$  – высота образованных выступов при прохождении деформирующе-режущего элемента определена экспериментально:

$$h = 508,32 \cdot i^{0,81} \cdot (D/d)^{1,14} \cdot (HB)^{-1,55} \quad (15)$$

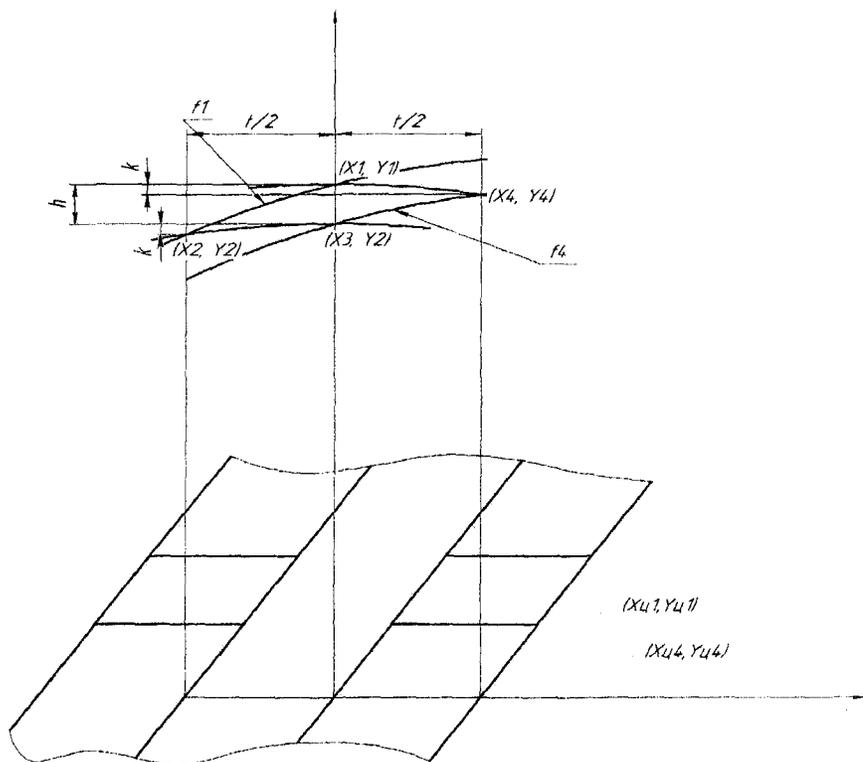


Рисунок 6 - Схема определения функций  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и параметров срезаемых слоев металла

Для описания функций  $f_1, f_4$  определяются координаты центров окружностей

$$Y_{y1} = \frac{8x_2^2 R - 4f(R - y_2) \pm \sqrt{[8x_2^2 R - 4f(R - y_2)]^2 - 16[x_2^2 + (R - y_2)^2] f}}{2[x_2^2 + (R - y_2)^2]}, \quad (16)$$

$$X_{x1} = \sqrt{2RY_{y1} - Y_{y1}^2}, \quad (17)$$

где  $R$  – радиус деформирующе-режущего элемента,

$x_2 = -t/2$

$t$  – шаг расположения зубьев (рис. 6)

$$y^2 = h + k, \quad (18)$$

$$k = R - \sqrt{R^2 - (t/2)^2} \quad (19)$$

$$f = x_2^2 + y_2^2 - R^2 \quad (20)$$

$$f_1 = 225 - (X - X_{y1})^2 - (Y - Y_{y1})^2 \quad (21)$$

$$X_{y4} = X_{y1} + h \cdot \sin \arctg \frac{X_y}{Y_y} \quad (22)$$

$$Y_{y4} = Y_{y1} + h \cdot \cos \arctg \frac{X_y}{Y_y} \quad (23)$$

$$f_4 = (X - X_{y4})^2 + (Y - Y_{y4})^2 - 225 \quad (24)$$

Однако расчет параметров срезаемых слоев металла по предложенной схеме имеет недостатки, т. к. не учитывается натяг, при котором теоретическая толщина срезаемого слоя  $h_m$  составляет такую величину, при которой резание не происходит (рис. 7). Т.е. площадь поперечного сечения срезаемого слоя  $S$  меньше на величину  $S_m$  закрашенного участка ABCD, которая определяется по упрощенной формуле:

$$S_m = S \frac{h_m^2}{h^2} \quad (25).$$

Минимальная теоретическая толщина срезаемого слоя, при которой процесс резания при ДРП не осуществляется при обработке среднеуглеродистых сталей установлена экспериментально и составляет 0,010...0,013 мм. На рис. 9 приведены параметры срезаемых слоев, рассчитанные теоретически, а также массы слоев по предложенной  $M_T$ , уточненной  $M_{Ty}$  методикам и полученные экспериментально.

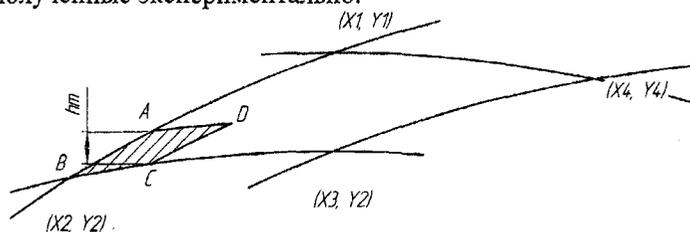


Рисунок 7 - Площадь срезаемых слоев при ДРП с косоугольным резанием с учетом минимальной толщины срезаемого слоя

#### Выводы:

Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что параметры срезаемых слоев, влияют на увеличение диаметра отверстия. Рассчитанные теоретически массы соответствуют массам срезанных стружек, погрешность вычислений составляет не более 12%. Установлено что при натягах на элемент 0,010...0,012 мм срезание металла не наблюдается при радиальной жесткости втулок из среднеуглеродистых сталей в диапазоне от 1,3...1,6. Таким образом, при чистовой обработке рекомендуется назначать натяги от 0,15 до 0,05 мм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пат. №2237552 (РФ). МПК 7 В 23 Д 43/02. Деформирующе-режущая протяжка/ С.К. Амбросимов, О.Н. Крюков. – Бюл., 2004. №28
- 2 Крюков О.Н. Повышение эффективности деформирующе-режущего протягивания за счет косоугольного резания в зоне деформирования Дис. ... к.т.н. – Орел.: ОрелГТУ, 2004 – 210 с.

**Амбросимов Сергей Константинович**

Липецкий государственный технический университет

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (4742) 74-39-36

**Козлов Александр Михайлович**

Липецкий государственный технический университет

Доктор технических наук, профессор тел.(4742) 32-81-85,

E-mail: kam-48@yandex.ru

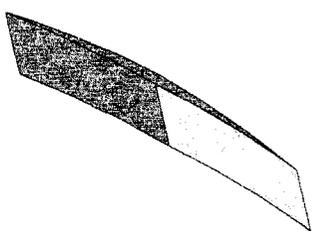
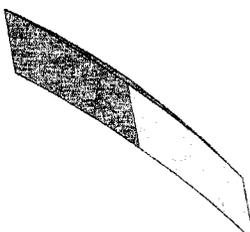
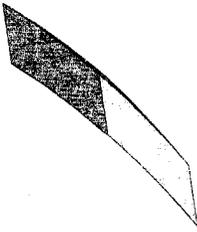
|  |   |   |   |   |   |                     |
|--|---|---|---|---|---|---------------------|
| Объем,<br>масса теоретическая<br>уточненная, натяг,<br>площадь сечения,<br>высота выступа,<br>масса стружки. |  |  |  |  |  | резание отсутствует |
|  | 14,688  | 10,584  | 9,396   | 2,268   | 0,045   |                     |
| $V, \text{мм}^3$   | 0,114;  | 0,084;  | 0,073   | 0,017;  | 0,00035;  |                     |
| $M_p, \text{г}$  | 0,114   | 0,083   | 0,073   | 0,012   | —   |                     |
| $M_{py}, \text{г}$   | 0,5   | 0,34  | 0,29  | 0,05  | 0,01  |                     |
| $L, \text{мм}$   | 0,408   | 0,294   | 0,261   | 0,063   | 0,00125   |                     |
| $S, \text{мм}^2$   | 0,136   | 0,098   | 0,087   | 0,021   | 0,005   |                     |
| $H, \text{мм}$   | 0,115   | 0,088   | 0,082   | 0,012   |   |                     |
| $M, \text{г}$  |   |   |   |   |   |                     |

Рисунок 8 - Формы срезаемых слоев при ДРП с косозубным резанием

Амбросимов Константин Сергеевич  
Липецкий государственный технический университет  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (4742) 74-39-36, E-mail: avadro@mail.ru

УДК 621.9

А.П. БАБИЧЕВ, П.Д. МОТРЕНКО, Д.В. МАКСИМОВ, М.В. МЕДВЕДЕВ,  
В.Н. СМИРНОВ, Е.А. ШЕЛЬПАЦКАЯ, Н.С. КОВАЛЬ

### ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УДАРНОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ СИЛОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*В статье предложены новые технологические схемы виброударной обработки деталей машин и авиакосмической техники. В качестве объекта исследований рассматривались крупногабаритные и длинномерные силовые детали сложной формы преимущественно изделий авиационной техники. На основе анализа конструктивно-технологических особенностей деталей нетрадиционных форм и размеров предложена классификация деталей класса крупногабаритных и длинномерных сложной формы, послужившая основанием для разработки новых технологических схем виброударной обработки. Предложенные технологические схемы прошли экспериментальную проверку с использованием имитационных моделей и опытных образцов.*

**Ключевые слова:** авиакосмическая техника, вибрация, классификация деталей

*Large-dimensional and long complex strength members aerospace in particular, were considered as the study objects. Based on design and manufacturing characteristics of parts with irregular form and dimension, the large and long complex parts were classified, new process flowsheets for vibroimpulsive processing being developed. These process flowsheets were experimentally checked using simulators and experimental patterns.*

**Key words:** aerospace technics, vibration, classification of details

В конструкции летательных аппаратов, энергосиловых установках, некоторых видов наземного транспорта и др. входят детали нетрадиционной формы и размеров. Многие из них выполняют весьма ответственную роль в конструкциях соответствующих изделий, работают в условиях высоких нагрузок, в том числе знакопеременных, требуют весьма тщательной всесторонней отделочно-зачистной и упрочняющей обработки.

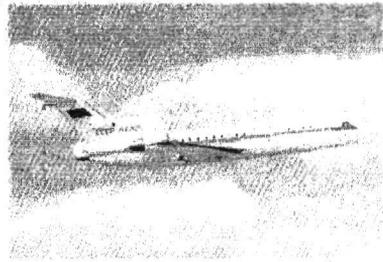
В качестве объекта исследований рассматриваются крупногабаритные и длинномерные силовые детали сложной формы преимущественно изделий авиационной техники, а также некоторых энергосиловых установок и транспортных средств – лонжероны лопастей вертолетов, панели крыла и фюзеляжа, элементы силовых шпангоутов и силовых нервюр, детали шасси широкофюзеляжных самолетов и большегрузных вертолетов, детали тяговой передачи электровозов, коленчатые валы большегрузных автомобилей и тракторов, лопадки турбин двигателей, детали компрессоров и др. Некоторые примеры изделий и деталей представлены на рисунке 1.

Указанные детали в зависимости от типа изделия и его назначения имеют отличающиеся конструктивные формы, изготавливаются из различных материалов (преимущественно конструкционные легированные стали и алюминиевые сплавы). Общей отличительной их особенностью являются большие размеры (например, длина до 10 – 15 м), сложная форма сечения, изменяющаяся по длине детали; как правило – это полые изделия со строго ограниченной толщиной стенок (до 6 – 8 мм) или тонкостенные ребристые детали сложной формы.

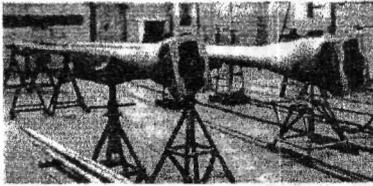
*Вертолет Ми 26Т*



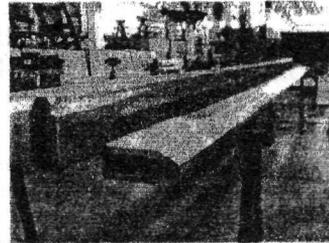
*Самолет Як-42*



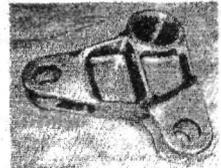
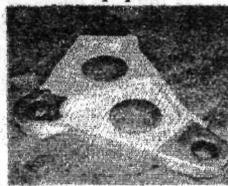
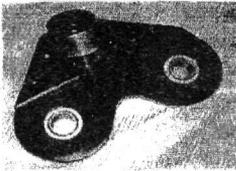
*Лонжерон лопасти вертолета  
(стальной)*



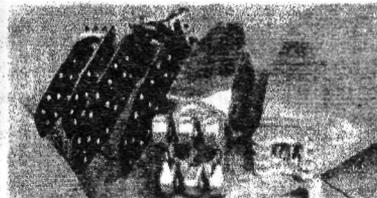
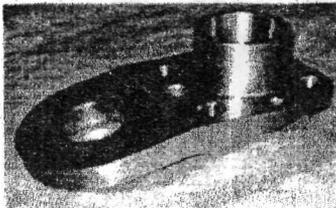
*Лонжерон лопасти вертолета  
(дюралевый)*



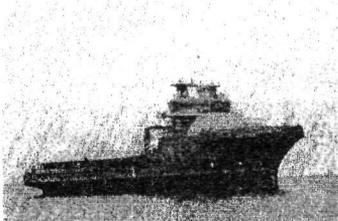
*Силовые детали сложной формы*



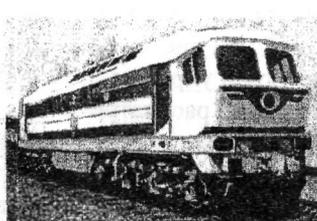
*Силовые детали сложной формы*



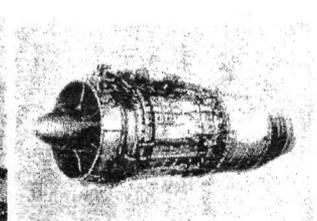
*Речные и морские суда*



*Электро-тепловоз*



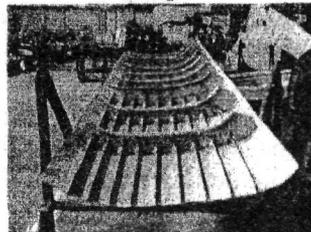
*Реактивный двигатель*



*Ветроэнергосиловые установки*



*Панель фюзеляжа*



*Рисунок 1 – Примеры изделий и деталей*

К качеству поверхности предъявляются весьма высокие требования, обусловленные тяжелыми условиями эксплуатации – высокий уровень знакопеременных нагрузок, колебания температурного градиента, коррозионные и эрозионные процессы.

В связи с этим шероховатость наружной поверхности должна соответствовать  $Ra = 6-8$  классам (1,25 – 0,4 мкм), внутренней поверхности:  $Ra = 6-7$  классам (2,0 – 1,25 мкм). Для некоторых деталей оговаривается направление следов обработки. Поверхностный слой наружной и внутренней поверхности подвергается упрочняющей обработке ППД.

Для рассматриваемых типов деталей отличающихся сложной формой и большими размерами наиболее применяемыми являются динамические методы ППД, среди которых наиболее эффективными являются методы виброударной обработки с использованием многоконтактных инструментов и сред. Их преимуществом являются:

- высокая производительность;
- возможность обработки поверхности практически любой кривизны;
- широкий диапазон изменений параметров виброударного воздействия и достигаемых параметров качества поверхности.

Вместе с тем анализ состояния исследуемой проблемы показал, что несмотря на имеющиеся разработки в области технологических методов упрочняющей обработки и, в частности, методов ППД, их высокую эффективность в повышении качества и эксплуатационных свойств деталей, масштабы практического применения относительно не высокие. Многообразие конструктивных форм деталей и условий их эксплуатации, рост требований к качеству ставят новые задачи для изыскания путей повышения эксплуатационных свойств рассматриваемого класса крупногабаритных и длинномерных деталей, комплексной разработки и обоснования новых технологических схем, оборудования и инструмента для виброударной обработки.

На основе анализа конструктивно-технологических особенностей деталей нетрадиционных форм и размеров предложена классификация деталей класса крупногабаритных и длинномерных сложной формы, послужившая основанием для разработки новых технологических схем виброударной обработки. С учетом кинематики и динамических параметров процесса рассматриваемый класс деталей подразделяется на три группы (рисунок 2).

I – я группа: плоские детали сложной формы с размерами до 250-300 мм;

II – я группа: крупногабаритные детали пространственной (объемной) ориентации сложной формы;

III – я группа: длинномерные детали сложной формы.

На основе предложенной классификации деталей и схем виброударного воздействия разработаны новые технологические схемы виброударной обработки деталей 3-х классификационных групп (рисунок 2).

Для деталей I – й группы разработана технологическая схема “адресной” (раздельной) обработки (рисунок 3);

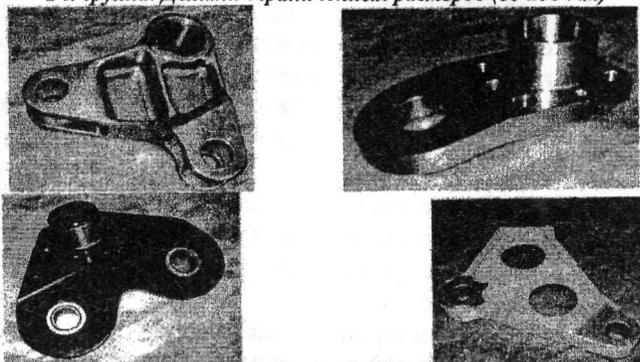
Для деталей II – й группы разработана технологическая схема “поэлементной” обработки (рисунок 4);

Для деталей III – й группы разработана многовариантная технологическая схема виброударной обработки деталей практически неограниченной длины. В рамках III – й группы разработана оригинальная транспортно-обрабатывающая технологическая схема (ТОТС) обработки длинномерных деталей (рисунок 5).

Разработанные технологические схемы имеют следующие принципиальные особенности:

- “адресная” обработка осуществляется путем введения в конструкцию рабочей камеры вибрационного станка регулируемых разделительных устройств. Последние обеспечивают многокамерную и многодетальную обработку, повышение ее интенсивности и равномерное виброударное воздействие на все участки поверхности обрабатываемой детали;

1-я группа. Детали ограниченных размеров (до 250 мм)



2-я группа. Крупногабаритные корпусные объемные детали (до 1000 мм)



3-я группа. Длинномерные детали (до 15000 мм)

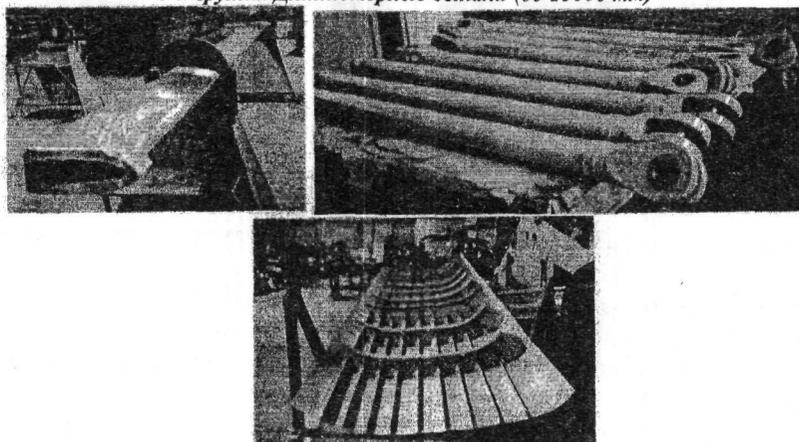


Рисунок 2 – Классификация деталей сложной конфигурации, подвергаемых виброударной упрочняющей обработке

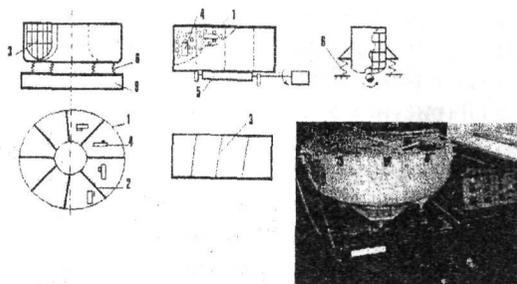


Рисунок 3 – Адресная обработка деталей

1-рабочая камера; 2-разделительное устройство; 3-перегородка;  
4-обрабатываемые детали; 5-вибратор; 6-пружины; 7-приводной барабан;  
8-тормозная колодка; 9-основание.

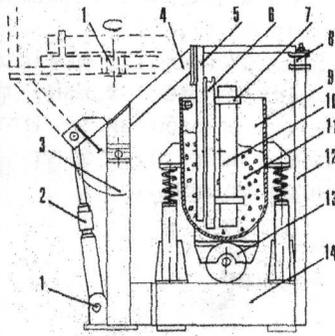
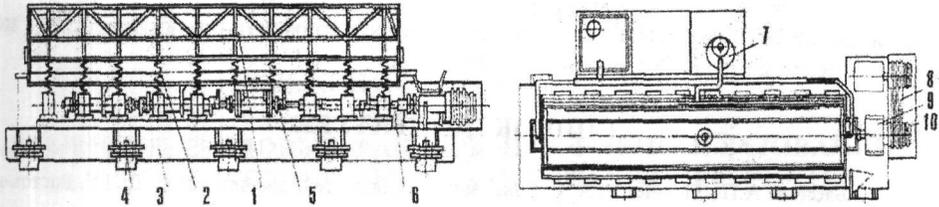


Рисунок 4 – Поэлементная обработка деталей

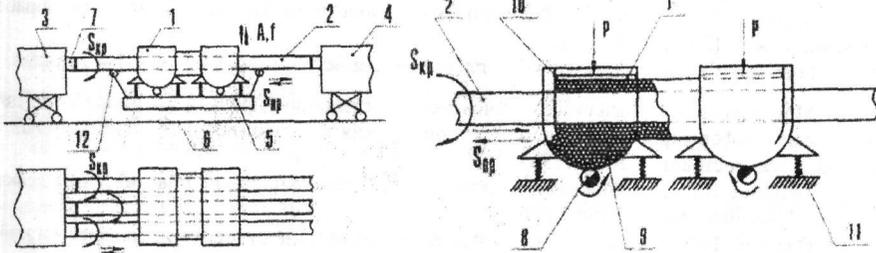
1-шарнир; 2-гидроцилиндр; 3-стойка; 4-перекладина; 5-неподвижная рама; 6-подвижная рама; 7-прихват; 8-зажим; 9-рабочая камера; 10-деталь; 11-рабочая среда; 12-опора; 13-вибратор; 14-станина.

Обработка длинномерных деталей ограниченной длины до 2000 мм

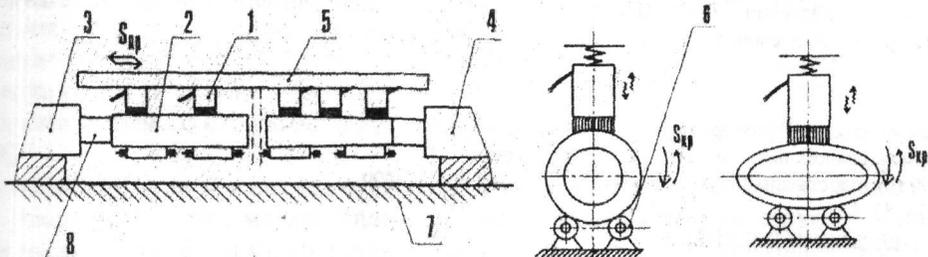


1-контейнер; 2-спиральные пружины; 3-основание; 4-амортизатор; 5-вибраторы; 6-вал привода с карданом; 7-бак-отстойник; 8-клиноременная передача; 9-привод; 10-сменный шкив.

Обработка длинномерных деталей неограниченной длины



1-рабочая камера; 2-обрабатываемая деталь; 3-привод подачи (поперечная балка); 4-задняя бабка; 5-основание; 6-направляющие; 7-технологический наконечник; 8-вибратор; 9-рабочая среда; 10-отсекатель рабочей среды; 11-пружина; 12-поддерживающий ролик.



1-инструмент (ШСУ); 2-обрабатываемая деталь; 3-привод круговой подачи; 4-задняя бабка; 5-блок продольной подачи; 6-опорный ролик; 7-основание; 8-технологический наконечник.

Рисунок 5 – Обработка длинномерных деталей ТОТС

- “поэлементная” обработка осуществляется на основе введения в технологическую систему вибрационного станка подъемно-поворотного устройства (ППУ);
  - для деталей III – й группы разработаны оригинальные технологические схемы с использованием новых конструкций виброударных инструментов и рабочих камер проходного типа
- Транспортно-обрабатывающая технологическая система разработана на основе использования совмещения эффекта виброударного воздействия и вибротранспортирования обрабатываемой среды по обрабатываемой поверхности детали (рисунок 6).

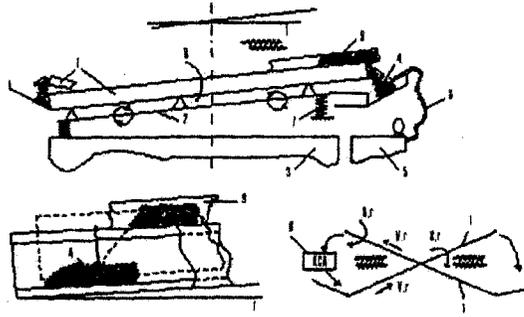


Рисунок 6 - Транспортно-обрабатывающая технологическая система

Предложенные технологические схемы прошли экспериментальную проверку с использованием имитационных моделей и опытных образцов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. - Изд. ДГТУ, Ростов-н/Д., 1999 - 620с.
- 2 Бабичев И.А. Мотренко П.Д. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом-Ростов-на –Дону, ДГТУ, 2003,-192 с
- 3 Бабичев И.А. Модель передачи ударного импульса в ШСУ // Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. - Ростов н/Д, 1991. - С.9-21.
- 4 Бабичев А.П., Тамаркин М.А., Физико-технологические основы методов обработки.- Ростов н/Д., издательский центр ДГТУ, 2003.-430с.
- 5 Горохов В.А. Обработка деталей пластическим деформированием. – К.: Техника, 1978. – 192с.
- 6 Мотренко П.Д. Повышение интенсивности отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием на основе применения многоконтактных виброударных инструментов Дис. ... канд.техн.наук, Ростов н/Д, 2000.- 193 л.
- 7 Одинцев Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием Справочник. - М.: Машиностроение, 1987. - 328с.
- 8 Олейник Н.В., Кычин В.П., Луговской А.Л. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. – К.: Техника, 1984. - 151с.
- 9 Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 1978. - 152 с.
- 10 Юркевич В.Б. Исследование процесса вибрационной ударной обработки и его влияния на эксплуатационные свойства деталей машин. Дис... канд. техн. наук, 1981.

#### **Бабичев Анатолий Прокофьевич**

Доктор технических наук, профессор  
 Донской государственной технической университет, профессор  
 Тел.: 273-85-13  
 E-mail: [prof-babichev@rambler.ru](mailto:prof-babichev@rambler.ru)

#### **Мотренко Петр Данилович**

Кандидат технических наук  
 Первый заместитель Генерального директора ОАО “Роствертол”

#### **Медведев Максим Владимирович**

Аспирант кафедры “Технология машиностроения”

Донской государственный технический университет

**Максимов Дмитрий Валерьевич**

Аспирант кафедры "Технология машиностроения"

Донской государственный технический университет

**Смирнов Владимир Николаевич**

Магистрант кафедры "Технология машиностроения"

Донской государственный технический университет

**Шельпатская Екатерина Александровна**

Магистрант кафедры "Технология машиностроения"

Донской государственный технический университет

**Коваль Николай Сергеевич**

Магистрант кафедры "Технология машиностроения"

Донской государственный технический университет

УДК 621.9

А.И. КОПТЕВ, А.В. КУЗОВКИН

## **СИЛОВЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ФАКТОРЫ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

*В статье рассмотрена технологическая проблема нарезания зубчатых колес с мелким модулем. Установлен и раскрыт механизм взаимного влияния основных факторов процесса обработки.*

*Ключевые слова:* формообразование, зубчатое колесо, скорость резания

*In the article the technological problem of grooving of cog-wheels with a small-sized module is reviewed. Is established and the gear of interaction interference of major factors of process of processing is uncovered.*

*Key words:* formation of the form, a cogwheel, speed of cutting

Точность зубчатых колес и эвольвентных шлиц зависит от правильного выбора режимов обработки, определяющих стабильность геометрических размеров рабочего профиля. Режимы рассчитываются или назначаются с учетом податливости системы СПИД и температурных изменений заготовки, инструмента и приспособления. Силы резания и температура резания изменяются как за цикл обработки зубчатого колеса и каждого зуба, за каждый рабочий ход всего долбяка.

Осциллограммы записи силы и температуры резания (рисунок 1) при зубодолблении колес с наружным и внутренним зубчатым венцом ( $\alpha_w = 30^\circ$ ,  $m = 1,0$  мм) показали, что наибольшее значение имеет составляющая  $P_z$ , а  $P_y$  и  $P_x$  составляют соответственно (0,4-0,55)  $P_z$  и (0,2-0,4)  $P_z$ .

Величина всех сил резания имеет наибольшие значения в момент входа зубьев долбяка в зону резания, т.к. в этот момент снимается максимальная толщина стружки, удаляемая входной и вершинной режущими кромками зуба долбяка в начале работы (рисунок 2).

По мере приближения зуба долбяка к линии, соединяющей центры колеса и долбяка, происходит уменьшение толщины срезаемых стружек, а за линией центров в резании участвует только выходная режущая кромка, срезающая очень тонкую стружку. При выходе зуба

долбяка из рабочей зоны его режущие кромки уже не участвуют в работе и поэтому на осциллограммах не наблюдается изменение составляющих силы резания.

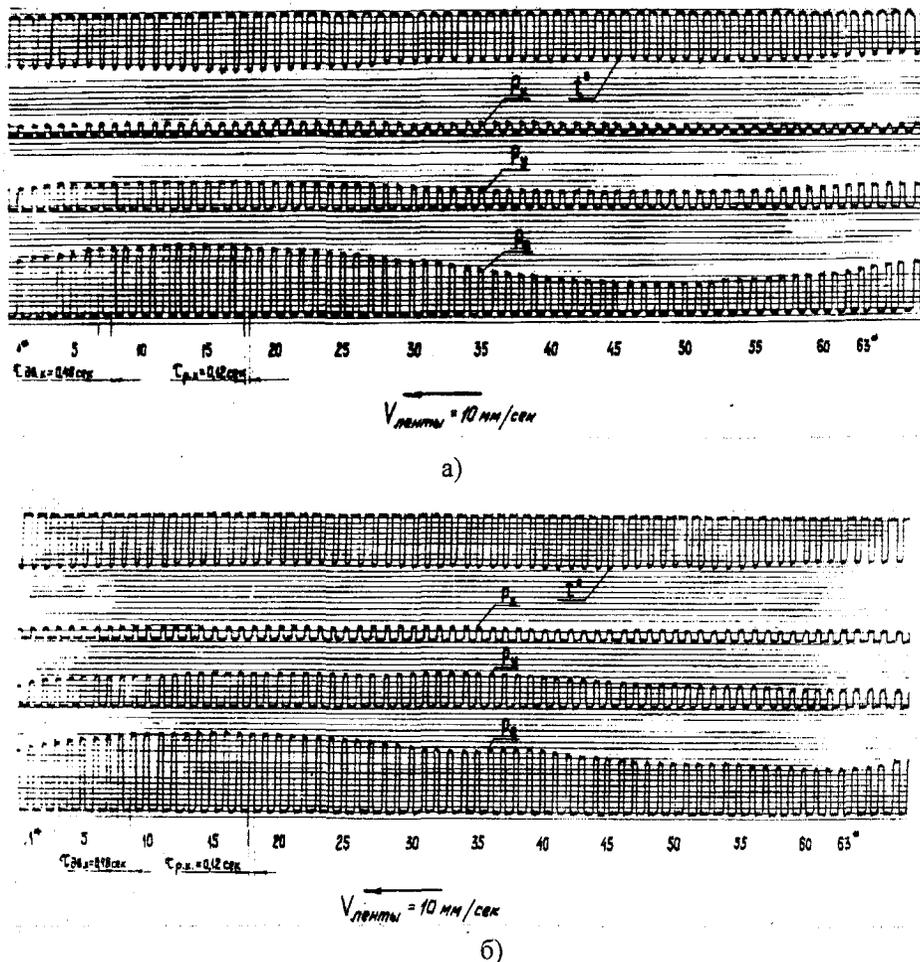


Рисунок 1 - Осциллограммы составляющих силы резания и температуры при зубодолблении колес с наружным а) и внутренним б) зубчатым венцом из сплава ВНЛ-3 долбяком из сплава ВК10-ОМ ( $m = 1,0$  мм,  $\alpha_w = 30^\circ$ ,  $z = 11$ ,  $z_k = 20$ ,  $B = 20$  мм,  $n = 2,1$  дв.ход./с,  $V = 0,17$  м/с,  $S_{кр} = 0,048$  мм/дв.ход, обработка однопроходная, СОЖ - сульфофрезол)

При нарезании колес с внутренним зубчатым венцом наблюдается увеличение силы резания по сравнению с обработкой колес с наружными зубьями (рисунок 1). Это происходит из-за увеличения количества одновременно работающих зубьев долбяка (рисунок 2), несмотря на уменьшение сечения стружки, срезаемой каждым зубом в отдельности и как следствие этого, уменьшение нагрузки, действующей на каждый зуб.

Количество зубьев долбяка и нарезаемого колеса влияет на количество зубьев, находящихся в зоне резания (рисунок 2), и, следовательно, на силы резания. Однако если при внешнем зацеплении увеличение количества одновременно работающих зубьев происходит как с увеличением зубьев долбяка, так и с увеличением зубьев колеса, то при внутреннем зацеплении последний фактор ( $z_k$ ) оказывает противоположное действие (рисунок 2, б), то есть при внутреннем зацеплении колеса и долбяка с уменьшением отношения  $z_d/z_k$  увеличивается количество одновременно работающих зубьев и, следовательно, увеличивается сила резания.

При увеличении количества одновременно работающих зубьев, наряду с увеличением силы резания, происходит меньшее колебание силы и температуры резания (рисунок 1).

Из изложенного следует, что количество зубьев долбяка должно выбираться не только из условия исключения подрезания ножки или срезания головки зуба нарезаемого колеса, но и из условия количества одновременно работающих зубьев долбяка. Количество одновременно работающих зубьев (коэффициент перекрытия) при зацеплении долбяка и колеса должно быть максимально и ни в коем случае не быть меньше единицы. В противном случае будет иметь место значительное колебание составляющих силы резания не только по величине (для  $P_z$  и  $P_y$ ), но и по направлению (для  $P_x$ ), которое приведет к существенному снижению точности нарезаемых зубчатых колес при недостаточной жесткости системы СПИД [1]. Особенно важно учитывать количество одновременно работающих зубьев долбяка с обрабатываемым колесом при наружном зацеплении, так как при этом коэффициент перекрытия значительно меньше, чем при внутреннем зацеплении.

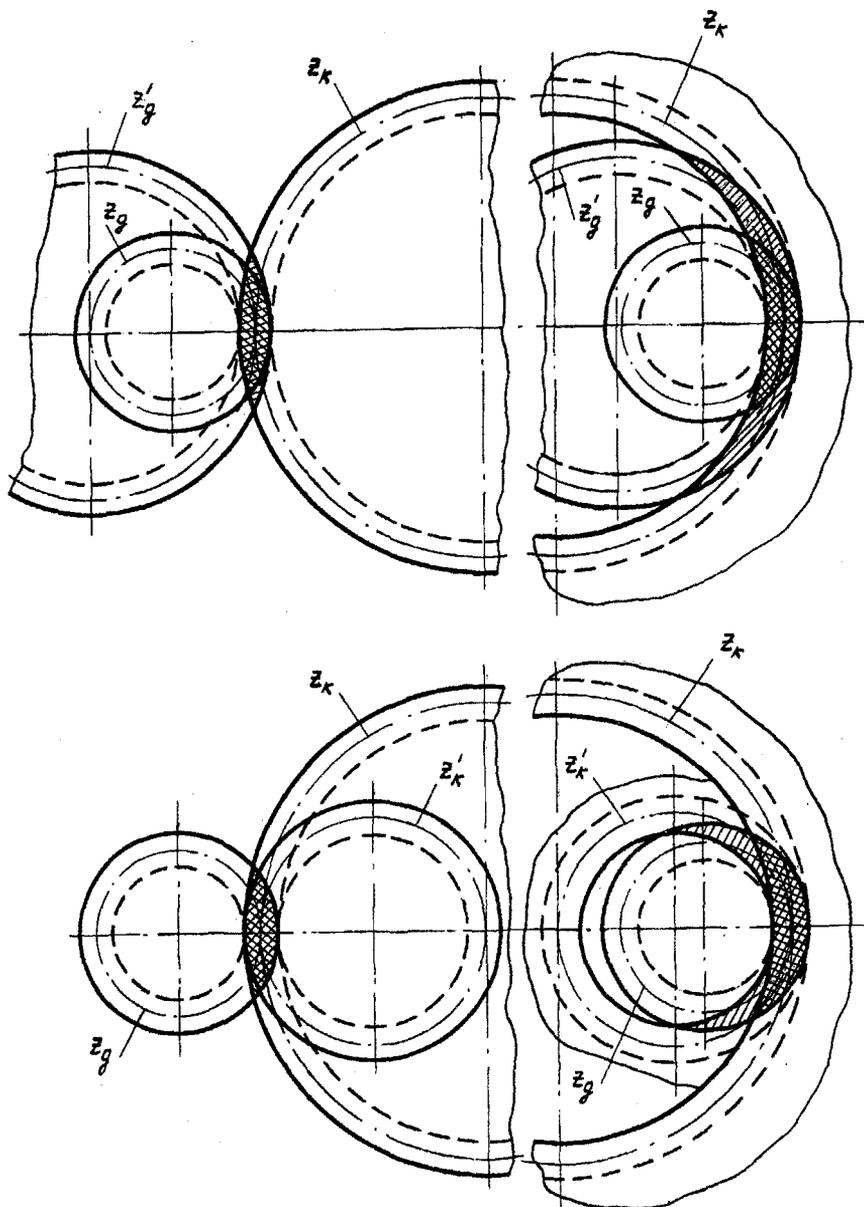


Рисунок 2 - Влияние количества зубьев долбяка ( $z_0$ ) и колеса ( $z_k$ ) на количество зубьев, находящихся в зоне резания (зона со штриховкой), при наружном (а, в) и внутреннем (б, з) зацеплении ( $z'_0 = 2z_0$ ,  $z'_k = 2z_k$ )

В то же время следует отметить, что при внешнем зацеплении изменение количества зубьев долбяка и колеса в меньшей степени влияет на количество одновременно работающих зубьев, а следовательно, на величину и изменение составляющих силы резания, чем при внутреннем зацеплении (рисунок 2).

Режущие кромки зуба долбяка подвергаются действию переменных нагрузок не только в процессе обкатки и вызванным им изменением сечения срезаемого слоя, но и в течение каждого рабочего хода долбяка (рисунок 3). При этом составляющая  $P_z$  изменяется в наибольшей степени, а  $P_x$  и  $P_y$  – значительно меньше. Изменения происходят по асимметричному знакопостоянному циклу. Из рисунка 3 и таблицы 1 видно, что наиболее резкое увеличение силы  $P_z$  (в 1,1 – 1,2 раза) имеет место в момент первоначального контакта инструмента с деталью, причем отношение  $P_{zmax}/P_{zmin}$  увеличивается примерно на 10% при увеличении скорости резания в 2 раза. Можно предположить, что в момент врезания инструмента в деталь в результате резкого увеличения скорости деформации (от 0 до  $V$  резания) имеет место процесс очень схожий с ударным. Повышение стойкости деформации, а следовательно, и повышение скорости удара приводит к увеличению предела текучести металла как при сжатии, так и при растяжении. При увеличении скорости удара до 5 - 8 м/с происходит увеличение динамического предела текучести в 2 и более раз по сравнению со статическим пределом текучести. Вследствие увеличения предела текучести обрабатываемого материала возрастает его сопротивление разрушению, приводящее к кратковременному повышению силы резания. Когда происходит превышение динамического предела текучести, накопленная сверхупругая деформация переходит в пластическую и металл разрушается. Этим может быть объяснено кратковременное увеличение составляющей  $P_z$  силы резания при врезании долбяка в деталь. Этот процесс особенно наглядно проявляется при резании жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов (14ХГСН2МА, ВНЛ, ЖСЗ-ДК).

Таблица 1. Влияние скорости резания на составляющую силы резания

| Скорость резания                                | $V, \text{ м/с}$    | 0,167 | 0,667 |
|---|---------------------|-------|-------|
| Составляющая силы резания $P_{zmax}, \text{ Н}$ | $P_{zmax}$          | 359   | 218   |
|   | $P_{zmin}$          | 330   | 185   |
|   | $P_{zmax}/P_{zmin}$ | 1,09  | 1,18  |

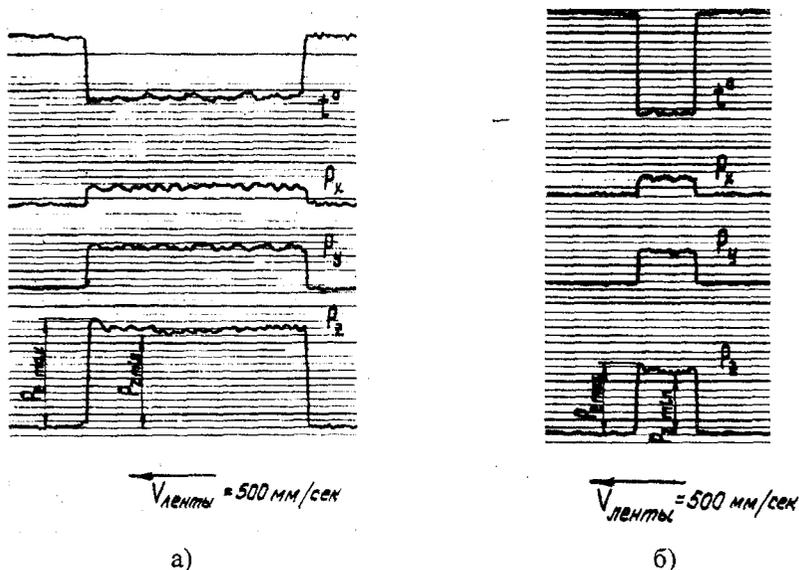


Рисунок 3 - Составляющие силы резания и температура при долблении колес с внутренним зубчатым венцом из сплава ВНЛ-3: а)  $V = 0,167 \text{ м/с}$ ; б)  $V = 0,667 \text{ м/с}$  (остальные условия обработки приведены на рисунке 1)

После момента врезания происходит небольшое снижение силы резания, а затем вновь ее увеличение, что вызвано увеличением и снижением скорости резания. Кроме этого, в течение рабочего хода долбяка происходят колебания всех составляющих силы резания с малой амплитудой и периодом, вызванные вибрациями различной частоты системы СПИД, наличием твердых включений в обрабатываемом материале, периодическим образованием и срывом нароста и другими процессами.

Зависимости составляющих силы резания и температуры от режимов резания при зубодолблении колес внутреннего зацепления из сплава ВНЛ-3 долбяками с режущей частью из твердого сплава ВК10-ОМ и быстрорежущей стали Р18 были определены расчетным методом. При этом предполагалась функциональная связь зависимых и независимых переменных в виде

$$F(\theta) = cV^x S_{кр}^y$$

где  $F$  и  $\theta$  – среднее значение составляющей силы резания или температуры.

Среднее из трех значений составляющих силы резания в каждой серии опытов, результаты проверки воспроизводимости, расчеты оценок коэффициентов уровней регрессии, проверки их значимости и адекватности приведены в таблице 2.

При зубодолблении долбяками из твердого сплава ВК10-ОМ колес ( $m = 1,0$  мм;  $\alpha_0 = 30^\circ$ ) из сплава ВНЛ-3 во всем рассмотренном диапазоне режимов резания ( $V = 0,167 - 0,668$  м/с;  $S_{кр} = 0,0187$  мм/дв.ход при  $d_0 = 11,0$  мм) все составляющие силы резания и температура ниже, чем при зубодолблении долбяками из быстрорежущей стали Р18. С увеличением режимов резания эта разница увеличивается от 25 – 30 % при  $V = 0,167$  м/с;  $S_{кр} = 0,0187$  мм/дв.ход до 100 % при  $V = 0,668$  м/с;  $S_{кр} = 0,0484$  мм/дв.ход.

Увеличение скорости резания приводит к уменьшению всех составляющих силы резания, причем в большей степени – для долбяков из ВК10-ОМ. С увеличением круговой подачи эти составляющие увеличиваются, но в большей степени – для долбяков из стали Р18. При этом наибольшим изменениям подвержена составляющая  $P_z$ .

В диапазоне оптимальных режимов резания при зубодолблении колес из сплава ВНЛ-3 долбяками из сплава ВК10-ОМ по сравнению с долбяками из стали Р18 составляющие силы резания имеют соответственно меньшие значения на 45 – 60 %.

Таблица 2. Сила и температура резания при зубодолблении ( $m = 1,0$  мм;  $\alpha_0 = 30^\circ$ ; зацепление внутреннее; обрабатываемый материал – сплав ВНЛ-3)

| Инструментальный материал | Составляющие силы резания $P_x, P_y, P_z$ и температуры $\theta, ^\circ K$ | Подача окружная $S_{кр},$ мм/дв.ход |       |        |       |       |
|---------------------------|--|-------------------------------------|-------|--------|-------|-------|
|                           |  | 0,0187                              |       | 0,0484 |       | 0,033 |
|                           |  | Скорость резания $V,$ м/с           |       |        |       |       |
|                           |  | 0,167                               | 0,667 | 0,167  | 0,667 | 0,334 |
| ВК10-ОМ                   | $P_z$  | 230                                 | 120   | 320    | 190   | 210   |
|                           | $P_y$  | 90                                  | 57    | 147    | 96    | 100   |
|                           | $P_x$  | 40                                  | 30    | 60     | 52    | 50    |
|                           | $\theta$   | 395                                 | 448   | 409    | 466   | 438   |
| Р18                       | $P_z$  | 260                                 | 220   | 513    | 400   | 360   |
|                           | $P_y$  | 115                                 | 100   | 280    | 200   | 160   |
|                           | $P_x$  | 52                                  | 50    | 170    | 150   | 100   |
|                           | $\theta$   | 483                                 | 630   | 548    | 775   | 623   |

Снижение величины составляющих силы резания при зубодолблении долбяками из твердого сплава ВК10-ОМ по сравнению с долбяками из стали Р18 вызвано следующими причинами:

- более низким адгезионным взаимодействием твердых сплавов с обрабатываемыми материалами;
- меньшим округлением режущих кромок твердосплавных долбяков вследствие их более высокой износостойкости.

Эти факторы оказывают решающее значение на величину составляющих  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ , несмотря на то, что по сравнению с долбяками из стали P18 твердосплавные долбяки имеют меньшие значения оптимальных геометрических параметров режущей части и более низкую температуру резания, что затрудняет процесс пластической деформации и увеличивает силу резания.

Увеличение скорости резания повышает температуру и тем самым облегчает процесс пластической деформации и снижает силу резания. Однако при этом снижается износостойкость режущих кромок, затрудняется процесс стружкообразования и сила резания снижается менее интенсивно, особенно у долбяков из стали P18, обладающих меньшей износостойкостью. С увеличением круговой подачи увеличивается сечение стружки и интенсивность разрушения режущих кромок долбяка. Поэтому, несмотря на рост температуры резания, сила резания увеличивается.

Увеличение скорости резания и круговой подачи ведет к увеличению температуры резания, более интенсивному для долбяков из стали P18, чем из BK10-OM. В диапазоне оптимальных режимов резания долбяки из стали BK10-OM дают среднюю температуру резания около 473 К, что на 50% ниже, чем температура при зубодолблении долбяком из стали P18. Основной причиной более низкой температуры резания для долбяков из стали BK10-OM по сравнению со сталью P18 является более высокая теплопроводность твердых сплавов, а также их более низкое адгезионное взаимодействие с обрабатываемыми материалами и более высокая износостойкость.

Одним из путей повышения технологических показателей при формообразовании профиля эвольвентных колес является использование твердосплавных зубообрабатывающих инструментов, изготовление которых может эффективно выполняться комбинированным методом с наложением электрического поля [2].

#### Выводы

Авторами работы рассмотрены взаимовлияние основных факторов и параметров процесса нарезания зубьев мелко модульных зубчатых колес, что позволило предложить рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления долбяков на основе комбинированной обработки с наложением электрического поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кузовкин В.П., Уваров В.Г. Твердосплавные зуборезные инструменты. Материалы науч.-техн. конф. "Производительная обработка материалов". – Воронеж, ВГТУ, 1998, с. 10-21.
- 2 Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005, 511 с.

**Кузовкин Алексей Викторович**

Доктор технических наук, доцент

Воронежский государственный технический университет

Заведующий кафедрой

**Коптев Александр Иванович**

Воронежский механический завод

Начальник цеха

## ВОЛНОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ ДЕФОРМИРУЮЩЕ-РЕЖУЩИХ ПРОТЯЖЕК

*Представлены перспективные методы волнового нагружения деформирующе-режущих протяжек. Рассмотрены технологические параметры обработки отверстий комбинированными методами.*

**Ключевые слова:** деформирующее протягивание, режущее протягивание, волновое нагружение.

*The perspectives of the methods of wave loading deforming-cutting broaches. Consider the technological parameters of processing holes combined methods.*

**Key words:** deforming pulling, cutting pulling, wave loading.

В современном машиностроении широко применяют методы поверхностного пластического деформирования (ППД) для создания упрочненного поверхностного слоя. В зависимости от размеров, конфигурации, материала детали, назначения обработки, серийности производства и других факторов в каждом конкретном случае выбирают наиболее оптимальный метод ППД. Эффективность упрочнения зависит от материала, структуры, вида напряженного состояния, формы и т.д. Большую роль играет выбор метода и режимов упрочнения.

Наиболее эффективным методом обработки отверстий является дорнование. Получение благоприятных показателей качества поверхностного слоя обуславливается повышенной точностью обработки и обеспечением заданных параметров шероховатости, созданием в поверхностном слое наклепа и сжимающих напряжений, повышающих эксплуатационные свойства деталей.

Основными недостатками дорнования являются: повышенные требования к равномерности припуска по диаметру и длине отверстия, а также разрушение деформированного слоя при больших натягах на деформирующий элемент. Кроме того на входном и выходном торцах заготовки проявляется краевой эффект, выражающийся в локальном отклонении профиля продольного сечения [1].

Перспективным решением этих проблем стало применение деформирующе-режущих протяжек (ДРП). Режущий элемент или элементы расположены после секций деформирующих, т.е. после каждого цикла поверхностного пластического деформирования осуществляется цикл резания. Глубина механически упрочненного слоя по толщине втулки зависит от натяга на деформирующий элемент, радиальной жесткости, пластических свойств обрабатываемого материала, угла заборного конуса деформирующего элемента.

Применение ДРП для обработки вязких материалов позволило значительно снизить шероховатость обработанных поверхностей. Рядом исследователей было установлено, что при срезании предварительно механически упрочненного поверхностного слоя толщиной, составляющей от 0,02 до 0,07 мм, несмотря на повышение твердости силы резания снижаются на 30...40% [1], а снижение силы резания связано с повышением размерной стойкости режущих зубьев.

Проблема повышения производительности в настоящее время остается одной из актуальных. Возможным решением может послужить комбинированное нагружение инструмента. Современные технологии позволяют использовать статическое и динамическое нагружение инструмента одновременно. При этом основное деформирующее воздействие будет происходить за счет волновой (динамической) нагрузки. Предварительное статическое поджатие инструмента к обрабатываемой детали применяется для более полной передачи волновых импульсов. Особенностью является генерируемая частота волновых колебаний инструмента. Следовательно волновыми процессами можно управлять изменением геометрических параметров и материалов элементов ударной системы, включающей боек, промежуточное звено (волновод) и инструмент.

Технологическими параметрами волнового деформирующе-режущего протягивания являются:

- сила удара (энергия удара);
- частота ударов;
- натяг;
- толщина стенок обрабатываемой заготовки;
- угол заборного конуса.

Проводимые исследования [2] показали, что комбинированная обработка внутренних цилиндрических поверхностей позволяет более чем в два раза повысить производительность, в 2,2 раза уменьшить потребляемую мощность в сравнении с дорнованием осуществляемым под статической нагрузкой, шероховатость упрочненной поверхности достигает  $Ra = 0,08$  мкм, уменьшаясь за один проход с 5 мкм, то есть более чем в 60 раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Киричек А.В., Амбросимов С.К. Интенсификация процессов комбинированного протягивания круглых отверстий. — М: Машиностроение-1, 2009. - 148 с.
- 2 А.В. Киричек Статико-импульсная обработка внутренних цилиндрических поверхностей [Текст] / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2004. - №3 С.16-17.

### **Киричек Андрей Викторович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Доктор технических наук, директор технологического института, профессор  
Тел. (4862) 55-55-24  
E-mail: [avk@ostu.ru](mailto:avk@ostu.ru)

### **Морин Владимир Валерьевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»  
Тел. (4862) 54-15-03  
E-mail: [valodyaka@yandex.ru](mailto:valodyaka@yandex.ru)

УДК 621.9.047

## **А.В. МАСЛОВ**

### **КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛОКАЛИЗУЮЩИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ**

*Рассматриваются критерии сравнительной оценки локализирующих свойств электролитов, применяемых при электрохимической размерной обработке материалов.*

**Ключевые слова:** *раствор электролита, плотность тока, критерии оценки*

*There has been offered an additional criterion for comparative estimation of localising properties of electrolyte solutions in the processes of ECM.*

**Key words:** *a solution of electrolit, density of a current, criteria of an estimation*

При электрохимическом формообразовании элементов изделий требуется локально направленное анодное растворение металла. Иными словами, требуется высокая локализация процесса анодного растворения, обеспечивающая повышенную точность формообразования.

Принцип локализации процесса анодного растворения металлов заключается в том, что растворение должно происходить только на участках поверхности анода, находящихся на наименьших расстояниях от катода. В этом случае, при условии поддержания заданного

минимального зазора, форма катода будет копироваться с наибольшей точностью. Решающее значение для точности копирования имеет состав раствора, а точнее его локализующая способность, которая и определяет возможность интенсивного растворения анода в местах наиболее близких к поверхности катода, и замедленное его растворение, либо отсутствие на удаленных участках.

Рядом авторов в результате многочисленных исследований по оценке точности формообразования [1-3] установлено, что в диапазоне потенциалов, соответствующим наименьшей поляризуемости ( $d\phi/di \rightarrow 0$ ) наблюдается наибольшая локализация процесса анодного растворения и наименьшая погрешность формообразования. Другим критерием является наличие возрастающей зависимости выхода по току (скорости растворения) от потенциала или плотности тока ( $d\eta/d\phi > 0$ ,  $d\eta/di > 0$ ).

Анодное поведение одного и того же металла в различных растворах существенно различается. Так (рисунок 1) в нитратных растворах рост плотности тока (скорости растворения) большинства низколегированных сталей начинается при потенциалах примерно на 1,5 В положительнее стационарного. При этом на коротком участке анодных потенциалов наблюдается малая поляризуемость металла.

В растворе хлорида натрия поляризуемость на всем протяжении анодных потенциалов составляет значительную величину, но не стремится к нулю, как в нитратных растворах.

Удельная скорость растворения (удельный съем) при этом (рисунок 2) в растворах нитрата натрия в диапазоне потенциалов 1,8 – 3,0 В с ростом потенциала анода значительно возрастает ( $d\gamma/d\phi > 0$ ,  $d^2\gamma/d\phi^2 < 0$ ), в то время как в растворах хлористого натрия она практически не зависит от анодного потенциала.

В растворе хлората натрия имеет место также возрастающая зависимость удельного съема с ростом потенциала, однако в отличие от нитратных растворов она выражена в меньшей степени (рисунок 2).

Однако, как показал анализ зависимостей выхода металла от плотности тока или потенциала, критерий ( $d\eta/di \rightarrow \infty$  или  $d\eta/d\phi \rightarrow \infty$ ) не отражает достаточно полно оценочный фактор.

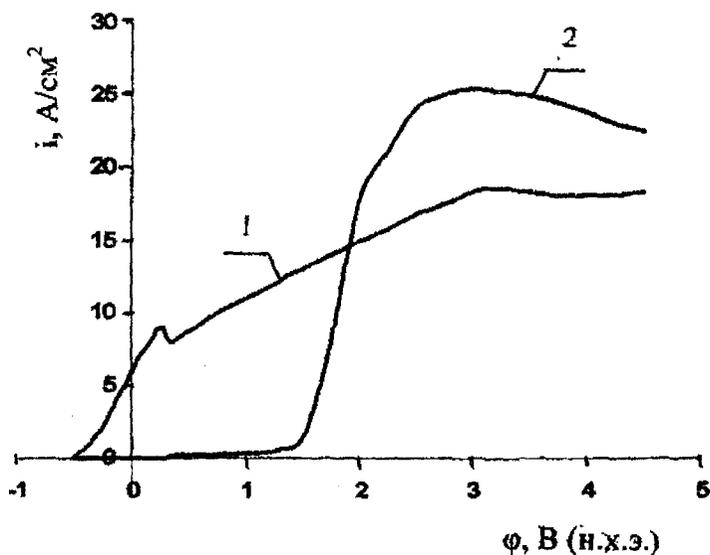


Рисунок 1 - Анодные потенциостатические кривые стали ХВГ полученные в 1 M водных растворах: 1 - NaCl, 2 - NaNO<sub>3</sub> при T = 20 °C и V<sub>эл</sub> = 3 м/с [1]

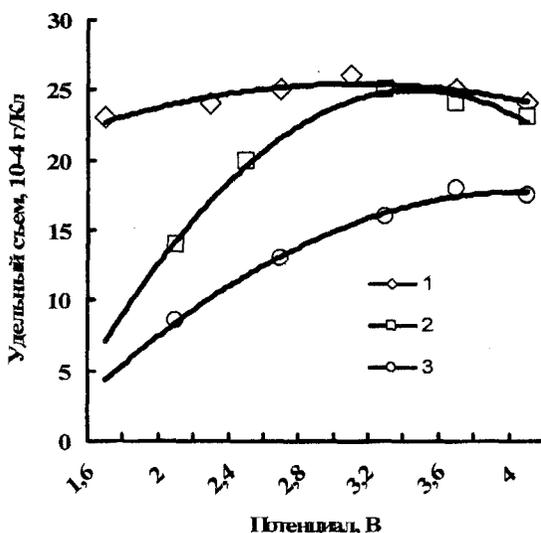


Рисунок 2 - Зависимости удельного съема от анодного потенциала полученные при растворении стали 08X18H10T в электролитах: 1 - 2,93 т NaCl; 2 - 4,23 т NaNO<sub>3</sub>; 3 - 2,26 т NaClO<sub>3</sub> (T = 20 °C, V<sub>эл</sub> = 3,2 м/с, МЭЗ = 0,5 мм) [1]

На рисунке 3 представлены теоретически возможные участки возрастающих зависимостей выхода металла от плотности тока для различных электролитов, позволяющие провести их сравнительную оценку.

Как видно (рисунок 3) угол подъема прямой для электролита №2 (то есть отношение  $d\eta/di$ ) выше, чем прямой электролита №1. С этой точки зрения точность формообразования при использовании электролита №2 должна быть выше при прочих равных условиях. Однако перераспределение скоростей на различных участках будет одинаково для обоих электролитов (№1 и №2). То есть точность обработки одинакова.

Углы подъема прямых для электролитов №2, №3 и №4 одинаковы (критерий  $d\eta/di = 0,05$  (см. табл.1 и рис. 3)). Ожидаемое перераспределение скоростей должно быть тоже равным. Однако реальная картина отлична от ожидаемой. Точность обработки в этих электролитах различна.

Подробный анализ зависимостей позволил определить более значимый оценочный критерий. Это критерий отношения выходов металла по току (скоростей растворения) на различных участках ( $\eta_I/\eta_{II}$ ).

Действительно, при сравнении электролитов №2, №3 и №4 (при равном критерии  $d\eta/di$ ) наибольшая точность достигается в растворе №3 (см. табл. 1).

Таблица 1 - Сравнительный анализ критериев для различных электролитов (по данным рис. 1)

|                      | Электролитный раствор |      |      |      |      |       |
|----------------------|-----------------------|------|------|------|------|-------|
|                      | №1                    | №2   | №3   | №4   | №5   | №6    |
| $d\eta/di$           | 0,025                 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,095 |
| $\eta_I/\eta_{II}^*$ | 2                     | 2    | 11   | 3    | 3,33 | 20    |

\*  $\eta_I$  и  $\eta_{II}$  – выходы по току при соответствующих плотностях тока (например: 20 и 10 А/см<sup>2</sup>)

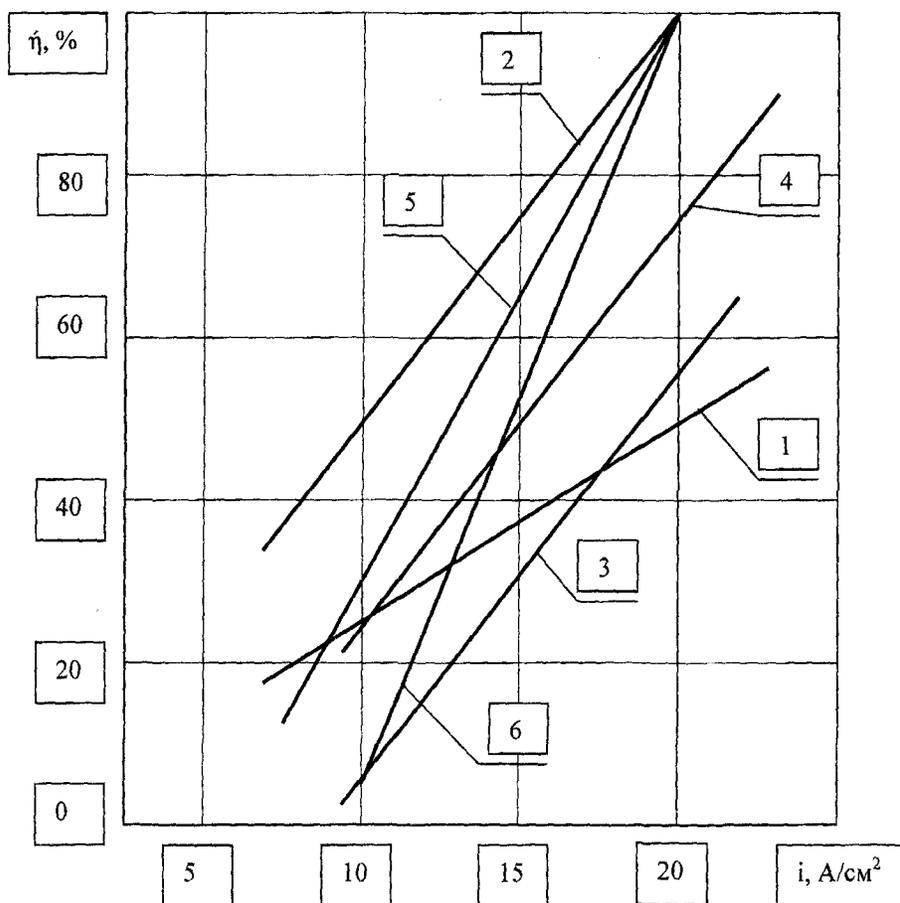


Рисунок 3 - Характерные участки зависимости выхода металла по току от плотности тока для различных электролитов

**Выводы.**

При оценке локализирующих свойств растворов электролитов, наряду с наименьшей поляризуемостью ( $d\phi/di \rightarrow 0$ ) необходимым, но недостаточным фактором является возрастающий критерий  $d\eta/di$  или  $d\eta/d\phi$  (косвенный фактор). Дополнительным (третьим) критерием должно быть соотношение  $\eta_I/\eta_{II}$ , более точно отражающим реальное распределение скоростей растворения участков поверхности.

Следует также отметить, что при равных углах подъема, смещение участков прямых в область больших плотностей тока приводит к росту критерия  $\eta_I/\eta_{II}$ , соответственно точности формообразования.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Атанасянц А.Г. Анодное поведение металлов: Учебное пособие для вузов. - М.: Metallургия, 1989. -151 с.
- 2 Зайдман Г.Н., Петров Ю.Н.Формообразование при электрохимической размерной обработке металлов.- Кишинев: Штиинца, 1990. -205 с.
- 3 Румянцев Е.М., Давыдов А.Д. Технология электрохимической обработки металлов. Учебное пособие для технических вузов.- М.: Высшая школа, 1984.- 159 с.

Маслов Александр Владимирович  
 Липецкий государственный технический университет,  
 Кандидат технических наук  
 Тел. 8 910 352 81 61  
 E-mail: avmas@mail.ru

УДК 681.142

А. В. НИКИТЕНКО, В. М. ДАВИДОВ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕЛКОРАЗМЕРНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

*В работе описана процедура выбора инструментального обеспечения мелкоразмерной обработки формообразующей модельной оснастки и предложены критерии, позволяющие автоматизировать принятие технологических решений при проектировании инструментальных переходов на основе нейросетевого моделирования.*

*Ключевые слова:* мелкоразмерная формообразующая оснастка, ЧПУ, режущий инструмент, автоматизация, нейронная сеть, полутоновое изображение.

*In work procedure of a choice of tool maintenance processing's of form-building modeling equipment is described and the criteria, allowing to automate acceptance of technological decisions at designing of tool transitions with use of neural networks are offered.*

*Keywords:* small-sized form-building surfaces, CNC, cutting tool, automation, neural network, half-tone image.

При обработке формообразующих поверхностей деталей со сложным профилем на станках с ЧПУ используются методы обработки, характеризующиеся точечным касанием инструмента и детали. Это вызывает увеличение длины траектории обработки и снижение производительности, поэтому в настоящее время является актуальной задача повышения эффективности принимаемых решений на стадии технологической подготовки производства.

Анализ факторов, влияющих на качество обработанных поверхностей, показал, что к наиболее важным параметрам относятся геометрия инструмента и шаг смещения инструмента между смежными проходами.

При назначении инструментальной оснастки для обработки мелкоразмерных деталей сложной формы необходимо учитывать ряд требований. К ним относятся:

- обеспечение заданных параметров качества поверхностей;
- обеспечение высокой производительности обработки;
- выполнение требований к стойкости инструмента;
- соответствие формы и размеров инструмента параметрам обрабатываемой поверхности.

Последнее требование зачастую оказывается решающим, поскольку его выполнение является ключевым при проектировании технологического процесса изготовления сложных формообразующих поверхностей.

Как правило, многообразие форм и размеров инструментов, используемых для обработки мелкоразмерных формообразующих поверхностей, сводится к набору достаточно простых сочетаний элементарных поверхностей. Анализ предлагаемых производителями инструментов предложений в области инструментального обеспечения обработки мелкоразмерных сложных поверхностей показал, что наиболее распространенной формой инструмента является сфероконическая (рис. 1).

К параметрам, характеризующим геометрию сфероконического гравера, относятся: диаметр гравера, угол конуса и радиус скругления вершины. Диаметры хвостовика граверов стандартизованы. Для зажима инструмента в цанговом патроне шпинделя используется цилиндрическая поверхность. Наиболее широко представлены диаметры 3, 4 и 6 мм. Выбор того или иного диаметра в большинстве случаев определяется особенностями используемого оборудования. Угол конуса и радиус скругления вершины изменяются в широких пределах, однако, номенклатура инструментов, представленная производителями, ограничивается небольшим числом значений углов и радиусов

Одной из наиболее трудноформализуемых задач, стоящих на этапе технологической подготовки производства является выбор инструмента. Важным параметром, от которого в наибольшей степени зависит качество и производительность обработки является радиус скругления инструмента для тонкого гравирования. Выбор радиуса скругления инструмента, как правило, осуществляет технолог на основе собственного опыта и визуальной оценки сложности рельефа обрабатываемой поверхности.

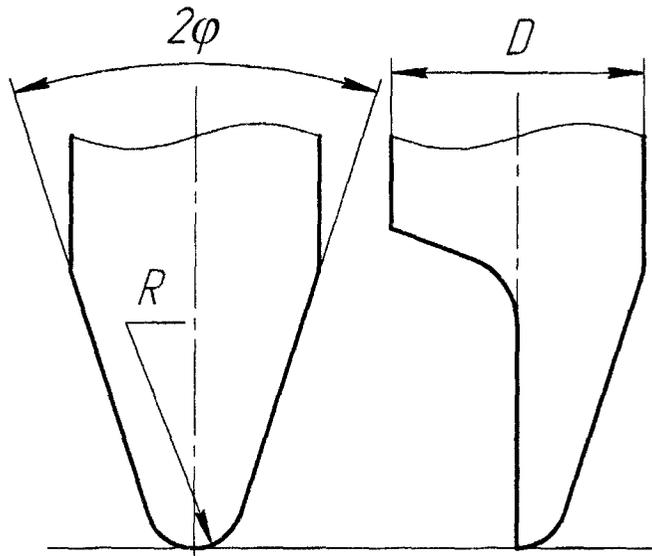


Рисунок 1 - Геометрия сфероконического гравера

Основным критерием при выборе радиуса скругления инструмента является степень соответствия поверхности получаемой в результате обработке исходной модели. Очевидно, что высокая сложность рельефа требует инструмента с меньшим радиусом скругления (рис 2.).

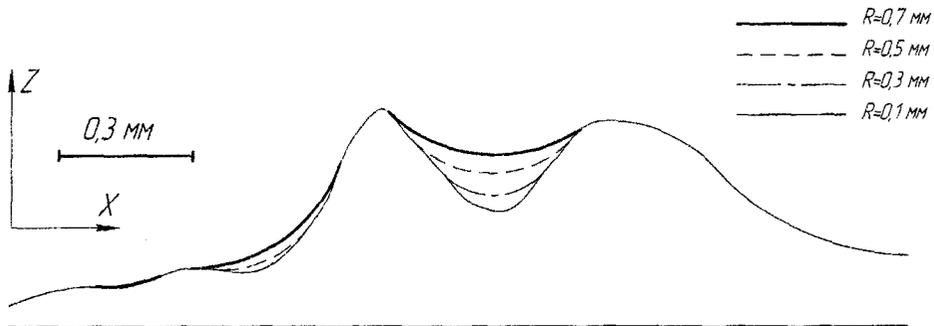


Рисунок 2 - Примеры траекторий гравера с различными радиусами

Для автоматизации выбора параметров инструмента разработана методика, основанная на анализе сечений рельефа и определении величины слоя остающегося после обработки в связи с несоответствием габаритов инструмента и параметров профиля поверхности.

Рельеф формообразующей поверхности (рис. 3, а) сохраняется в виде полутонового изображения в формате BMP (рис. 3, б), в котором высота по оси Z в каждой точке с координатами X, Y задаётся соответствующим оттенком серого. Такое представление высоты рельефа является дискретным с шагом равным  $(Z_{max} - Z_{min})/256$ .

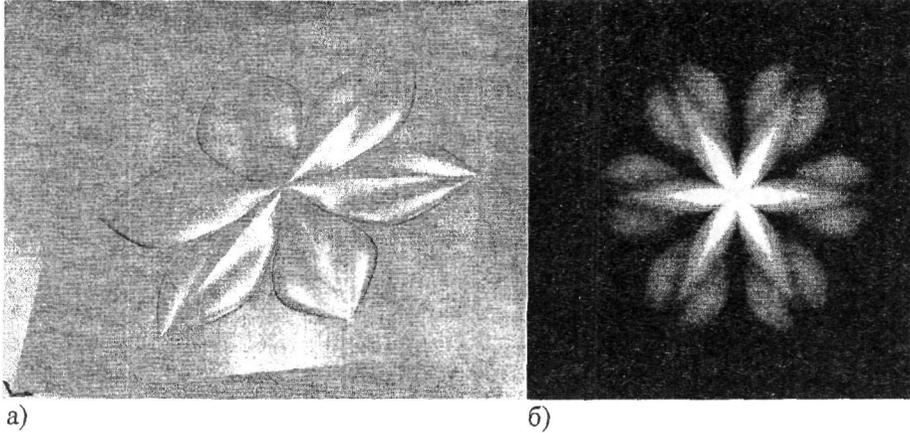


Рисунок 3 - а) формообразующая поверхность;  
б) полутоновое изображение, характеризующее её рельеф

Для оценки сложности формообразующей поверхности и степени соответствия названного инструмента рельефу поверхности используется методика, основанная на анализе сечений профиля и определении численных значений выбранных критериев. К таким критериям относятся следующие:

1. Среднеквадратичное значение угла наклона профиля формообразующей поверхности

$$\Delta'_q = \frac{\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n (h_{i+1} - h_i)^2}}{L_x}, \quad (1)$$

где  $h_i$  – высота точек сечения (в мм),  $n$  – количество точек,  $L_x$  – длина сечения по оси X.

2. Среднее отклонение реального профиля (получаемого инструментом с заданными параметрами) от номинального

$$Z_a = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}{n}. \quad (2)$$

Рассчитывается для каждого сечения формообразующей поверхности и определяется среднее значение по всем сечениям.

3. Среднеквадратичное отклонение реального профиля от номинального

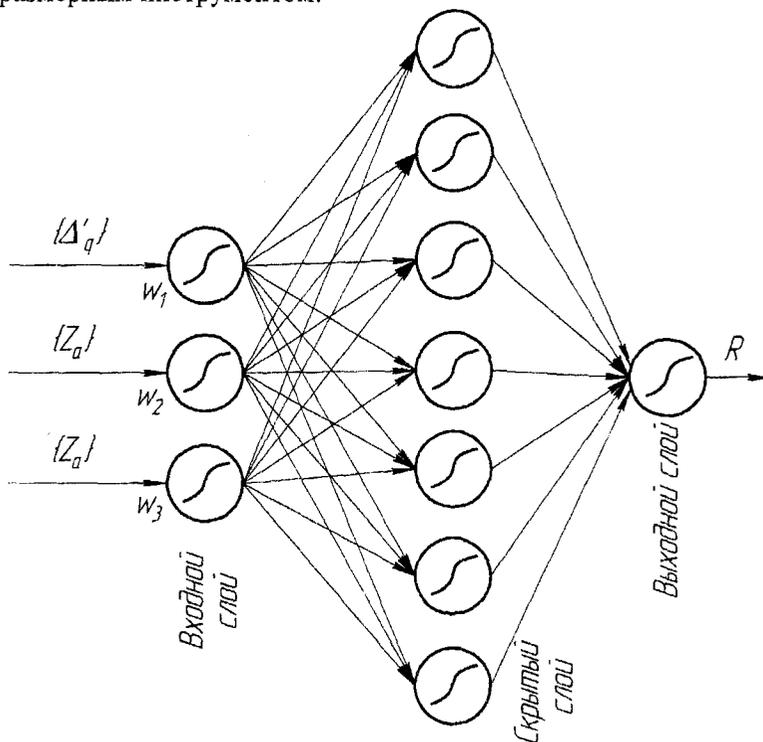
$$Z_q = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h_i)^2}{n}. \quad (3)$$

Рассчитывается для каждого сечения формообразующей поверхности и определяется среднее значение по всем сечениям.

Для реализации функции выбора инструмента, предложена модель работы интеллектуального агента, базирующегося на основе нейронной сети, использующей в качестве входных параметров описанные критерии для каждого из возможных инструментов. Нейронная сеть относится к классу сетей Хопфилда с одним скрытым слоем. Обучение

нейронной сети производится на основе информации полученной в результате экспертных оценок по методу обратного распространения. Структура разработанной нейронной сети представлена на рис. 4.

Предложенные алгоритмы реализации интеллектуальных агентов системы поддержки принятия технологических решений позволяют эффективно решать задачи повышения производительности и качества изготовления формообразующей модельной оснастки мелкоразмерным инструментом.



*Рисунок 4 - Структура нейронной сети для выбора инструмента*

Количество итераций, необходимых для выбора инструмента на основе визуализации управляющих программ для станков с числовым программным управлением сокращается с двух-трех до одной, что снижает время технологической подготовки производства в среднем на 20-30%.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ**

1. Предложены критерии позволяющие автоматизировать процесс выбора инструмента для обработки сложных поверхностей.
2. Разработан алгоритм моделирования результатов обработки различными инструментами.
3. Создан программный комплекс для выбора инструмента по реальной поверхности, использующий метод нейронных сетей.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Основы построения нейронных сетей : учеб. пособие / В. М. Давыдов, Е. С. Бойко. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2005. – 67 с.
- 2 Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография К.: Растиа, 2001. – 592с.
- 3 Решетникова О. В. Интеллектуальная система выбора параметров сопрягаемых поверхностей деталей на стадии проектирования / В. М. Давыдов, О. В. Решетникова // Конструкторско-технологическая инфор-

матика – 2005 : Труды конгресса. V международный конгресс. – М. : ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2005. – С.112-115.

4 Дунин-Барковский И.В., Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхностей. М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

**Давыдов Владимир Михайлович**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы»

Тел. (4212) 375257

E-mail: davellut@mail.ru

**Никитенко Александр Васильевич**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Аспирант кафедры «Технологическая информатика и информационные системы»

Тел. (4212) 375257

E-mail: a.v.nikitenko@mail.ru

УДК 621.923.01

А.В. СОПЕЛЬЦЕВ

**ТЕПЛОФИЗИКА ПРОЦЕССА ОБДИРОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*На основе теплофизических моделей, разработанных для финишных операций шлифования, путем адаптации входных параметров модели к условиям обдирочного шлифования, произведен расчет и анализ температурных полей и полей самоподогрева детали при прохождении зоны контакта шлифовального круга и заготовки.*

*Based on thermal models developed for the finishing operations, grinding, by adapting the model input parameters to the conditions of roughing grinding, a calculation and analysis of the temperature fields and self-heating temperature fields detail of the passage of the contact zone of the grinding wheel and of preparation.*

*Ключевые слова: теплофизическая модель, температура самоподогрева, температурное поле, интенсивность тепловыделения.*

*Keywords: thermal model, self-heating temperature fields, temperature field, the intensity of heat.*

В настоящее время обдирочное шлифование применяется как основной метод зачистки заготовок в машиностроении и слитков в металлургии. При обдирке используют два метода зачистки: сплошная и местная (выборка местных дефектов). Характерными особенностями данного вида шлифования являются:

- высокая производительность, здесь съем металла доходит до нескольких тонн в час;
- неравномерность припусков при обработке;
- неравномерность свойств поверхностного слоя материала заготовки.
- высокая температура в зоне контакта.

При определении температуры в зоне контакта шлифовального круга и заготовки в процессах шлифования широкое распространение получила теплофизическая модель С.Н. Корчака [1]. Им предложена зависимость (1), которая описывает температуру в любой точке по глубине поверхностного слоя детали в любое время (в пределах зоны контакта) с учетом непрерывно меняющейся остаточной температуры, «наследственно» полученной от действия любого количества ранее работавших зерен.

$$U(x, t) = U_0 + \frac{2q}{\sqrt{\lambda c \rho}} \left( \sum_{k=1}^n \sqrt{t - T_k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\kappa(t - T_k)}} H(t - T_k) - \sqrt{t - \tau - T_k} \operatorname{ierfc} \frac{x}{\sqrt{4\kappa(t - \tau - T_k)}} H(t - \tau - T_k) \right), \quad (1)$$

где  $x$  — глубина рассматриваемого слоя детали;  $t$  — рассматриваемый момент времени;  $U_0$  — исходная температура материала;  $\lambda$  — теплопроводность материала;  $q$  — интенсивность теплового источника;  $c$  — теплоемкость материала;  $\operatorname{ierfc}$  — интегральная функция Хартри первого порядка;  $T_k$  — начало, окончание действия теплового источника;  $\tau$  — время действия теплового источника;  $H(x)$  — единичная функция Хевисайда.

Свое дальнейшее развитие теплофизическая модель С.Н. Корчака получила в работе А.А. Дьяконова [2], в которой реализована дискретная схема контакта шлифовального круга и заготовки, а также учтен вероятностный характер расположения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Следует отметить, что приведенные выше теплофизические модели, разработаны для финишных операций шлифования, и не могут напрямую использоваться при расчете температур в условиях обдирочного шлифования.

Необходимо провести адаптацию теплофизической модели к условиям обдирочного шлифования.

Параметрическая настройка необходима по двум направлениям:

- геометрия зоны шлифования;
- интенсивность теплового источника – режущего абразивного зерна.

Производим перерасчет длины дуги контакта шлифовального круга и заготовки применительно к условиям обдирочного шлифования. Также производим расчет длины развертки шлифовального круга и число рабочих зерен на ней.

После получения данных о величине развертки круга и количества рабочих зерен, производится перерасчет интенсивности тепловыделения единичного источника в условиях обдирочного шлифования. Данный пересчет необходим, так как толщина среза единичным зерном при обычном шлифовании составляет 0,005 мм, а при обдирочном шлифовании 0,1 мм, что на порядки выше.

А.В. Мурдасовым [3] установлено, что для обдирочного шлифования глубина внедрения абразивных зерен лежит в пределах 0,02...0,2 мм. Тогда, при  $a_{cp} = 0,1$  мм интенсивность тепловыделения для обдирочного шлифования составит:

$$q_0 = \frac{Q}{S} \approx 1,79 v_k \cdot \sigma_i. \quad (2)$$

где  $q_0$  — интенсивность тепловыделения единичного источника;  $Q$  — интенсивность источника на всей площади действия;  $S$  — площадь действия;  $v_k$  — скорость вращения круга.

Следовательно, интенсивность тепловыделения при обдирочном шлифовании в более чем в 4 раза больше, чем при круглом шлифовании.

Повышенная интенсивность тепловыделения наглядно подтверждена расчетом температурных полей при обдирочном шлифовании.

Модифицированная таким образом теплофизическая модель взята в основу при расчете температурных полей и полей самоподогрева при обдирочном шлифовании для различных материалов.

Используя данные расчета и системы графического отображения данных, формируем графики температурных полей, характерных обдирочному шлифованию для имеющейся номенклатуры материалов, а именно 42 марок сталей.

Примеры типовых графиков приведены на рисунке 1.

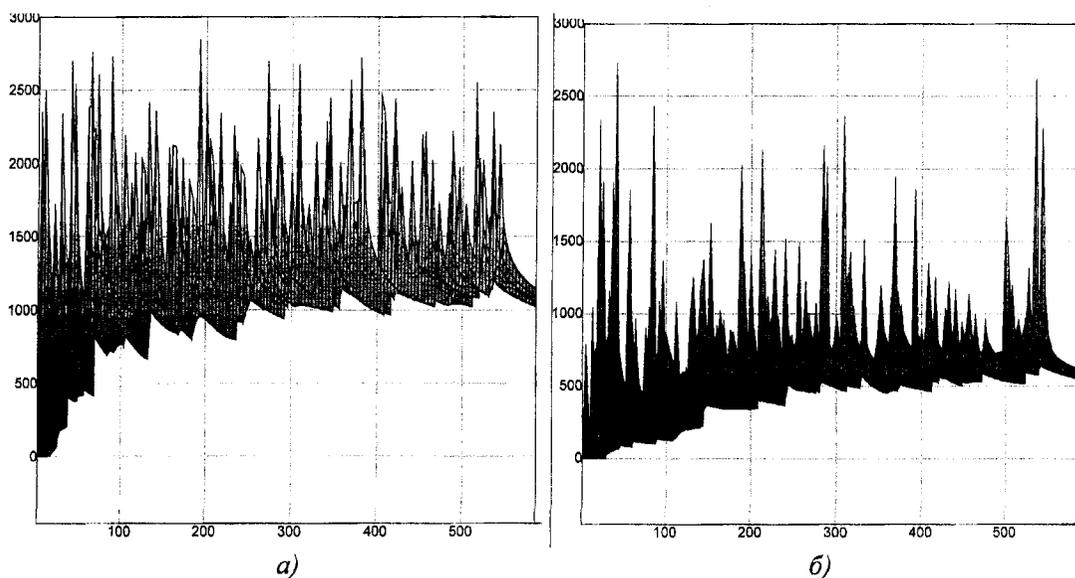


Рисунок 1 – Вид температурного поля в условиях обдирочного шлифования:  
а) - стали 11М5Ф-Ш, б) - стали 38ХС

Далее получаем графики температур самоподогрева, то есть фактически определяем, насколько прогревается поверхность обрабатываемой детали за время воздействия известной развертки круга. Данные графики получаются выборкой значений температуры перед каждым зерном на развертке шлифовального круга из всего температурного поля, полученного для каждого материала.

На рисунке 2 приведены примеры полей температур самоподогрева.

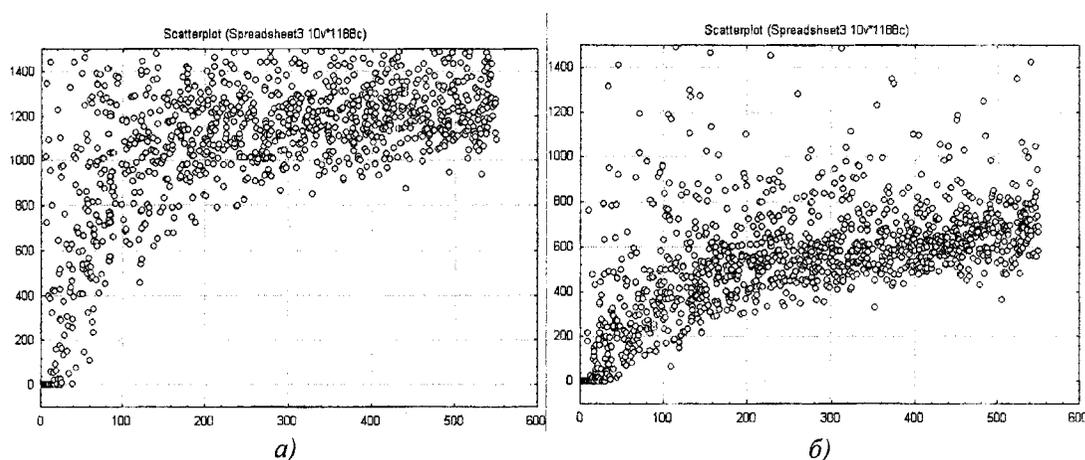


Рисунок 2 – Поле температуры самоподогрева в условиях обдирочного шлифования  
а) - стали 11М5Ф-Ш, б) - стали 38ХС

Таким образом, рассчитаны температурные поля и температуры самоподогрева выборки из 42 марок сталей в условиях обдирочного шлифования. По результатам расчета и графического анализа можно сделать следующие выводы:

1. Температурные поля заготовок представляют собой пикообразную диаграмму с максимумами в районе температуры плавления материалов.
2. Температуры самоподогрева детали находятся в районе 600...800<sup>0</sup>С.
3. Поля температур самоподогрева по виду графика можно подразделить на графики соответствующие: конструкционным сталям, характеризуются практически прямолинейным

нагревом; легированным сталям, характеризуются более высокой скоростью нагрева, а затем стабилизацией температуры; быстрорежущим сталям, характеризующимся резким нагревом до значительных температур с дальнейшей стабилизацией.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
- 2 Дьяконов, А.А. Оценка обрабатываемости материалов в процессах шлифования: дис...канд. техн. наук: 05.03.01 / Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск, 2006. — 266 с.
- 3 Мурдасов, А.В. Исследование процесса обдирочного шлифования проката: дис...канд. техн. наук. / Уральский филиал Всесоюзного научно исследовательского института абразивов и шлифования. – Челябинск, 1968.

**Сопельцев Алексей Васильевич**

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Аспирант кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (912) 7979707

E-mail: [Magistr7771@yandex.ru](mailto:Magistr7771@yandex.ru)

УДК 621.9

**А.Н. Шоев**

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ФОРМЫ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КУЛАЧКОВ**

*В статье рассмотрены вопросы технологического обеспечения выпуклой формы рабочей поверхности трения кулачков, обеспечивающих повышение их долговечности.*

*Ключевые слова:* кулачок; форма поверхности; технология.

*In article questions of technological maintenance of the convex form of a working surface of friction of the cams providing increase of their durability are considered.*

*Key words:* a cam; the form of a surface; technology.

Существует много методов, способствующих увеличению срока службы деталей. Например, если отдельные участки детали работают в разных условиях, то может применяться принцип местного улучшения качества. Это положение в свою очередь может также обеспечиваться различными термическими и термохимическими процессами (закалка, цианирование, цементация и т.д.), напылением (разные металлы, пластмассы), гальваническим методом, местным упрочнением и другими способами. Однако, в настоящее время мало используется принцип преднамеренного отклонения от правильной геометрической формы детали, хотя он таит в себе значительный резерв в повышении их долговечности. Это относится, прежде всего к деталям, отдельные участки рабочей поверхности трения которых, работают при различных скоростях и давлениях. Например, рабочие поверхности кулачков, имеющих прямолинейный продольный профиль. Образуется концентрация напряжений по краям, приводящая к ускоренному усталостному разрушению в этих зонах. Введение радиусов, скосов и выпуклости значительно снижает концентрацию напряжений, что позволяет увеличить срок службы. Это говорит о том, что для повышения долговечности кулачков при их окончательной обработке их продольному профилю надо придать выпуклую форму, обеспечивающую равномерное давление при трении.

В промышленности находит большое применение обработка деталей бесконечными лентами.

При обработке бесконечными лентами, когда ее ширина перекрывает ширину кулачка, образованию закруглений и выпуклости обрабатываемой детали, кроме рассмотренной выше неравномерности давления между инструментом и деталью (жесткий штамп и упругая полуплоскость), должны способствовать упругие свойства ленты за счет усилия ее натяжения. Это, в свою очередь, должно приводить к более быстрому образованию закруглений и выпуклой формы кулачка (рис. 1).

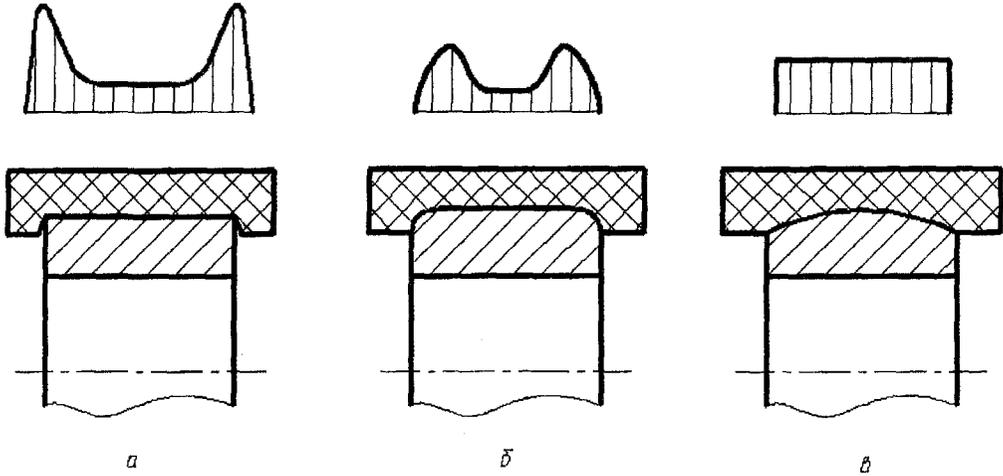


Рисунок 1 - Распределение давления между эластичным инструментом и деталью:  
 а) – в начале обработки; б) – после образования закруглений;  
 в) – после образования выпуклой формы

Для проверки данного рассуждения и установления зависимости между технологическими факторами и величиной закругления и выпуклости детали, были проведены эксперименты по обработке образцов кулачков алмазными бесконечными эластичными лентами АСО 80/63-Р9-100%.

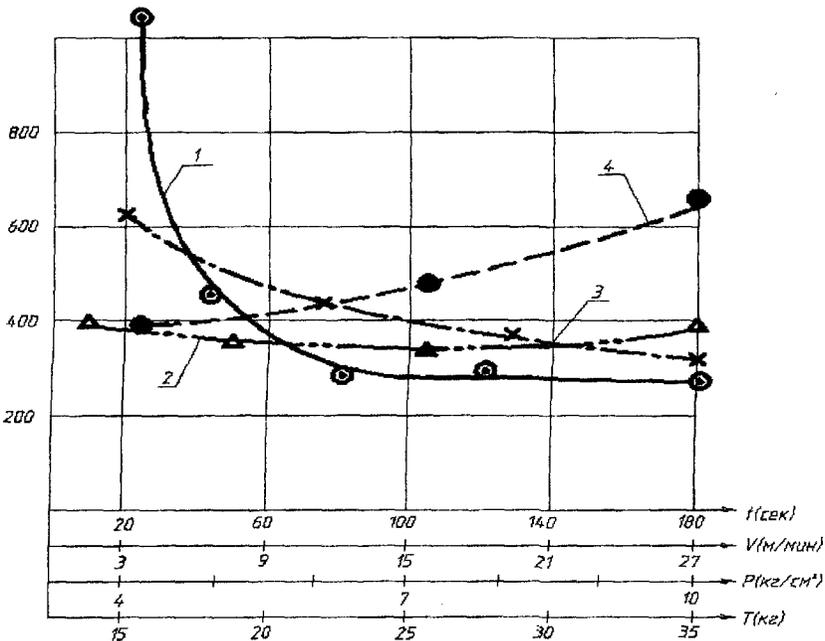
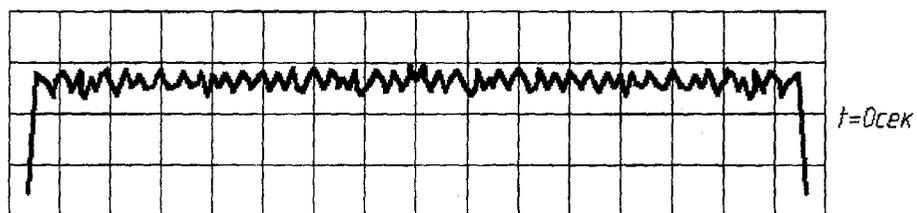
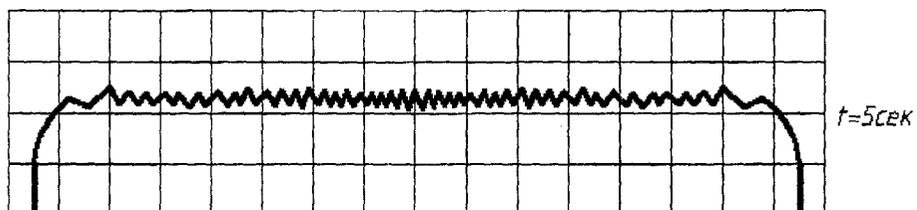


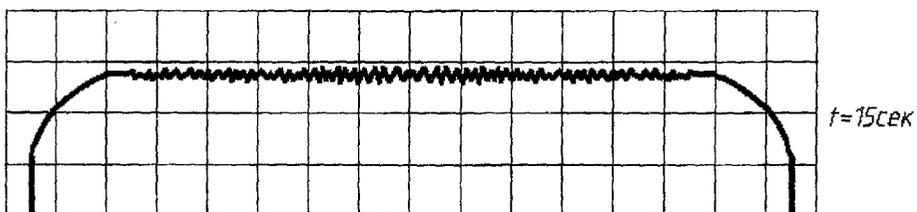
Рисунок 2 - Зависимость величины выпуклости продольного профиля образцов от времени обработки (1), скорости вращения детали (2), силы прижатия ленты к детали (3), и усилия натяжения ленты (4)



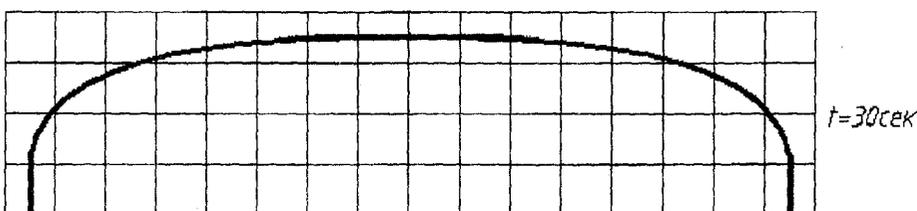
а



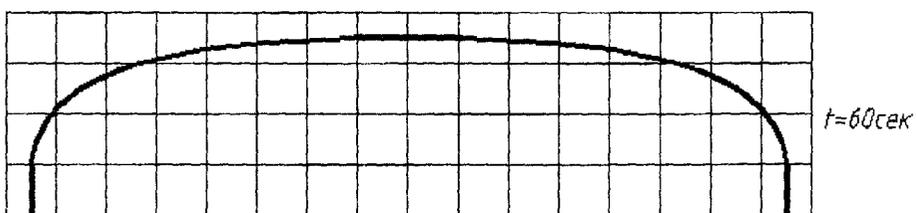
б



в



г



д

Рисунок 3 - Формирование выпуклой формы образцов при обработке бесконечными лентами АОС 80/63-Р9-100%. Режимы обработки:  $P = 5 \text{ Па}$ ;  $V_l = 35 \text{ м/сек}$ ;  $V_d = 30 \text{ м/мин}$ ;  $(BV = 1000; \Gamma V = 8)$

На первом этапе исследований проводились однофакторные эксперименты.

Обработка бесконечными лентами производилась на специальном приспособлении, устанавливаемом на поперечном суппорте токарного станка мод. 162.

Технологические факторы обработки изменялись в интервалах: время обработки от 20 сек до 80 сек, давление эластичной ленты и обрабатываемой детали – от 2 Па до 8 Па, величина удельного натяжения ленты – от 37 Па до 125 Па, скорость вращения детали – от 1,7 м/мин до 27 м/мин; скорость вращения ленты – от 19 м/сек. Обработка образцов производилась при обильном охлаждении СОЖ.

При обработке применялись бесшовные алмазные ленты, которые при обработке подвигались к образцам симметрично их поверхности.

До и после обработки с поверхности образцов снимали профилограммы макроотклонений на профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр». По профилограммам определили величину  $H$  (рис. 2) и определили радиус  $R$  выпуклости по формуле:

$$R = L^2BY / 8nГУ,$$

где:  $L = 2A$  – ширина обрабатываемой поверхности детали.

Результаты экспериментов даны в табл. 1 и построены графики (рис. 2), из которых видно, что все технологические факторы, кроме скорости вращения детали, существенно влияют на формирование радиусов закруглений и выпуклости. Из профилограммы (рис. 3) макроотклонений видно, что обработка бесконечными лентами приводит к более быстрому образованию закруглений и выпуклой формы, чем при обработке конечными. Так, например, при обработке лентой АСО 80/63-Р9-100% ( $P = 5$  Па;  $V_l=35$  м/сек;  $V_d=30$  м/мин) выпуклая форма образуется уже при времени обработки бесконечными лентами около 30 сек. Однако при времени давлении ленты к детали  $P < 4$  Па, времени обработки  $t=40$  сек и усилия натяжения ленты  $T=250$  Н на поверхности обработанной детали образуются только закругления. Деталь не приобретает выпуклой формы и при больших усилиях натяжения ленты. Так при усилиях натяжения ленты соответствующей  $T=490$  Н, времени обработки  $t=40$  сек и усилия прижатия ленты к детали, равной  $P=6$  Па, выпуклой формы на поверхности детали не образуется. Это объясняется тем, что при больших усилиях натяжения ленты, происходит наименьшее влияние ее упругих свойств во время обработки детали.

Таблица 1 - Размеры профильной формы

| Постоянные факторы                        | Переменный фактор | Величина макроотклонения    |            |
|---|-------------------|-----------------------------|------------|
|   |                   | Закругление детали<br>г, мм | Выпуклость |
| $t=40$ сек<br>$V_d=24$ м/мин<br>$T=25$ кг | $y=f(P)$          |                             |            |
|   | 2 Па              | 1,75                        | -          |
|   | 4 Па              | -                           | 620±18     |
|   | 6 Па              | -                           | 444±24     |
|   | 8 Па              | -                           | 369±66     |
|   | 10 Па             | -                           | 310±47     |
| $P=6$ Па<br>$V_d=24$ м/мин                | $y=f(t)$          |                             |            |
|   | 20 сек            | -                           | 1039±54    |

|             |            |     |        |
|-------------|------------|-----|--------|
| T=25 кг     | 40 сек     | -   | 450±33 |
|             | 80 сек     | -   | 273±39 |
|             | 120 сек    | -   | 275±20 |
|             | 180 сек    | -   | 263±22 |
| t=40 сек    | y=f(T)     |     |        |
| P=6 Па      | 49 кг      | 2,1 | -      |
| Vд=24 м/мин | 35 кг      | -   | 656±26 |
|             | 25 кг      | -   | 275±25 |
|             | 15 кг      | -   | 263±28 |
| t=40 сек    | y=f(Vд)    |     |        |
| P=6 Па      | 1,7 м/мин  | -   | 394±27 |
| T=25 кг     | 7,2 м/мин  | -   | 375±18 |
|             | 18,6 м/мин | -   | 400±38 |
|             | 27 м/мин   | -   | 392±24 |

Для определения совместного влияния технологических факторов при полировании на величину выпуклости образцов кулачка составлена матрица 2К полного факторного эксперимента табл. 2, в которую были включены следующие три (K=3) фактора: время обработки (t, сек), давление прижатия ленты и детали (P, Па) и усилие натяжения ленты (T, кг).

Таблица 2

| Переменные            | Факторы |       |      | Величина выпуклости детали R, мм |
|-----------------------|---------|-------|------|----------------------------------|
|                       | t, сек  | P, Па | T, Н |                                  |
| Основной уровень      | 50      | 7     | 250  |                                  |
| Интервал варьирования | 30      | 3     | 100  |                                  |
| Верхний уровень       | 80      | 10    | 350  |                                  |
| Нижний уровень        | 20      | 4     | 150  |                                  |
| Код фактора           | X1      | X2    | X3   |                                  |
| Опыт 1                | +       | +     | +    | 360                              |
| Опыт 2                | -       | +     | +    | 1140                             |
| Опыт 3                | +       | -     | +    | 640                              |

|        |   |   |   |      |
|--------|---|---|---|------|
| Опыт 4 | - | - | + | 1450 |
| Опыт 5 | + | + | - | 80   |
| Опыт 6 | - | + | - | 860  |
| Опыт 7 | + | - | - | 370  |
| Опыт 8 | - | - | - | 1120 |

Сделав математические преобразования и заменив  $y$  на  $R$ , получим зависимость величины выпуклости от технологических факторов обработки, мм:

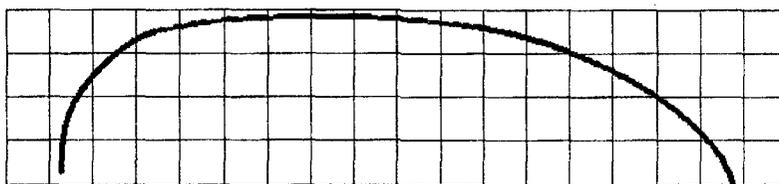
$$R = 1373 - 13x_1 - 47,5x_2 + 145x_3, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  следует подставлять в натуральном масштабе.

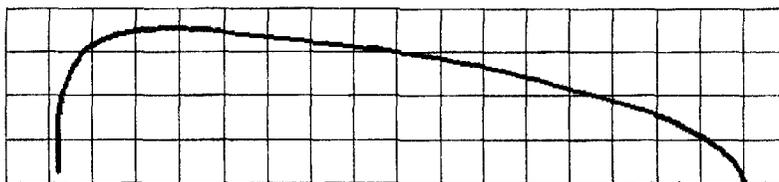
Величина коэффициента при кодированных факторах (1) соответствует вкладу данного фактора на величину выпуклости детали ( $R$ ) при переходе фактора с нулевого уровня на верхний или нижний. Результаты ранжирования технологических факторов ( $t, P, T$ ) показали, что влияние времени обработки примерно в 2,7 раза больше влияния остальных факторов.

Ранее было отмечено, что при проведении эксперимента применялись бесшовные ленты, симметрично подводимые к детали. Однако в промышленности довольно часто применяются клееные ленты, обработка которыми, как показали эксперименты, может приводить к образованию а поверхности детали различных макроотклонений (рис. 4, г, д) или волнистости с большим шагом волн (рис. 4, в). Однако, наблюдается для лент с неподготовленными швами. Поэтому для избежания указанных нежелательных макроотклонений или волнистости в местах клейки лент удаляются дефектные (выпуклые) участки алмазного слоя.

Несимметричное расположение ленты относительно обрабатываемого кулачка приводит к образованию на его поверхности неправильной выпуклой формы, т.е. наблюдается конусность (рис. 4, а, б). Значение конусности находится в прямой зависимости от величины несимметричности расположения ленты относительно детали.



а



б

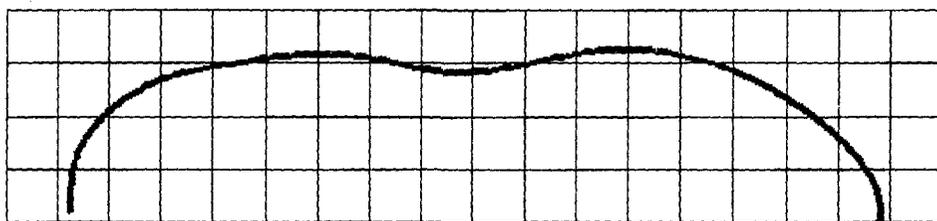
Рисунок 4 - Формирование выпуклой формы кулачка при обработке бесконечными лентами АСО 80/63-Р9-100%. Режимы обработки:  $P = 5 \text{ Па.}; V_l = 35 \text{ м/сек}; V_d = 30 \text{ м/мин}; (B\gamma = 1000; \Gamma\gamma = 8)$ .



б



з



д

Рисунок 4 - Формирование выпуклой формы кулачка при обработке бесконечными лентами АСО 80/63-Р9-100%. Режимы обработки:  $P = 5 \text{ Па}$ ;  $V_l = 35 \text{ м/сек}$ ;  $V_d = 30 \text{ м/мин}$ ; ( $BV = 1000$ ;  $\Gamma Y = 8$ ).

Шоев Алмосшо Наботович  
Филиал Технологического университета Таджикистана, г. Кулябе  
Тел: (+992-37) 2347988  
E-mail: [tut-rectorat@tojikiston.com](mailto:tut-rectorat@tojikiston.com)

# КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.775.2

А.Н. ВАСИН, П.Ю. БОЧКАРЕВ, А.П. БОЧКАРЕВ

## ТРИ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛЫХ ТЕЛ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

*В статье рассматриваются основные задачи, с которыми сталкиваются при постановке на производство узлов качения нового поколения и предлагаются варианты их решения. Эти задачи лежат в основном в трех плоскостях – метод получения заготовок полых сфер без применения сборочных операций; определение толщины стенки полого шарика и метод механической обработки, обеспечивающий заданную точность и производительность.*

**Ключевые слова:** полая сфера, толщина стенки, заготовка, метод обработки

*In article are considered primary tasks, with which face when stating on production of the nodes of the swing of the new generation and are offered variants of their decision. These problems lies basically in three planes - a method of the reception of the stocking up flap spheres without using adjustment operation; the determination of the thickness of the wall flap ball and method of the mechanical processing, providing given accuracy and capacity.*

**Keywords:** flight sphere, thickness of the wall, stocking up, method of the processing

Появление новых отраслей техники, нуждающиеся в высокоточных подшипниках с большим сроком службы (10000 ч. и более) и высоким уровнем надежности (99,9 % и выше), поставило перед подшипниковой промышленностью задачу создания новых конструктивных разновидностей узлов качения, отвечающим этим требованиям. Примером могут служить подшипники с полыми телами качения – полыми шариками. Эти подшипники, по сравнению с аналогичными традиционными подшипниками со сплошными шариками, имеют ряд преимуществ: обладают меньшей массой, что обуславливает их применение в авиастроении и космической технике; более быстроходны, малозумны; имеют меньший момент срагивания.

Однако наряду с преимуществами эти подшипники имеют и свои недостатки. Они выдерживают меньшую нагрузку и, что более всего сдерживает их применение, довольно сложны в изготовлении. В последнее время в связи с совершенствованием технологического оборудования и появления новых методов обработки, подшипники с полыми телами качения вновь привлекли к себе внимание.

Одной из основных причин разрушения полых тел качения является сборность их конструкции, т.к. заготовка полого шарика получается из 2-х или более элементов, собираемых, чаще всего, с помощью сварки. Разрушение шарика начинается, как правило, из-за выкрашивания или появления трещин в местах сварки.

Поэтому первой задачей, с которой сталкиваются разработчики – как уйти от сборности конструкции заготовки полого шарика. Одним из решений этого видится в изготовлении полого бесшовного шарика [1, 2].

Второй важной задачей при создании полых конструкций является определение толщины стенки шарика, способной выдерживать заданные нагрузки. Для этого воспользуемся теорией оболочек.

Цолли и Лейбензон используя нелинейную теорию тонких оболочек показали, что сферическая оболочка должна терять устойчивость при достижении следующих критических напряжений:

$$\sigma_{кр}^{мин} = \frac{PR}{2h} = \left[ 3(1-\nu^2) \right]^{\frac{1}{2}} \frac{Eh}{R},$$

где  $P$  – внешнее давление на оболочку;

$R$  – радиус оболочки;

$h$  – толщина оболочки;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль Юнга.

Для частного случая  $\nu = 0,3$ , получаются известные классические формулы для критических напряжений и критической нагрузки:

$$\sigma_{кр}^{мин} = 0,606 \frac{Eh}{R}; P_{кр}^{мин} = 1,212 \frac{Eh^2}{R^2}.$$

На основании формулы Цолли-Лейбензона и проведенных испытаний предложена следующая полумпирическая формула для вычисления критических значений внешнего давления в случае, когда оболочка деформируется упругим образом:

$$P_{кр} = \frac{0,84E}{\sqrt{1-\nu^2}} \left( \frac{h}{R_H} \right)^2 = 0,84E \left( \frac{h}{R_H} \right)^2 \text{ при } \nu = 0,3,$$

где  $R_H$  есть радиус кривизны наружной поверхности оболочки.

Если же при потере устойчивости оболочка деформируется упругопластическим образом, то в эту формулу в соответствии с теоретическими исследованиями вводится поправочный множитель  $\sqrt{E_c E_T / E^2}$ , где  $E_c$  и  $E_T$  – секущий и касательный модули упругости. В этом случае, окончательно получаем:

$$P_{кр}^* = \sqrt{\frac{E_c E_T}{E^2}} P_{кр} = 0,8 \sqrt{\frac{E_c E_T}{1-\nu^2}} \left( \frac{h}{R_H} \right)^2.$$

В случае если оболочка имеет начальные несовершенства (утонения или участки с другой кривизной), то для вычисления критической нагрузки предлагается использовать формулу, приведенную ниже:

нижняя критическая нагрузка для испытанных оболочек в среднем составила:

$$P_H = 0,095 \cdot 2E \left( \frac{h}{R} \right)^2.$$

Величины верхней критической нагрузки имели значительный разброс и составили:

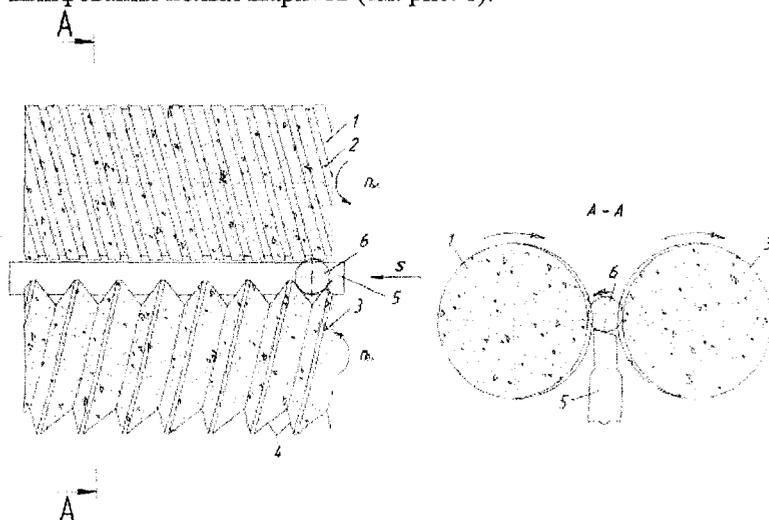
$$P_o = k \cdot 2E \left( \frac{h}{R} \right)^2,$$

где  $k = 0,150 \div 0,536$ .

Таким образом, зная величину нагружения полых опор качения, можно рассчитать и необходимую толщину их стенок.

Третья задача, которая возникает в процессе изготовления полых сферических тел качения – техническая неподготовленность современного шарообработывающего оборудования к серийному производству нежестких тел качения. Разработанные к настоящему времени способы и устройства, можно условно разделить на две крупные группы, принципиально отличающиеся по схемам обработки. К одной группе можно отнести способы и устройства, основанные на дисковой схеме обработки, ко второй – способы и устройства, использующие бесцентровую схему обработки сферических тел. В подавляющем большинстве предприятия подшипниковой промышленности, выпускающие подшипники качения с традиционными сплошными телами качения, используют дисковую схему. Однако к слабым местам такой схемы можно отнести высокое давление в зоне резания, необходимое для интенсификации снятия припуска и невозможность управлять величиной и расположением получаемой развертки сферы. В связи с этим, для обработки небольших партий полых шариков гораздо выгоднее использовать универсальное оборудование.

Методы бесцентровой обработки, в силу присущей им технологической гибкости, имеют распространение в основном в среднесерийном, мелкосерийном и единичном производствах. Большинство из известных способов реализуется на бесцентрово-шлифовальных станках после их некоторой модернизации – замены штатных шлифовальных и ведущих кругов на специальные, изменения конструкции опорного ножа, приводов станка и т. д. Однако рационального сочетания точности, качества и производительности не удалось обнаружить ни в одном из известных методов и устройств. В связи с этим предлагается к использованию новый способ шлифования полых шариков (см. рис. 1).



**Рисунок 1 – Схема способа обработки шарика:**

1 – шлифовальный круг; 2 – винтовая канавка; 3 – ведущий круг; 4 – винтовая V-образная канавка; 5 – опорный нож; 6 – обрабатываемый шарик

При прохождении обрабатываемым шариком зоны винтовой канавки шлифовального круга, происходит прерывание его контакта со шлифующими участками, шарик освобождается от действия на него сил резания, происходит изменение динамического состояния технологической системы и мгновенный разворот шарика на некоторый угол, величина которого зависит от многих как систематических, так и случайных факторов. После прохождения шариком зоны винтовой канавки на шлифовальном круге он вступает в контакт со следующим шлифующим участком, что опять приводит к появлению натяга в технологической системе, изменению ее динамического состояния и развороту шарика, но уже под действием сил резания. Таким образом, регулируемое чередование контактных и бесконтактных участков в процессе шлифования позволяет за один проход обработать всю поверхность сферы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Патент РФ № 2212979. Способ изготовления полых монолитных деталей. П.Ю. Бочкарев // БИ. 2003. № 27.
- 2 Васин А.Н., Бочкарев П.Ю. Получение заготовок полых тел качения // Технология машиностроения. – 2004. – № 4 (28). – С. 3-6.

**Васин Алексей Николаевич**

Саратовский государственный технический университет, г. Саратов

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (845-2) 99-87-90

E-mail: Vasin@sstu.ru

**Бочкарев Петр Юрьевич**

Саратовский государственный технический университет, г. Саратов

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов»

Тел. (845-2)52-53-45

E-mail: bpy@mail.ru

**Бочкарев Антон Петрович**

Саратовский государственный технический университет, г. Саратов

Магистрант направления «Технологические машины и оборудование».

УДК: 621. 923

А.И. ГОРДИЕНКО, М.Л. ХЕЙФЕЦ, Н.Л. ГРЕЦКИЙ

## **ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА НАНЕСЕНИЯ ФЕРРОПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*Предложена электрическая схема установки, для упрочнения деталей, позволяющая исследовать влияние фазового угла смещения между напряжением, питающим электромагнитную катушку, и напряжением, питающим сварочный трансформатор на стабильность формирования покрытий ферропорошками в электромагнитном поле. Рассмотрены технологии упрочнения и конструкции полюсных наконечников, позволяющие повысить качество покрытий формируемых ферромагнитными порошками. Установлено, что наиболее благоприятные условия для максимального переноса ферропорошка на поверхность детали и очистки рабочего зазора от продуктов эрозии и частиц ферропорошка не участвовавших в разрядах складываются под действием вибрации полюсного наконечника, когда частота и фаза следования импульсов напряжений в цепях технологического тока и электромагнитной катушки совпадают.*

**Ключевые слова:** Электромагнитное поле, ферропорошок, упрочнение и восстановление деталей.

*The electric circuit connection of installation, for hardening the details is offered, allowing to investigate influence of a phase corner of displacement between the pressure having the electromagnetic coil, and the pressure having the welding transformer on stability of formation of coverings Fe-powder in an electromagnetic field. Technologies of hardening and a design of the polar tips are considered, allowing to raise quality of coverings formed by ferromagnetic powders. It is established, that optimum conditions for the maximal carry Fe-powder on a surface of a detail and clearing of a working backlash of products of erosion and particles of grains Fe-powder not participating in categories develop under action of vibration of a polar tip when frequency and a phase of following of pulses of pressure in circuits of a technological current and the electromagnetic coil coincide.*

**Key words:** electromagnetic field, iron powder, reinforcement and recovery of details.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Повышение надежности и долговечности деталей машин, во многом определяется состоянием их поверхностного слоя [1]. Основными причинами потери работоспособности узлов и механизмов являются изнашивание и усталостные поломки деталей, их разрушение вследствие ползучести, коррозия, эрозия в различных средах, кавитационное разрушение и всевозможные сочетания этих причин. Свыше 80% отказов обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, в которых изнашивание играет доминирующую роль. Износ деталей различных групп по элементам составляет: 52% - цилиндрические поверхности; 3% - конические и сферические; 1% - плоские; 1% - профильные и фасонные; 2% - зубья и шестерни; 3% - шлицы; 5% - пазы; 10% - резьбы. Причем 13% поверхностей имеют нарушение макрогеометрии и формы; трещины и изломы обнаружены у 9% деталей [2]. По-

этому актуальными являются как разработка новых, так и совершенствование известных методов восстановления.

При восстановлении поверхностей деталей машин используют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Наиболее перспективными являются электрофизические методы, использующие энергию электромагнитного поля [3]. Одним из таких ресурсосберегающих методов является электромагнитная наплавка [2].

### ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Существуют различные устройства для реализации процесса. Наиболее просты двухполюсные и однополюсные установки для упрочнения деталей в магнитном поле. При упрочнении на двухполюсной установке деталь располагается между двумя торцами сердечников электромагнита, имеющими разноименную магнитную полярность, а при упрочнении на однополюсной установке – вблизи одного торца сердечника электромагнита. Процесс упрочнения в большинстве случаев имеет низкую стабильность, обусловленную тем, что в рабочих зазорах часто происходит спекание массы ферропорошка и источник технологического тока переходит в режим короткого замыкания.

С целью повышения качества формирования покрытий в электромагнитном поле разработаны установки, позволяющие реализовать импульсное механическое воздействие полюсного наконечника на формируемый участок покрытия (рисунок 1-3). Устройства (рисунок 2, 3) кроме возвратно-поступательного движения полюсного наконечника обеспечивают его вращение. Дополнительное вращение полюсного наконечника способствует лучшей очистке рабочего зазора от частиц ферропорошка, не участвовавшего в предыдущих разрядах и от продуктов эрозии в твердой фазе, что повышает стабильность образования токопроводящих цепочек, увеличение переноса капель расплава порошка на поверхность детали, повышение стойкости полюсного наконечника.

Работу устройства с импульсным механическим воздействием можно пояснить на примере упрочнения наружной поверхности вращения (рисунок 1). Деталь 1 помещают с некоторым зазором  $\delta_1$  вблизи полюсного наконечника 2, который укреплен на пластинчатой пружине 3. Между полюсным наконечником и сердечником 4 электромагнита имеется воздушный промежуток  $\delta_2$ . Деталь через скользящий контакт 5 подключают к отрицательному, а полюсный наконечник – к положительному полюсу источника технологического тока. В качестве источника тока может быть принят один из типов сварочных трансформаторов с выпрямляющим устройством, обеспечивающим однополупериодное выпрямление напряжения в его вторичной цепи. Электромагнитная катушка 6 питается выпрямленным по однополупериодной схеме током от промышленной сети. При вращении детали в рабочий зазор из бункерного дозирующего устройства 7 с определенным расходом непрерывно подают ферромагнитный порошок 8. Ориентируясь в зазорах вдоль магнитных силовых линий, зерна ферропорошка образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между сердечниками и деталью. Под действием электрической эрозии в результате происходящих разрядов часть материала ферропорошка переносится на упрочняемую поверхность.

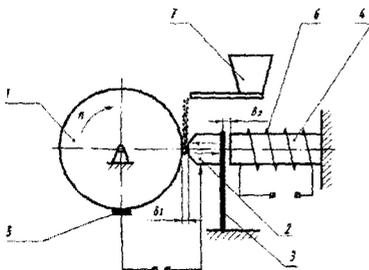


Рисунок 1 - Схема упрочнения поверхности вращения детали ферропорошками в пульсирующем магнитном поле при вибрации полюсного наконечника:

1 – деталь; 2 – полюсный наконечник; 3 – пластинчатая пружина; 4 – сердечник; 5 – скользящий контакт; 6 – электромагнитная катушка; 7 – дозирующее устройство

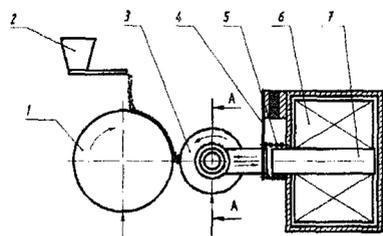


Рисунок 2 - Устройство с самовращающимся осциллирующим наконечником:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – дозирующее устройство; 3 – самовращающийся наконечник; 4 – гибкая металлическая пластина; 5 – пружина; 6 – электромагнитная катушка; 7 – сердечник

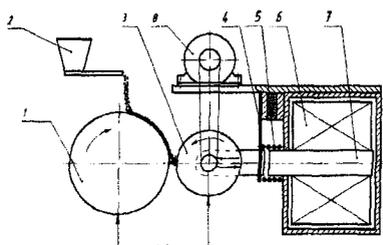


Рисунок 3 - Устройство с принудительно вращающимся осциллирующим наконечником:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – дозирующее устройство; 3 – самовращающийся наконечник; 4 – гибкая металлическая пластина; 5 – пружина; 6 – электромагнитная катушка; 7 – сердечник; 8 – электродвигатель

Рабочая поверхность полюсного наконечника для снижения энергопотребления может выполняться с пазами.

Гладкая поверхность полюсного наконечника, при использовании конструкции для принудительного вращения, обеспечивает увеличение сплошности наносимого покрытия за счет сглаживания выступов на его поверхности.

Поперечные пазы увеличивают количество ферропорошка транспортируемого и удерживаемого в рабочем зазоре, что повышает толщину наносимого покрытия.

Продольные пазы на поверхности вращающегося наконечника способствуют концентрации магнитного потока, повышают количество порошка удерживаемого в рабочем зазоре, увеличивают концентрацию энергии разрядного тока, способствуют повышению производительности, стабильности процесса расплавления порошка и его последующего переноса на поверхность детали.

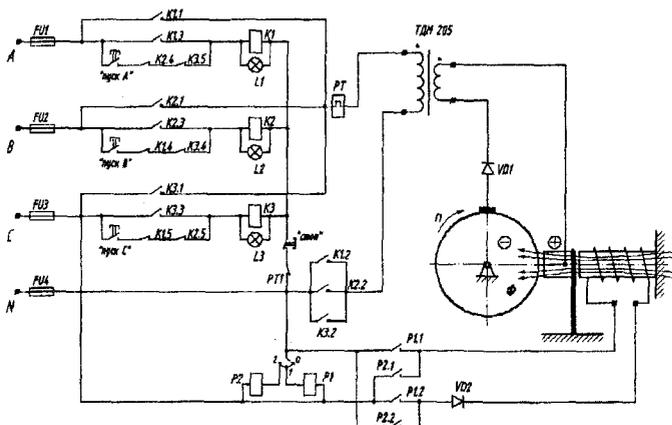


Рисунок 4 - Принципиальная электрическая схема установки для упрочнения поверхности детали ферропорошками в электромагнитном поле

Для повышения стойкости полюсного наконечника и качества формирования покрытий в электромагнитном поле необходимо учитывать направление электрического тока и магнитной индукции и фазовые соотношения напряжений, питающие электромагнитную катушку и сварочный трансформатор.

Наибольший перенос порошка и производительность процесса обеспечивается при подключении установки, когда электрический ток и магнитная индукция имеют направление от полюсного наконечника к детали. [1,2].

Высокая стабильность процесса переноса капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия достигается, когда после завершения электрических разрядов величина магнитной индукции в рабочем зазоре принимает минимально возможное значение. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для очистки рабочего зазора под действием вибрации и вращения полюсного наконечника от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферро-

порошка не участвовавших в разрядах. Одновременно повысить производительность и качество покрытия возможно в случае, если величина магнитной индукции будет уменьшаться от момента начала к моменту завершения электрических разрядов. Электрические разряды должны завершаться к моменту импульсного механического воздействия полусного наконечника на формируемый участок поверхностного слоя детали. Максимальная величина магнитной индукции должна быть близка к значению, при котором наблюдается наибольший перенос материала ферропорошка на поверхность детали.

Для изучения влияния фазового угла смещения между напряжением  $U_k$ , питающим электромагнитную катушку для создания вибрации полусного наконечника и переменного магнитного потока, и напряжением  $U_t$ , питающим сварочный трансформатор, предложена принципиальная электрическая схема (рисунок 4). Источником технологического тока служит сварочный аппарат ТДМ-205 подключаемый к однофазному напряжению 220V. Предохранители FU1...FU4 защищают установку от высокой перегрузки, а тепловое реле РТ от незначительной длительной перегрузки. Контактры К1...К4 и реле P1, P2 обеспечивают различные варианты смещения напряжений  $U_k$  от  $U_t$ . Лампочки L1...L 3 показывают, на какую из фаз включен сварочный трансформатор. Диоды VD1...VD2 обеспечивают однополупериодное напряжение питания.

Предложенная электрическая схема (рисунок 4) позволяет реализовать шесть возможных вариантов фазового смещения напряжений цепи технологического тока относительно напряжения электромагнитной катушки (рисунок 5), когда электрический ток и магнитная индукция имеют направление от полусного наконечника к детали, обеспечивая максимальный перенос капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия.

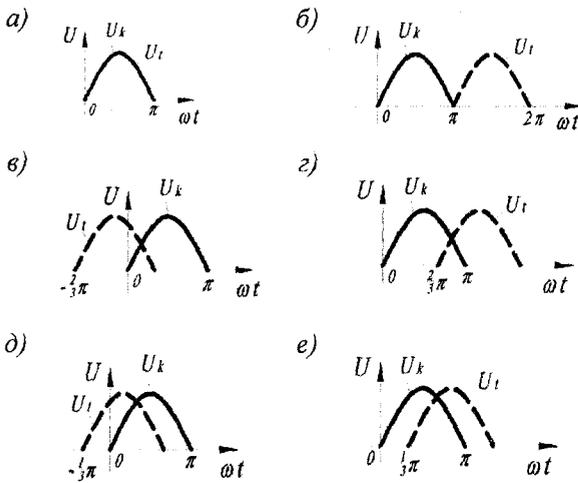


Рисунок 5 - Схемы вариантов фазового смещения напряжения цепи технологического тока  $U_t$  относительно напряжения цепи электромагнитной катушки  $U_k$ :  $\omega$  - угловая частота переменного тока;  $t$  - время

Схема на рисунке 5 (а) позволяет реализовать режим работы установки без фазового смещения (смещение  $- 0^\circ$ ), схема на рисунке 5 (б) обеспечивает режим работы в противофазе (смещение составляет  $180^\circ$ ), схема на рисунке 5 (в) реализует режим с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на  $120^\circ$ , схема на рисунке 5 (г) обеспечивает режим с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на  $120^\circ$ , схема на рисунке 5 (д) реализует режим с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на  $60^\circ$ , схема на рисунке 5 (е) обеспечивает режим с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на  $60^\circ$ .

Определение порядка или последовательности чередования фаз в трехфазной симметричной системе э.д.с. (напряжений) производится с помощью указателя последовательности чередования фаз [4].

На установке для упрочнения деталей в пульсирующем магнитном поле с вибрацией полусного наконечника, подключенной по принципиальной электрической схеме (рис. 4), было обработано для каждого варианта фазового смещения (рис. 5) на одинаковых режимах (разрядный ток до 100А; магнитная индукция в рабочем зазоре 0,6Т; окружная скорость вра-

щения образца 0,3 м/с; рабочий зазор 1,5 мм; зернистость применяемого ферропорошка марки ФБ-1 200...400 мкм; подача ферропорошка в рабочий зазор 17 г/мин [5]) по пять предварительно взвешенных образцов.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УПРОЧНЕНИЯ

Максимальный привес, как образцов, так и полюсных наконечников приходится при упрочнении по варианту 2 (таблица), обеспечивающий режим работы установки со смещением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 180°. Однако при этом процесс идет не стабильно с сильным разогревом поверхностей детали и полюсного наконечника. Не происходит очистка рабочего зазора от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферропорошка не участвовавшего в разрядах. Покрытие образуется пористое, а его соединение с основой слабое из-за неполного расплавления ферропорошков. В результате происходит налипание зерен ферропорошка, как на рабочую поверхность полюсного наконечника, так и на деталь, а резкое уменьшение величины рабочего зазора приводит к короткому замыканию.

Минимальный привес детали, при малой пористости и максимальной сплошности нанесенного покрытия достигается при упрочнении по варианту 3 (таблица), когда напряжение  $U_t$ , питающее сварочный трансформатор, опережает напряжение  $U_k$ , питающее электромагнитную катушку, на угол 120°. Процесс упрочнения так же идет не стабильно. Увеличение длины дуги приводит к росту температуры в рабочем зазоре и, в результате, сильному разогреву поверхности детали и оплавлению рабочей поверхности полюсного наконечника. Оплавление поверхности полюсного наконечника увеличивает рабочий зазор и снижает количество порошка удерживаемого в нем.

Таблица - Результаты упрочнения деталей в пульсирующем магнитном поле с вибрацией полюсного наконечника

| Описание процесса упрочнения  | Поверхность после упрочнения  |  |
|---|---|--|
|   | образца   | полюсного наконечника  |
| 1 без смещения напряжения $U_t$ относительно напряжения $U_k$ (рисунок 5, а).       |  |  |
| 2 смещение напряжения $U_t$ относительно напряжения $U_k$ на 180° (рисунок 5, б).   |  |  |
| 3 опережение напряжения $U_t$ относительно напряжения $U_k$ на 120° (рисунок 5, в). |  |  |
| 4 отставание напряжения $U_t$ относительно напряжения $U_k$ на 120° (рисунок 5, г). |  |  |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p>5 опережение напряжения <math>U_t</math> относительно напряжения <math>U_k</math> на <math>60^\circ</math> (рисунок 5, д).</p> |  |  |
| <p>6 отставание напряжения <math>U_t</math> относительно напряжения <math>U_k</math> на <math>60^\circ</math> (рисунок 5, е).</p> |  |  |

При упрочнении по варианту 5 (таблица), когда напряжение  $U_t$ , питающее сварочный трансформатор, опережает напряжение  $U_k$ , питающее электромагнитную катушку, на угол  $60^\circ$ , процесс происходит более стабильно, но незначительно увеличивается привес детали по сравнению с предыдущим вариантом. Однако сильный разогрев полюсного наконечника, значительно снижает его ресурс и приводит к высокому тепловложению в деталь, что может вызвать ее коробление.

Все рассмотренные варианты из-за нестабильности процесса упрочнения, низкой производительности и больших тепловложений в деталь не могут быть рекомендованы к практическому применению.

При упрочнении по другим вариантам 1, 4, 6 (таблица) процесс протекает стабильно.

Среди них максимальный привес образца наблюдается при упрочнении, когда угол смещения составляет  $0^\circ$  вариант 1 (таблица). При этом происходит незначительный нагрев детали и полюсного наконечника. Перенос расплава порошка осуществляется крупными плотными каплями.

При упрочнении по варианту 4 (таблица), когда напряжение  $U_t$ , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения  $U_k$ , питающее электромагнитную катушку, на угол  $120^\circ$  перенос расплава порошка осуществляется более мелкими каплями, что повышает сплошность покрытия. При этом несколько снижается привес образцов и увеличивается привес полюсных наконечников.

Упрочнение по варианту 6 (таблица), когда напряжение  $U_t$ , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения  $U_k$ , питающее электромагнитную катушку, на угол  $60^\circ$ , обеспечивает перенос расплава порошка мелкими каплями, что значительно увеличивает сплошность и уменьшает шероховатость покрытия, при этом снижается привес образцов и полюсных наконечников. Из-за незначительного переноса расплава порошка на рабочую поверхность полюсного наконечника и невысокой его эрозии, рабочий зазор остается постоянным, что значительно повышает стабильность процесса упрочнения. При данном варианте стойкость полюсного наконечника максимальна.

## ВЫВОДЫ

Процесс формирования поверхности в электромагнитном поле, в котором напряжение  $U_t$ , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения  $U_k$ , питающее электромагнитную катушку, на угол  $60^\circ$ , можно рекомендовать для упрочнения поверхностей с последующей обработкой до первоначального размера, оставляя при этом только диффузионный поверхностный слой. Процесс, в котором напряжение  $U_t$ , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения  $U_k$ , питающее электромагнитную катушку, на угол  $120^\circ$ , рекомендуется для восстановления и упрочнения, изношенных до 0,3 мм поверхностей деталей. Процесс при отсутствии фазового смещения напряжения  $U_t$ , питающего сварочный трансформатор, относительно напряжения  $U_k$ , питающего электромагнитную катушку, целесооб-

разно использовать при комбинированном восстановлении и упрочнении с последующей наплавкой проволокой на поверхности деталей машин со значительным износом до 1,5 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П.И. Ящерицин. М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
- 2 Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
- 3 Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999, – 276 с.
- 4 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
- 5 Оптимизация технологических параметров формирования износостойких покрытий электромагнитным способом / Ж.А. Мрочек, С.А. Кадников, Л.М. Кожуро, Л.М. Акулович // Электронная обработка материалов. - 1991, №2. – С. 22-25.

**Гордиенко Анатолий Илларионович**

Академик, доктор технических наук, профессор,

Директор Физико-технического института НАН Беларуси (Минск, Беларусь).

**Хейфец Михаил Львович**

Доктор технических наук, профессор,

Заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук НАН Беларуси (Минск, Беларусь).

Тел.: +375 29 7176272

E-mail: mlk-z@mail.ru

**Грецкий Николай Леонидович**

Ассистент кафедры «Механики»

Полоцкого государственного университета (Новополоцк, Беларусь).

E-mail: nikolay\_gnl@mail.ru

УДК 621.9

**В. В. ПЛЕШАКОВ, Д. А. АЛБАГАЧИЕВ, О. В. ЮРЛОВ**

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Предложен прибор регистрирующий параметры ЭДС скачков. Построены диаграммы циклического упрочнения образцов из стали 30ХГСН2А после обработки шлифованием и алмазным выглаживанием. Суммарная наработка образцов от количества ремонтов представлена в виде регрессионной модели.*

**Ключевые слова:** детали машин, усталостная прочность

*A recording device parameters emf jumps. Diagrams of cyclic hardening of specimens of steel 30HGSN2A after processing by grinding and diamond burnishing. The total time between samples on the number of repairs expressed as a regression model.*

**Key words:** details of machines, fatigue durability

Решение проблемы оценки уровня накопления усталостных повреждений в поверхностном слое деталей из высокопрочных сталей особенно актуально при их ремонте. Создание неразрушающих методов контроля качества поверхностного слоя позволит разработать эф-

фективную систему эксплуатации силовых конструкций изделий по их техническому состоянию, ремонта ответственных деталей по мере накопления усталостных повреждений.

В последнее время для контроля структурных и физико-механических свойств ферромагнитных изделий широко применяется метод, основанный на эффекте Баркгаузена [1, 2]. Сущность метода заключается в перемагничивании изделия полем низкой частоты (0,1 ... 100 Гц) и регистрации индуктивным преобразователем скачкообразных изменений намагниченности, называемых скачками Баркгаузена (СБ). ЭДС СБ определяется перестройкой доменной текстуры материала при его циклическом перемагничивании, динамика которой связана с наличием микродефектов, остаточных напряжений и различного рода структурных неоднородностей. Это является физической предпосылкой возможности изменения метода эффекта Баркгаузена для контроля усталостных повреждений в поверхностном слое стальных деталей.

В настоящей работе предложен прибор, позволяющий регистрировать различные информативные параметры ЭДС скачков: текущие и средние за период перемагничивания значения выпрямленного напряжения ЭДС от СБ, текущее и среднее за период перемагничивания число выбросов ЭДС. Предусмотрена возможность регистрации числа выбросов, ЭДС которых превышает заданное значение, названное уровнем селекции. Изменение уровня селекции позволяет исключить влияние собственных шумов усилителя прибора, выбрать информативный параметр контроля, наиболее сильно коррелированный с исследуемыми свойствами поверхностного слоя [1].

Для исследования влияния наработки на характеристики ЭДС от СБ проводили испытания образцов из высокопрочной стали 30ХГСН2А при ротационном изгибе на машине МУИ-6000. Предварительно образцы подвергали шлифованию и алмазному выглаживанию по режимам, обеспечивающим наибольшее упрочнение поверхностного слоя [3].

На основе обработки данных испытаний при ступенчатом нагружении образцов построены усталостные диаграммы (рис. 1). На оси абсцисс откладывали величину относительной предварительной наработки  $K_1$  и относительную наработку до разрушения образцов  $K_2$ . Относительная наработка определялась отношением числа циклов нагружения при заданном напряжении к числу циклов до разрушения образцов при том же напряжении. Циклическое упрочнение стали оценивали по отклонению кривых от условия линейного накопления усталостных повреждений (прямая Л).

Анализ полученных данных свидетельствует о высоком циклическом упрочнении стали 30ХГСН2А при относительной предварительной наработке  $K_1 = 0,25 \dots 0,4$ . Причем после поверхностного пластического деформирования (ППД) степень циклического упрочнения стали повышается. Это свидетельствует о развитии в процессе ППД алмазным выглаживанием и в процессе наработки дислокационной структуры, препятствующей развитию усталостных трещин. Наибольший эффект восстановления запаса усталостной прочности деталей достигается в результате ППД после указанной выше наработки. Метод контроля уровня накопления усталостных повреждений должен обеспечить выявление наработки реальных изделий, при которой еще возможно достаточно эффективно повысить их ресурс.

Распределение параметров ЭДС от СБ при частоте перемагничивания 1 Гц, амплитуде поля 4 кА/м и уровне селекции 0,3 В при различной наработке образцов показано на рис. 2. Как видно, характер распределения текущих значений и числа выбросов ЭДС идентичен. При наработке до 72 000 цикл значения указанных параметров несколько снижаются, что характерно при формировании в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений. Последующий процесс разупрочнения приводит к формированию импульса большой протяженности с большими текущими значениями и частотой выбросов ЭДС. Это свидетельствует о большем охвате доменов в процессе магнитной переориентации.

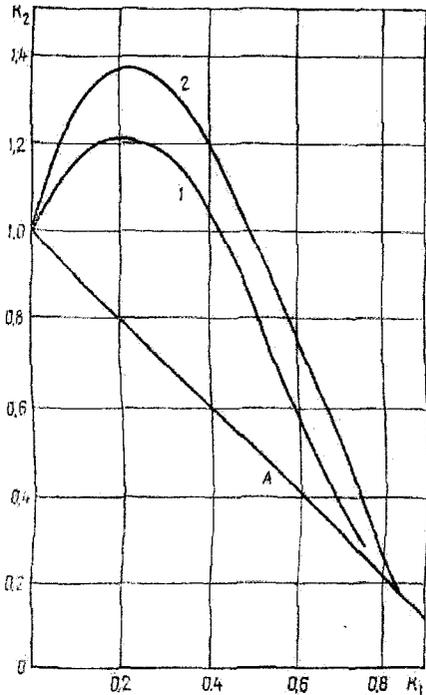


Рисунок 1 - Диаграммы циклического упрочнения образцов из высокопрочной стали 30XГСН2А, обработанных шлифованием (1) и алмазным выглаживанием (2).

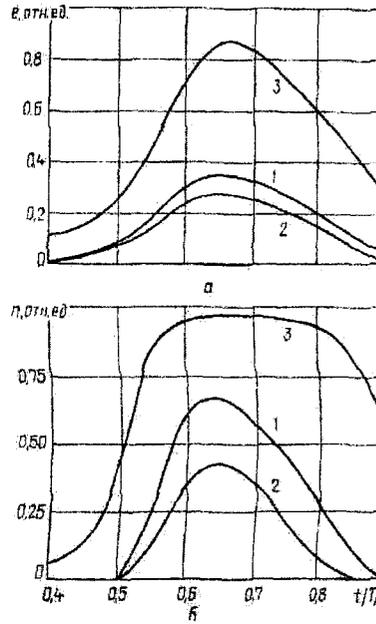


Рисунок 2 - Распределение интенсивности (а) и числа выбросов (б) ЭДС от СБ за период изменения внешнего поля  $T_c$  при различной наработке образца: 1— $K=0$ ; 2— $K=72000$  цикл; 3—  $K=300000$  цикл.

Зависимость параметров ЭДС от СБ от относительной наработки образцов (рис. 3) свидетельствует о циклическом упрочнении стали при относительной наработке до  $K=0,4$ . Дальнейшее нагружение приводит к формированию микротрещин в объемах с критической плотностью дислокации и разупрочнением поверхностного слоя. Происходит накопление необратимых усталостных повреждений. Следовательно, используя рассматриваемые параметры ЭДС от СБ, можно оценить уровень усталостных повреждений в поверхностном слое стальных деталей. Изменение уровня селекции дает возможность регулировать чувствительность прибора к структурным изменениям стали при усталостном нагружении (рис. 4).

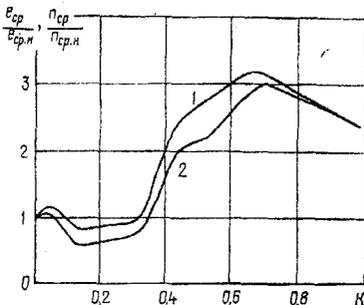


Рисунок 3 - Зависимость относительного числа выбросов (1) и интенсивности (2) ЭДС от СБ от относительной наработки образцов K.

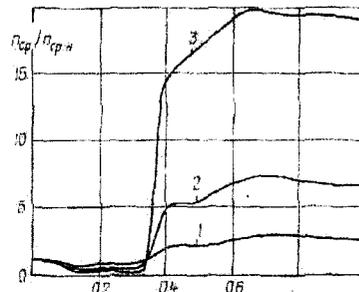


Рисунок 4 - Зависимость относительного числа выбросов ЭДС от СБ от относительной наработки образцов при различном уровне селекции: 1 —  $U=0,3$  В; 2— $U=0,7$  В; 3— $U=0,1$  В.

Поверхностное пластическое деформирование деталей приводит к резкому снижению интенсивности и числа выбросов ЭДС. Это позволяет контролировать режимы обработки и характеристики деформации поверхностного слоя [1].

Влияние предварительного выглаживания на изменение числа выбросов ЭДС от СБ в процессе усталостного нагружения показано на рис. 5.

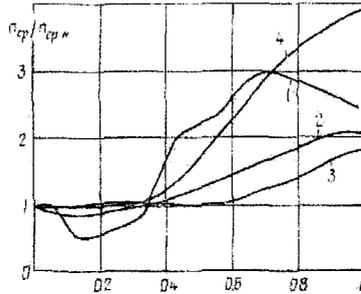


Рисунок 5 - Зависимость относительного числа выбросов ЭДС от СБ от относительной наработки образцов, обработанных шлифованием (1) и алмазным выглаживанием по режимам № 1 (2) и № 2 (3, 4): 1—3— $U=0,3B$ ; 4— $U=1,2 B$

Алмазное выглаживание инструментом типа АСПК проводили на режимах, обеспечивающих различное упрочнение поверхностного слоя (таблица).

В качестве критерия оценки уровня накопления усталостных повреждений использовано относительное число выбросов ЭДС (отношение текущего значения числа выбросов к числу выбросов у образца до нагружения).

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что структурные изменения поверхностного слоя при увеличении степени его упрочнения оказывают меньшее влияние на параметры ЭДС от СБ. Это объясняется смещением зоны наибольшей повреждаемости в поверхностный слой вследствие взаимодействия остаточных сжимающих напряжений и напряжений, создаваемых при циклическом нагружении. Поэтому при контроле повреждаемости изделий, подвергаемых поверхностному пластическому деформированию, целесообразно повысить чувствительность за счет изменения уровня селекции (на рис. 5 кривая 4).

Таблица 1 - Режимы выглаживания образцов из стали 30ХГСН2А и их эффективность

Режимы выглаживания образцов из стали 30ХГСН2А и их эффективность

| № п/п | Режим выглаживания    |                        | Продольная подача, мм/об | Степень упрочнения поверхностного слоя, % | Наибольшие остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое, ГПа |
|-------|-----------------------|------------------------|--------------------------|---|--|
|       | Сила выглаживания, кН | Радиус инструмента, мм |                          |   |  |
| 1     | 0,1                   | 3                      | 0,1                      | 8...10                                    | -0,8   |
| 2     | 0,3                   | 2                      | 0,05                     | 20  | -1,45  |

Таким образом, оценка уровня накопления усталостных повреждений возможна на стадии циклического разрушения поверхностного слоя высокопрочных сталей. Отсутствие значимого отличия параметров ЭДС от СБ у деталей, отработавших часть ресурса, от соответствующих значений параметров контрольных деталей или образцов свидетельствует о возможности эффективного повышения ресурса при восстановлении их поверхностным пластическим деформированием.

Для выявления эффективности повторного выглаживания проведен эксперимент, в котором образцы подвергались алмазному выглаживанию, предварительной наработке на

различных напряжениях, повторному выглаживанию и разрушению при различных напряжениях.

С учетом выполнения начальных условий зависимость относительной наработки образцов до разрушения от факторов предварительного нагружения представлялось в следующем виде:

$$K_2 = (1 - K_1)^{\Psi(K_1, \sigma_1, \sigma_2)} \quad (2)$$

где  $K_1$  – относительная предварительная наработка образцов при напряжении -  $\sigma_1$   
 $K_2$  – относительная наработка образцов до разрушения при напряжении -  $\sigma_2$   
 $\Psi(K_1, \sigma_1, \sigma_2)$  – функция определяющая нелинейность накопления усталостных повреждений в зависимости от факторов нагружения.

Функция  $\Psi(K_1, \sigma_1, \sigma_2)$  получена в виде регрессионной модели на основе статической обработке экспериментальных данных:

$$\Psi(K_1, \sigma_1, \sigma_2) = 8,764 - 26,524 * K_1 - 8,687 * \sigma_1 * \sigma_2 - 29,536 * K_1 * \sigma_2 \quad (3)$$

При относительно небольших значениях  $K_1$  происходит циклическое упрочнение повторно выглаженной стали. Причем степень и период упрочнения зависят от амплитуды напряжений предварительного и окончательного образцов. Это характерно для циклически упрочняемых сталей. Наибольшая эффективность упрочнения достигается на высоком уровне предварительного нагружения – 1,15 ГПа при относительной наработке до  $K_1 = 0,5 \dots 0,9$  ГПа. Напряжения второго цикла нагружения оказывают аналогичное влияние. Наибольшая степень циклического упрочнения достигает 40 ... 45%. Однако, при увеличении разрушающих напряжений, несколько период эффективного применения повторного выглаживания. Это объясняется тем, что при больших амплитудах разрушающих напряжений происходит интенсивная релаксация остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое. И при большой предварительной наработке  $K_1 = 0,5 \dots 0,9$  ГПа происходит циклическое разупрочнение стали.

В целом, однако, учитывая высокий уровень эксплуатационных нагрузок и относительно небольшой уровень накопления усталостных повреждений в поверхностном слое деталей до очередного ремонта, следует признать высокую эффективность повторного выглаживания при ремонте.

Оценка эффективности многократного упрочнения деталей проводилась в более узком диапазоне изменения факторов. В качестве одного из факторов рассматривалось количество ремонтов или количество актов повторного выглаживания после очередной наработки. Длительность очередной наработки задавалась параметром  $K_1$ . Параметр  $K_2$  определял суммарную относительную наработку образцов при различных напряжениях  $\sigma_2$ . Напряжение предварительной наработки соответствовало 1,0 ГПа. Таким образом, суммарная относительная наработка образцов, в зависимости от рассмотренных факторов, представлено в виде следующей регрессионной модели:

$$K = -10,226 - 0,087h^2 - 34,553K_1\sigma_2 + 0,6033h + 35,712K_1 - 10,13\sigma_2 + 0,3175K_1h. \quad (4)$$

Анализ модели свидетельствует о том, что при небольшом межремонтном ресурсе образцов, при малой длительности предварительных этапов нагружения, наблюдается некоторое увеличение относительной наработки. Более значительными в этом случае оказываются эффекты, связанные с количеством ремонтов. При межремонтном ресурсе соответствующем  $K_1 = 0,2$  увеличение числа ремонтов свыше четырех приводит к снижению послеремонтного и общего ресурса образцов. Таким образом при  $K_1 = 0,2$ , оптимальным является четырехкратное выглаживание, т.е. проведение не более четырех ремонтов. Общий ресурс образцов в этом случае повышается в 1,5 раза. Более эффективным является увеличение межремонтного ресурса деталей до  $K_1 = 0,5$ . Четырехкратное упрочнение деталей при ремонтах обеспе-

чивает увеличение ресурса деталей в 2,4 ... 2,7 раз. Пятый ремонт практически не дает значимого эффекта из-за снижения послеремонтного ресурса деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Плешаков В. В., Соколик А. И., Лаврентьев А. Н. Контроль качества поверхностного слоя деталей из высокопрочных сталей после алмазного выглаживания // Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки.— М. : Всесоюз. заоч. машиностроит. ин-т, 1984.—С. 55—59.
- 2 Соколик А. И., Плешаков В. В., Лаврентьев А. Н. Контроль поверхностных пластических деформированных слоев по частным характеристикам ЭДС от скачков Баркгаузена. Неразрушающие физические методы исследования и средства контроля: Тез. докл. X Всесоюз. науч.-техн. конф., Львов, 1985.— Кн. 2.—С. 108.
- 3 Плешаков В. В. Повышение надежности деталей, восстанавливаемых гальваническими покрытиями.—М. : Россельхозиздат, 1983.—56 с.
- 4 Плешаков В.В. Методы и модели исследования операций: Учебное пособие. - М., МГТУ "Станкин", 1996, -100с.
- 5 Miner A. Cumulative damage in fatigue T.Appl. Mech. 1945, 12, p. 159-164.

**Плешаков Виктор Викторович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики  
Профессор

**Албагачиев Джемалд Алиевич**

Московский государственный университет приборостроения и информатики  
Аспирант  
Albagachiev@yandex.ru

**Юрлов Олег Владимирович**

Московский государственный университет приборостроения и информатики  
Аспирант

УДК 62.531.7

В.Р. ТЫРС, С.В. КОСАРЕВСКИЙ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДА ЧИСЛЕННОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПРИ СКАНИРОВАНИИ РЕЗЬБЫ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

*Применение режима сканирования на современных координатно-измерительных машинах широко вошло в измерительную практику поскольку позволяет выполнить ощупывание детали значительно быстрее по сравнению с измерениями отдельных точек в режиме переключающего ощупывания. Точность измерений при этом зависит от скорости сканирования. В данной статье представлено экспериментальное исследование одной из таких зависимостей, применимых в процессе измерения резьбы.*

*Ключевые слова:* сканирование, координатно-измерительная машина, точность

*Usage of scanning probing mode of modern coordinate measuring machines is widely accepted in the dimensional metrology. It allows faster probing of workpieces compared to touch-trigger probing. However measurement accuracy significantly depends on the scanning speed. In this paper an experimental assessment is presented of one of the numerical compensation method intended to increase accuracy while scanning threads on coordinate measuring machines.*

*Keywords:* scanning, coordinate measuring machine, accuracy

## ВВЕДЕНИЕ

Применение различных методов численной компенсации результатов измерений прочно вошло в современную измерительную практику на координатно-измерительных машинах [1, 2, 3, 4, 5]. Для оценки ошибок и методов их компенсации Швенке и др. [6] предложили разделять факторы влияющие на точность измерений на следующие категории: кинематические, термо-механические, нагрузки и деформации, динамические, система управления и программное обеспечение. К динамическим факторам относится [6] влияние изменяющихся сил, например, измерительного усилия, и сил, вызванных движением частей измерительной машины с ускорениями.

В данной статье проведена экспериментальная оценка одного из методов численной компенсации динамических ошибок, возникающих при сканировании поверхности резьбовых деталей на координатно-измерительной машине.

## МОДЕЛЬ КОМПЕНСАЦИИ

Модель численной компенсации динамических эффектов при сканировании резьбы была предложена в работах [7, 8]. При этом величина компенсационной поправки вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{m \cdot V_{scan}^2 \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{F}, \quad (1)$$

где  $m$  - масса щуповой конфигурации, кг;

$V_{scan}$  - скорость сканирования, м/с;

$\alpha$  - угол профиля резьбы, градусы;

$F$  - сила ощупывания, Н.

Величина внутреннего диаметра резьбы  $D$  после компенсации равна

$$D = D_m \pm \frac{m \cdot V_{scan}^2 \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{F}, \quad (2)$$

где  $D$  - компенсированный диаметр, м;

$D_m$  - измеренный диаметр, м.

Знак «плюс» выбирается для внутренней резьбы, «минус» - для наружной.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальные данные получены на координатно-измерительной машине Carl Zeiss PRISMO 10 S-ACC ( $MPE_E = 1.7 + \frac{L}{350}$ , контроллер C99) под управлением программного обеспечения Calypso версии 4.0.02. Исследуемая модель (2) предполагает использование сканирование вдоль образующих параллельных оси резьбы. Использовано удаление выбросов  $\pm 3\sigma$  и сплайн-фильтр по ISO/DTS 16610-3, широко применяемый в координатных измерениях. Это позволяет снизить влияние локальных отклонений формы поверхности деталей на результаты экспериментов. Для расчёта геометрического элемента «цилиндр» использованы режимы «maximum inscribed cylinder» - для внутренней резьбы и «minimum circumscribed cylinder» - для наружной резьбы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментов представлена на рисунках 1-4. По оси абсцисс на графиках отложена скорость сканирования, по оси ординат – величина ошибки. Для справки приведена величина ошибки после компенсации, полученная путём вычитания значения (1) из экспериментального результата.

M140x3-6g

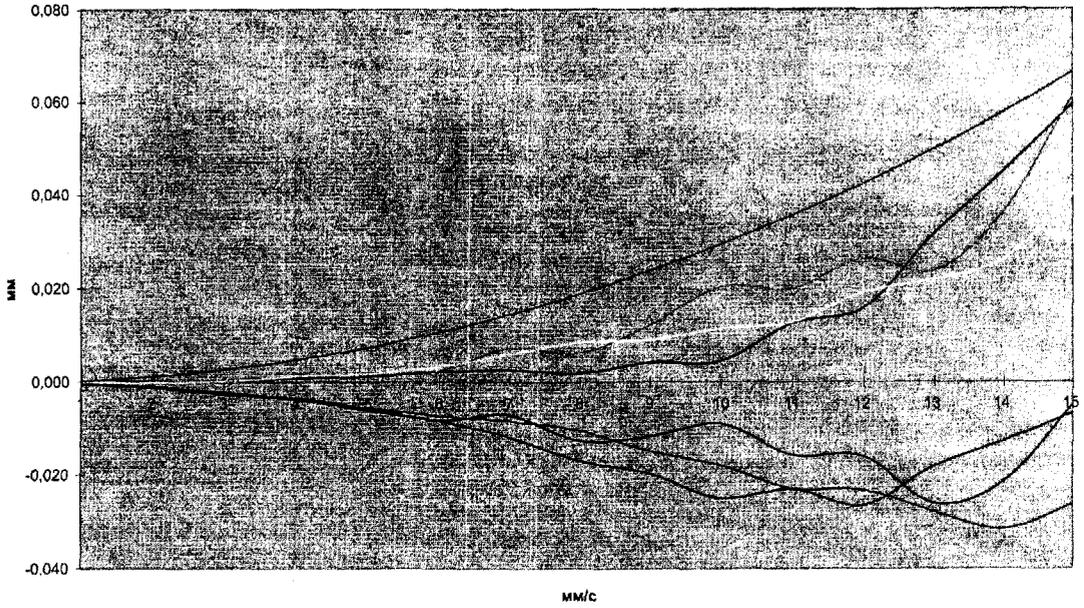


Рисунок 1 – резьба M140x3-6g, радиус щупа 5 мм

M170x6-6g

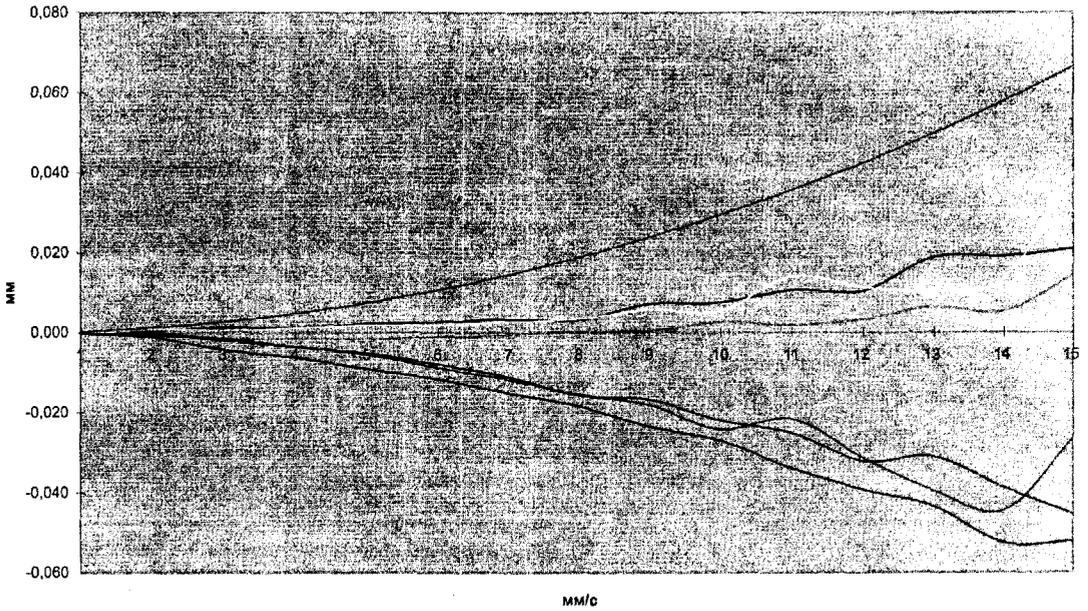


Рисунок 2 – резьба M170x6-6g, радиус щупа 5 мм

M90x3-6g

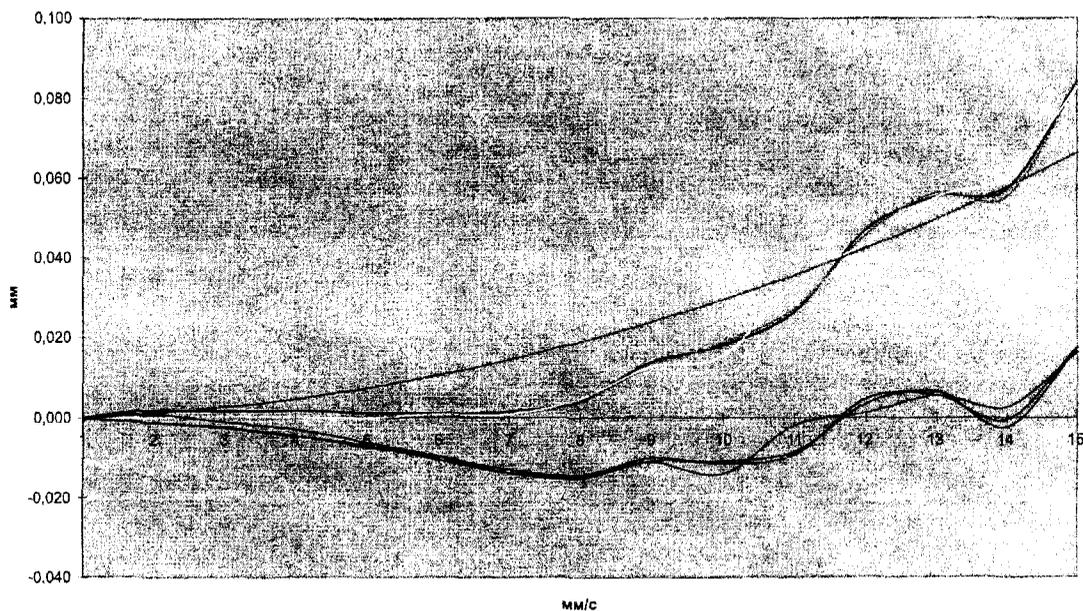


Рисунок 3 – резьба M90x3-6g, радиус щупа 5 мм

M170x6-6g (щуп R2.5 мм)

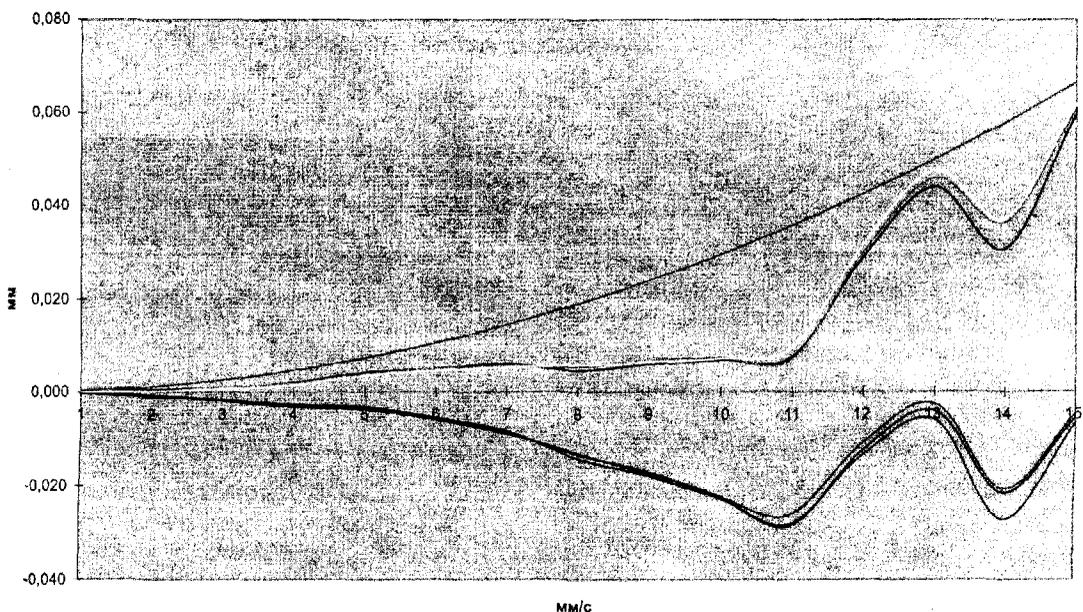


Рисунок 4 – резьба M140x3-6g, радиус щупа 2.5 мм

## ВЫВОДЫ

Наиболее эффективная компенсация достигается в интервале скоростей от 6 мм/с до 12 мм/с. На скоростях сканирования менее 5 мм/с величина данного эффекта становится малой по сравнению с погрешностью координатно-измерительной машины и результаты

нельзя оценивать однозначно. На скоростях свыше 12 мм/с компенсированная ошибка быстро превосходит величину 20 мкм, что в некоторых случаях может затруднить практическое применение сканирования в подобном режиме. Следует отметить, что при оценке массы шуповой конфигурации использовались значения, представленные производителем в каталоге шупов. Фактического измерения массы не проводилось.

Недостатком модели (1) является непринятие во внимание величин диаметра и шага резьбы, а также радиуса шупа. В случае большого диаметра резьбы качество компенсации заметно ухудшается (рис. 1, 2 и 4). Это вызвано тем, что точки контакта сферического шупа с поверхностью резьбы не лежат в плоскости осевого сечения резьбы. Для более качественной компенсации необходимо это учитывать.

Несмотря на то, что численная компенсация погрешностей измерений является быстро развивающимся направлением координатных измерений, её применение для многих динамических составляющих погрешности ещё не достаточно полно. Проведённые в данной работе эксперименты показывают, что предложенный в [7, 8] метод компенсации позволяет повысить точность при сканировании резьбы малого диаметра на скоростях менее 15 мм/с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Trapet, E.; Waldele, F. Coordinate Metrology - Flexibility in conflict with accuracy? // Anais - Seminário Internacional de Metrologia, Florianópolis - SC, 1997.
- 2 Jenq-Shyong, C. Computer-aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tool // International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.35, Issue 4, April 1995, pp. 593-605.
- 3 Estler, W.T.; Phillips, S.D.; Borchardt, B.; Hopp, T.; Witzgall, C.; Levenson, M.; Eberhardt, K.; McClain, M.; Shen, Y.; Zhang, X. Error compensation for CMM touch trigger probes // Precision Engineering. Vol. 19, №2, October 1996, pp. 85-97(13).
- 4 Wozniak, A.; Dobosz, M. Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part I: 3D theoretical model of probe pretravel // Measurement. Vol. 34, Issue 4, December 2003, pp. 273-286.
- 5 Wozniak, A.; Dobosz, M. Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part II: Experimental verification of the 3D theoretical model of probe pretravel // Measurement. Vol. 34, Issue 4, December 2003, pp. 287-299.
- 6 Schwenke, H.; Knapp, W.; Haitjema, H.; Weckenmann, A.; Schmitt, R.; Delbressine, F. Geometric error measurement and compensation of machines - An update // CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008, 57, pp. 660-675.
- 7 Косаревский С.В. Автоматическая компенсация динамических эффектов при скоростном сканировании резьбы на координатно-измерительной машине // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2010. - №3. - С. 45-48.
- 8 Kosarevsky S., Latypov V. Inertia compensation while scanning screw threads on coordinate-measuring machines // Measurement Science Review. Volume 10, Number 2, 2010. - pp. 68-71.

#### **Тырс Вячеслав Райнович**

Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ), г. Санкт-Петербург  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (931) 224-15-38  
E-mail: [v.t@inbox.ru](mailto:v.t@inbox.ru)

#### **Косаревский Сергей Владимирович**

Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ), г. Санкт-Петербург  
Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Технология машиностроения»  
Тел. (812) 948-58-11  
E-mail: [kosarevsky@mail.ru](mailto:kosarevsky@mail.ru)

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ** **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 3539.42; 539.375

Ю.С. СТЕПАНОВ, Г.В. БАРСУКОВ, А.В. МИХЕЕВ

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПРЕГРАДЫ С ГАЗОВЫМ ЗАЗОРОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХЗВУКОВОГО СТРУЙНОГО ПОТОКА СВОБОДНЫХ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ**

*Авторами статьи разработана математическая модель разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц, что позволяет прогнозировать условия ее сквозного разрушения в зависимости от давления истечения сверхзвукового потока, толщины преграды, природы самого материала, формы частиц, количества слоев, зазора между слоями, расхода абразива.*

**Ключевые слова:** многослойная преграда, проникание; абразивное зерно; гидроабразивное резание, сверхзвуковая струя

*The authors developed a mathematical model of fracture of multilayer barrier with gas clearance under the action of a supersonic jet stream of free abrasive particles that can predict its through-the destruction of the pressure expiration of a supersonic flow, the thickness of the barrier, the nature of the material, particle shape, number of layers, the gap between the layers, flow abrasive.*

**Keywords:** multilayer barrier penetration; abrasive grain; abrasive water jet cutting, supersonic jet

### **ВВЕДЕНИЕ**

При массовой вырезке однотипных деталей из листов, например, фланцев, полос и т. д. применяют пакетную резку. В этом случае стоимость резания одного погонного метра металла гидроабразивной струей не превышает стоимость при лазерной резке, а так как поверхность заготовки не подвергается короблению, прижогам и термическому упрочнению этот метод получает существенное преимущество.

Авторами разработан способ пакетного резания материалов гидроабразивной струей, заключающийся в создании технологического межслойного зазора, который позволяет: исключить образование водных пробок в межслойной зоне; улучшить условия отвода из зоны резания продуктов разрушения; повысить эффективность гидроабразивной струи; вывести из зоны разрушения отработанный абразив.

Однако создание межслойного зазора ведет к снижению точности, вследствие расширения струи и ее отклонения по толщине пакета, что обуславливает необходимость разработки математических моделей позволяющих назначать не только технологические режимы резания, но и конструктивные параметры пакета материала.

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Рассмотрим задачу о сквозном разрушении многослойной преграды с газовым зазором между слоями.

Для решения задачи сделаем следующие допущения:

1) количество абразивных частиц, участвующих в разрушении постоянно;

- 2) ориентация и скорость частиц, участвующих в разрушении на одном, каком либо слое, постоянно;
- 3) абразивная частица участвует в разрушении только один раз;
- 4) материал слоев изотропен.

Так как основным фактором разрушения материала является наличие в сверхзвуковом потоке абразивных частиц, для начала расчета необходимо определить число частиц участвующее в разрушении на каждом слое.

Учитывая предложенные допущения, а также условия геометрического определения вероятности, запишем выражение для определения количества абразивных частиц участвующих в резании для первого слоя:

$$n_1 = \frac{0,5\pi(r_{cmp}^2 - r_c^2) + r_{cmp}^2 \left[ 2 \arccos \left( 1 - \frac{d_3}{r_{cmp}} \right) - \sin \left( 2 \arccos \left( 1 - \frac{d_3}{r_{cmp}} \right) \right) \right]}{\pi r_{cmp}^2} n_0, \quad (1)$$

где  $n_0$  - общее количество частиц пролетающих через поперечный срез сопла в определенный промежуток времени;

$r_{cmp}$  - радиус пятна контакта;

$r_c$  - исходный радиус струи;

$d_3$  - диаметр абразивного зерна.

Для определения частиц участвующих в резании на втором слое необходимо учесть расширение струи в зависимости от газового зазора между слоями преграды:

$$r_{cmp_2} = 0,22(\Delta_{1-2} - r_{cmp}) \frac{B_2 + (0,5A_2 - C_2)s}{B_2 + (A_2 - C_2)s}, \quad (2)$$

где  $\Delta_{1-2}$  - зазор между первым и вторым слоем;

$A_2, B_2, C_2$  - коэффициенты, учитывающие изменение профиля скорости и концентрации частиц в поперечном сечении струи.

Число абразивных частиц, участвующее в разрушении на втором слое запишем в следующем виде:

$$n_2 = \left\{ \frac{0,5\pi(r_{cmp_2}^2 - r_{cmp_1}^2)}{\pi r_{cmp_2}^2} + \frac{r_{cmp_2}^2 \left[ 2 \arccos \left( 1 - \frac{d_3}{r_{cmp_2}} \right) - \sin \left[ \arccos \left( 1 - \frac{d_3}{r_{cmp_2}} \right) \right] \right]}{\pi \cdot r_{cmp_2}^2} \right\} (n_0 - n_1).$$

Таким образом, можно записать число абразивных частиц участвующих в разрушении для произвольного  $k$  слоя преграды:

$$n_k = \left\{ \frac{0,5\pi(r_{cmp_k}^2 - r_{cmp_{k-1}}^2)}{\pi r_{cmp_k}^2} + \frac{r_{cmp_k}^2 \left[ 2 \arccos \left( 1 - \frac{d_3}{r_{cmp_k}} \right) - \sin \left[ \arccos \left( 1 - \frac{d_3}{r_{cmp_k}} \right) \right] \right]}{\pi r_{cmp_k}^2} \right\} \times (n_{k-k} - n_{k-1} - \dots - n_1) \quad (3)$$

где  $r_{cmp_k}$  - радиус струи на  $k$ -м слое.

Запишем выражение для определения скорости движения сверхзвукового потока абразивных частиц вдоль преграды, обеспечивающей сквозное разрушение первого слоя:

$$S_1 = \frac{U_1 n_1}{2b_{m1} r_{cmp1}}, \quad (4)$$

где  $U_1$  - объем материала вытесняемый единичной абразивной частицей;

$b_{m1}$  - толщина первого слоя преграды.

Для второго и последующих слоев (4) запишем в следующем виде:

$$S_2 = \frac{U_2 n'_2}{2b_{m2} r_{cmp2}},$$

$$S_{k-1} = \frac{U_{k-1} n'_{k-1}}{2b_{m_{k-1}} r_{cmp_{k-1}}},$$

$$S_k = \frac{U_k n'_k}{2b_{mk} r_{cmp_k}},$$

где  $b_{mk}$  - толщина  $k$ -го слоя;

$n'_k$  - необходимое количество абразивных частиц для разрушения преграды толщиной  $b_{mk}$ .

Так как перемещение слоев относительно друг друга отсутствует, то можно записать следующее равенство:

$$S_1 = S_2 = \dots = S_{k-1} = S_k. \quad (5)$$

Запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} S_1 = S_2, \\ \dots \\ S_{k-1} = S_k, \end{cases} \quad (6)$$

или

$$\begin{cases} \frac{U_2 n'_2}{2b_{m2} r_{cmp2}} = \frac{U_1 n_1}{2b_{m1} r_{cmp1}}, \\ \dots \\ \frac{U_k n'_k}{2b_{mk} r_{cmp_k}} = \frac{U_{k-1} n'_{k-1}}{2b_{m_{k-1}} r_{cmp_{k-1}}}. \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая (5), получим:

$$n'_k = \frac{2S_1 b_{M_k} r_{cmpk}}{U_k} \quad (8)$$

Условие сквозного разрушения для  $k$ -го слоя запишем в виде:

$$\frac{U_k n'_k}{2b_{M_k} r_{cmpk}} = \frac{U_k n_k}{2b_{M_k} r_{cmpk}},$$

$$U_k = \frac{2U_{k-1} n_{k-1} b_{M_k} r_{cmpk}}{2b_{M_{k-1}} r_{cmp_{k-1}} n_k} \quad (9)$$

Учитывая, что система является саморегулирующейся, то начальные условия для решения системы уравнений движения абразивной частицы по поверхности преграды в зоне разрушения первого слоя:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = [\dot{x}^2 k + w] \left[ -\frac{d^2}{8} \gamma \cos(\alpha_0 - \varphi) + \frac{4}{3} \lambda \sin(\alpha_0 - \varphi) \right], \\ m\ddot{\eta} = -[\dot{x}^2 k + w] \left[ \frac{d^2}{8} \gamma \cos(\alpha_0 - \varphi) + \frac{4}{3} \lambda \sin(\alpha_0 - \varphi) \right], \\ I\ddot{\varphi} = [\dot{x}^2 k + w] \left[ -\frac{d^2}{8} \gamma \left( \frac{d}{2} - \frac{2}{3} (\eta - H_0) \right) + \frac{4(\eta - H_0)}{9tg\beta} \lambda \right], \end{cases} \quad (10)$$

где  $\lambda, \gamma$  - коэффициенты.

$\alpha_0$  - начальный угол между контактной поверхностью и осью симметрии внедряемого зерна.

$\varphi = \alpha_0 - \alpha$  - изменение угла наклона оси симметрии зерна к преграде;

$H_0$  - высота выступающей части абразивной частицы;

$\eta$  - текущая координата;

$\beta$  - угол при вершине абразивного зерна.

Начальные условия для системы уравнений (10):

$$\dot{x}(0) = V_0 \cos \alpha_0, \quad \dot{\eta}(0) = V_0 \sin \alpha_0, \quad \dot{\varphi}(0) = 0,$$

$$x(0) = 0, \quad \eta(0) = H_0, \quad \varphi(0) = \alpha_0.$$

Объем вытесняемый одной частицей на первом слое:

$$U_1 = \frac{\pi}{180} \frac{d^2}{8} \int_L \arcsin \frac{2\sqrt{d_s(\eta - H_0) - (\eta - H_0)^2}}{d} - \frac{2\sqrt{d_s(\eta - H_0) - (\eta - H_0)^2}}{d} \times \sqrt{1 - \left( \frac{2\sqrt{d_s(\eta - H_0) - (\eta - H_0)^2}}{d} \right)^2} dx. \quad (11)$$

где  $\eta$  - проекция осевой составляющей скорости,  $\eta = V \sin \alpha$ ;

$L$  - длина царапины от выступов микрорельефа зерна;

$\Delta = f(V, d, \alpha, \beta, \mu)$  - глубина врезания зерна в поверхность [1].

Начальные условия для второго слоя:

$$\dot{x}(0) = V_1 \cos \alpha_2, \quad \dot{\eta}(0) = V_1 \sin \alpha_2, \quad \dot{\varphi}(0) = 0,$$

$$x(0) = 0, \eta(0) = H_0, \varphi(0) = \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_{\max},$$

где  $\alpha_1$  - угол отклонения струи на первом слое,

$\alpha_2$  - угол отклонения струи на втором слое,

$\alpha_{\max}$  - максимальный угол отклонения струи, при котором возможно сквозное прорезание материала,

$V_1$  - скорость частицы после прохождения первого слоя.

Таким образом, решая систему уравнений (10), определяя траектории движения частицы по поверхности преграды, определим объем материала вытесняемый абразивной частицей при различных углах отклонения фронта разрушения:

$$U_2 \min \leq U_2 \leq U_2 \max.$$

Подставляя значение  $U_2$  в (8) и проверяя по условию сквозного разрушения (9) получим систему новых граничных условий для уравнения движения частицы по поверхности третьего слоя.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Значение максимальной скорости движения сверхзвукового потока абразивных частиц вдоль преграды, обеспечивающей сквозное разрушение пяти слоев

| зазор $\Delta$ , мм  | Предел текучести МПа |        |        |        |        |
|--|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|  | 50                   | 100    | 200    | 400    | 800    |
| 1  | 2                    | 3      | 4      | 5      | 6      |
| толщина слоя 1мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 80 мкм  |                      |        |        |        |        |
| 1  | 0,8193               | 0,79   | 0,734  | 0,6455 | 0,5233 |
| 2  | 0,6335               | 0,61   | 0,557  | 0,4802 | 0,3832 |
| 3  | 0,4653               | 0,4483 | 0,4178 | 0,3677 | 0,2966 |
| 1  | 2                    | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 4  | 0,391                | 0,3697 | 0,3483 | 0,2942 | 0,2346 |
| 5  | 0,3196               | 0,308  | 0,287  | 0,2529 | 0,199  |
| толщина слоя 2мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 80 мкм  |                      |        |        |        |        |
| 1  | 0,399                | 0,380  | 0,3578 | 0,3144 | 0,2531 |
| 2  | 0,3068               | 0,2902 | 0,2703 | 0,232  | 0,1879 |
| 3  | 0,2326               | 0,2241 | 0,2089 | 0,1838 | 0,1483 |
| 4  | 0,1895               | 0,1826 | 0,1702 | 0,1498 | 0,1209 |
| 5  | 0,1598               | 0,154  | 0,1436 | 0,1264 | 0,1    |
| толщина слоя 3 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 80 мкм |                      |        |        |        |        |
| 1  | 0,2561               | 0,244  | 0,2296 | 0,2018 | 0,1625 |
| 2  | 0,2012               | 0,1944 | 0,1802 | 0,1585 | 0,1277 |
| 3  | 0,1551               | 0,1517 | 0,1414 | 0,1244 | 0,104  |
| 4  | 0,1263               | 0,1217 | 0,1135 | 0,1    | 0,0806 |
| 5  | 0,1049               | 0,099  | 0,0923 | 0,0813 | 0,0657 |
| толщина слоя 4 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 80 мкм |                      |        |        |        |        |
| 1  | 0,2021               | 0,1947 | 0,1812 | 0,1593 | 0,1282 |
| 2  | 0,1436               | 0,1383 | 0,1288 | 0,1133 | 0,0914 |
| 3  | 0,1188               | 0,110  | 0,102  | 0,0919 | 0,0744 |
| 4  | 0,0965               | 0,093  | 0,0867 | 0,0763 | 0,0601 |
| 5  | 0,0799               | 0,077  | 0,0718 | 0,0632 | 0,0503 |
| толщина слоя 5 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 80 мкм |                      |        |        |        |        |
| 1  | 0,1596               | 0,1537 | 0,1431 | 0,1258 | 0,1012 |
| 2  | 0,1217               | 0,1172 | 0,1092 | 0,096  | 0,0774 |
| 3  | 0,0967               | 0,0932 | 0,0868 | 0,0764 | 0,058  |
| 4  | 0,0777               | 0,0749 | 0,0698 | 0,0615 | 0,0475 |
| 1  | 2                    | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 5  | 0,0653               | 0,0619 | 0,0577 | 0,0508 | 0,0402 |
| толщина слоя 1мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 100 мкм |                      |        |        |        |        |
| 1  | 0,8285               | 0,7905 | 0,7363 | 0,6407 | 0,5109 |

| Продолжение таблицы 1   |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2   | 0,634  | 0,604  | 0,5628 | 0,4913 | 0,3899 |
| 3   | 0,5037 | 0,4822 | 0,4466 | 0,3906 | 0,3112 |
| 4   | 0,411  | 0,39   | 0,3623 | 0,3174 | 0,2523 |
| 5   | 0,3392 | 0,3255 | 0,3021 | 0,2638 | 0,21   |
| толщина слоя 2 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 100 мкм |        |        |        |        |        |
| 1   | 0,41   | 0,395  | 0,3643 | 0,317  | 0,2528 |
| 2   | 0,3109 | 0,3    | 0,2791 | 0,2438 | 0,195  |
| 3   | 0,2519 | 0,244  | 0,223  | 0,1941 | 0,154  |
| 4   | 0,2038 | 0,1954 | 0,1812 | 0,1587 | 0,127  |
| 5   | 0,171  | 0,164  | 0,151  | 0,132  | 0,1051 |
| толщина слоя 3 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 100 мкм |        |        |        |        |        |
| 1   | 0,275  | 0,264  | 0,242  | 0,213  | 0,1703 |
| 1   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 2   | 0,211  | 0,203  | 0,188  | 0,164  | 0,13   |
| 3   | 0,167  | 0,16   | 0,148  | 0,129  | 0,104  |
| 4   | 0,1366 | 0,131  | 0,121  | 0,106  | 0,085  |
| 5   | 0,1136 | 0,1085 | 0,101  | 0,088  | 0,07   |
| толщина слоя 4 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 100 мкм |        |        |        |        |        |
| 1   | 0,205  | 0,195  | 0,182  | 0,159  | 0,127  |
| 2   | 0,157  | 0,152  | 0,141  | 0,123  | 0,098  |
| 3   | 0,126  | 0,120  | 0,112  | 0,098  | 0,078  |
| 4   | 0,102  | 0,098  | 0,091  | 0,079  | 0,063  |
| 5   | 0,086  | 0,082  | 0,075  | 0,066  | 0,051  |
| толщина слоя 5 мм, давление истечения 330 МПа, диаметр абразивной частицы 100 мкм |        |        |        |        |        |
| 1   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 1   | 0,165  | 0,159  | 0,147  | 0,129  | 0,102  |
| 2   | 0,124  | 0,120  | 0,111  | 0,098  | 0,078  |
| 3   | 0,1    | 0,095  | 0,088  | 0,077  | 0,062  |
| 4   | 0,081  | 0,078  | 0,073  | 0,063  | 0,051  |
| 5   | 0,067  | 0,065  | 0,06   | 0,052  | 0,042  |

## ВЫВОДЫ

1. Получены закономерности разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока, позволяющие технологу назначить режимы гидроабразивного резания с учетом конструктивных особенностей пакета материалов.

2. Разрешая пошагово систему уравнений движения абразивной частицы (10) с подвижными граничными условиями, получим не явную зависимость скорости движения сверхзвукового потока абразивных частиц вдоль преграды, обеспечивающей ее сквозное разрушение от давления истечения потока, толщины преграды, природы самого материала, формы частиц, количества слоев, зазора между слоями расхода абразива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. С. 9 – 14.

**Степанов Юрий Сергеевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Доктор технических наук, проректор по научной работе, профессор  
 Тел. (4862) 47-50-71  
 E-mail: [stepanov@ostu.ru](mailto:stepanov@ostu.ru)

**Барсуков Геннадий Валерьевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел. (4862) 41-98-18

E-mail: [upk@ostu.ru](mailto:upk@ostu.ru)

**Михеев Александр Васильевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Аспирант кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

Тел. (4862) 41-98-18

E-mail: [sash89038818891@mail.ru](mailto:sash89038818891@mail.ru)

УДК 338.24 (975)

П.В. ГАЛАГАН

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССАХ НАПЫЛЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

*В статье на основе системного анализа рассматриваются возможности использования современных информационных технологий на различных стадиях разработки, тиражирования и их внедрения в процессы напыления упрочняющих покрытий.*

*Ключевые слова:* информационные технологии, упрочняющие покрытия, напыление

*The article on basis of system analysis discusses the possibility of the usage of modern information technologies at different stages of development, replication and their adoption into the strengthening treatment processes.*

*Key words:* the information technologies strengthening coverings, spraying

Ежегодно в России создается около 300 новых машиностроительных технологий. 12% из них соответствуют лучшим зарубежным образцам или не имеют аналогов в мире. Большая часть их относится к оборудованию, конструкционным материалам, заготовительному производству, сварке и модификации поверхностей, и связана с применением информационных технологий как основным фактором инновационного развития отрасли. Вместе с тем, распространение информационных технологий в промышленности происходит крайне медленно [1]. Это объясняется тем, что несмотря на наличие разработок в области ИТ, большинство из них характеризуется недостаточным теоретическим обоснованием их внедрения в промышленность, отсутствием системности, устаревшим программным продуктом и высокой стоимостью внедрения. Кроме того, при первоначальном внедрении информационных технологий, они являются неэффективными и оправдывают себя только при массовом и серийном производстве.

Технологический процесс напыления упрочняющих покрытий на различные виды деталей применяется в настоящее время достаточно часто в целях восстановления быстронашиваемых дорогостоящих деталей, таких, например, как осей и валов различных транспортных средств. Однако, повышение качества данного процесса сдерживается отсутствием информационной базы и систем автоматизированного управления. Создание информационной базы и автоматизация невозможны без системного анализа всех этапов процесса. Системный анализ позволяет выявить этапы технологического процесса, сочетание которых в определенной последовательности с причинно-следственными связями, приводит к системному решению, позволяющему достичь уменьшение трудоемкости и повышение качества выполняемых этапов, операций, переходов.

Технологический процесс нанесения упрочняющих покрытий рассматривается как класс технических систем, отличительной особенностью которого является существенная

зависимость от времени. Методами системного анализа определены план, этапы (рисунок 1), операции, переходы технологического процесса, номенклатура элементов, состав элементов каждого типа и набор свойств этих элементов.

Основная цель проектирования технологических процессов нанесения упрочняющих покрытий на поверхность восстанавливаемых и новых деталей состоит в том, чтобы выбрать оборудование, инструмент, средства, операции и определить условия организации производства с их применением. При этом само изделие и наносимые материалы должны обладать заданным уровнем физико-химических, механических и технологических свойств. Использование математического моделирования, компьютерной техники и информационных технологий здесь является важнейшим условием не только для существенного сокращения материальных и временных ресурсов, но и значительного повышения уровня качества проектирования в целом.

Технологический процесс напыления упрочняющих покрытий является сложной системой, состоящей из проектирования, моделирования и запуска производства. В свою очередь каждую подсистему можно разбить на отдельные подсистемы.

1. Подсистема проектирования, исследования и моделирования процессов напыления и разрабатываемого оборудования. Ее задачами является создание оборудования, разработка операций предварительной подготовки деталей для нанесения покрытий, отработка и оптимизация плазменного, детонационного или газодинамического режимов напыления; разработка соответствующих рекомендаций; прогнозирование свойств и возможных дефектов покрытия; планирование 100% выходного контроля и протоколирования качества покрытий, диагностики технического состояния оборудования.

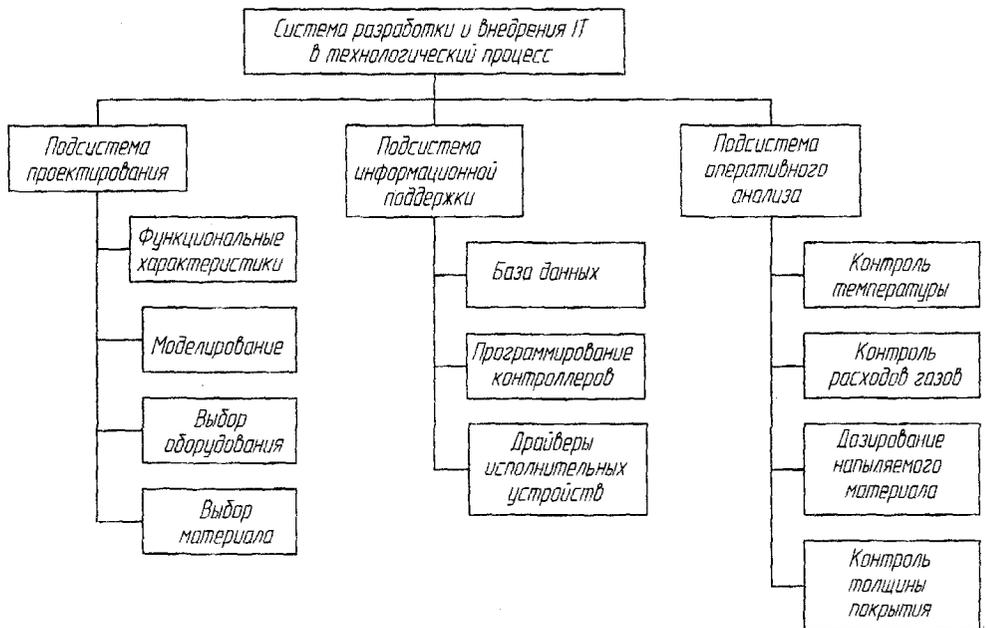


Рисунок 1 – многоуровневое представление структуры системы разработки и внедрения ИТ

Сегодня в развитых странах более 80% крупных, более 75% средних и более 50% мелких машиностроительных предприятий используют современные методы моделирования при разработке своих технологических процессов. Это относится и к моделированию газотермических процессов напыления и обусловлено необходимостью учета сложных процессов в материале заготовки и напыляемом материале, проходящих на макро- и микроструктурном уровне. С преодолением сложностей 3D - методов конечных элементов моделирование процессов напыления покрытий позволит определять оптимальные режимы обработки,

предсказывать прочность и однородность наносимых покрытий, возможность возникновения и предотвращения появления различных дефектов.

Внедрение компьютерного моделирования в производство сопровождается серьезными изменениями в подходе к разработке технологических процессов, так как десять лет назад очень немногие технологи в своей повседневной работе пользовались такими понятиями, как градиенты скоростей, температур и концентраций, конечно-разностные методы решения дифференциальных уравнений, граничные и начальные условия их однозначности и сходимости, интенсивность температурных деформаций, перегрев и структурные изменения материала, адгезия покрытия и т.п.

2. Подсистема использования информационных технологии подготовки запуска производства и комплексной автоматизации технологических процессов, должна предусматривать компьютерную обработку документации технических заданий, предоставляемых в электронном виде; выбор и разработку программных и технических средств контроля и управления, диагностики состояния и износа работающего оборудования и обеспечение безопасности. Процессы напыления характеризуются большим числом регулируемых технологических параметров и устройств позиционирования. Для детонационного напыления, например, основными из них являются соотношение расходов газов - горючего, кислорода, азота или воздуха; глубина загрузки и степень заполнения объема ствола; расход азота для продувки; толщина слоя напыляемого материала за один цикл; дистанция напыления и др. В зависимости от состава рабочей смеси может происходить полное или неполное сгорание горючего газа. От глубины загрузки зависит время пребывания частиц порошка внутри ствола. Дистанция напыления определяется из условия минимального воздействия на поток частиц отраженной от поверхности подложки волны. Эта величина составляет 150 - 200 мм. От процентного соотношения горючего, окислителя и разбавителя, а также от их объема зависит количество тепла, выделяющегося при детонации, температура и скорость истечения напыляемого порошка.

Современные системы управления с использованием промышленных компьютеров позволяют не только эффективно организовать технологический процесс напыления, но при необходимости детально документировать его осуществление для каждой конкретной детали. Одним из возможных вариантов реализации управления может быть компьютерная система управления детонационным напылением покрытий, разработанная с использованием среды LabVIEW [3].

Большое значение для прочности наносимого покрытия имеет показатель адгезии раскаленных частиц напыляемого материала к поверхности восстанавливаемых деталей. Этот показатель зависит от качества поверхности и ее температуры. Последняя определяется конкретными значениями теплопроводности и теплоемкости материала восстанавливаемой детали, ее размеров, массы, режима работы плазмотрона, горелки или детонационной пушки и времени прогрева поверхности. Как правило, все эти характеристики заранее не определены, а при восстановлении единичных деталей вообще не известны. При этом подготовка и напыление упрочняющих покрытий являются достаточно энерго- и ресурсоемкими, многопараметрическими объектами регулирования и подлежат оптимизации. Наилучшим инженерным решением этих задач является непосредственный контроль регулируемых параметров и их участие в реализации выбранного закона управления. В качестве примера может быть рассмотрено измерение температуры поверхности при нагреве детали и включение процесса напыления в момент, когда эта температура достигает требуемых значений на всей обрабатываемой поверхности. Такой контроль предполагает использование практически безинерционных датчиков температуры и сканирование всей поверхности [3].

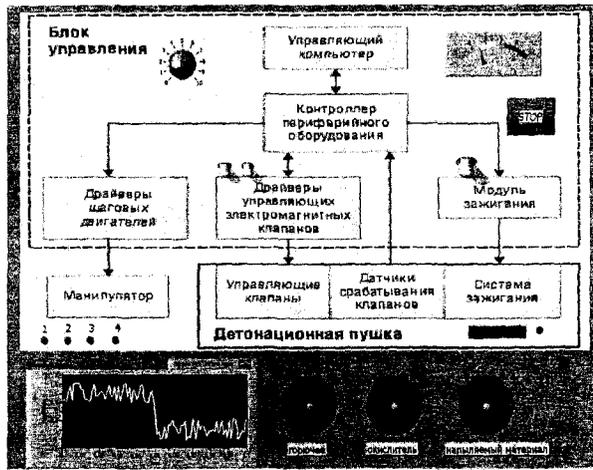


Рисунок 2 – Лицевая панель программы работы компьютерной системы управления детонационным напылением покрытий

Для оптимизации системы управления может быть использована математическая модель, построение которой сводится к записи дифференциальных уравнений соответствующих законов локального конвективного разогрева плоского или цилиндрического тела с учетом начальных условий и результатов непосредственных измерений температуры. Таким образом, предлагается модель, предшествующая регулярному режиму, характеризующая неоднородное распределение температур у поверхности детали, которое при определенных значениях критерия Био формируется главным образом за счет начальных условий. При этом учитывается, что реальные процессы нагрева являются стохастическими за счет индивидуальной неоднородности реальной детали, начального состояния и погрешности результатов измерения.

$$\begin{cases} \frac{dT(t)}{dt} = Bi\{\theta - T(t)\} \\ T_0 = T_0 + \xi_0; \\ T_{изм}(t) = T(t) + \eta(t); \end{cases} \quad (1)$$

- где  $Bi$  - безразмерный критерий Био, характеризующий теплообмен от теплоносителя к нагреваемому телу,
  - $t$  - критерий Фурье (безразмерное время),
  - $\theta$  - среднеинтегральная температура обрабатываемой поверхности,
  - $T(t)$  - истинное значение температуры нагреваемого тела, которое необходимо оценить,
  - $T(0)$  - начальное значение температуры тела ;
  - $\theta$  - среднеинтегральная температура обрабатываемой поверхности,
  - $T_{изм}(t)$  - измеренное с некоторой погрешностью  $\eta(t)$  значение температуры поверхности,
  - $T_0$  - детерминированная составляющая начального состояния нагреваемого тела,
  - $\xi_0$  -случайная составляющая начального состояния.
- Откуда

$$\theta = \frac{1}{\tau_{изм}} \int_0^{\tau_{изм}} \theta(t) dt$$

здесь  $\tau_{изм}$  -время наблюдения.

Относительно помех измерений  $\xi_0$  и  $\eta(t)$  делается предположение, что они являются случайными величинами. В нестационарной модели (1) следует оценить неизвестные числ

ю и истинную температуру поверхности -  $T(t)$ . Для ее идентификации в модели, может быть использован метод оптимальной фильтрации Калмана-Бьюси. Результаты оценки параметра Био показывают, что в начальный интервал времени наблюдается значительное отклонение восстановленного значения Био от истинного значения этого параметра. Начиная с  $t=0,3$ , т.е. 1-2 минутам реального времени, оценка параметра Био приближается к истинной величине. Результаты оценки состояния нагрева поверхности тела показывают, что температура металла, рассчитанная по модели отклоняется от измеренной в пределах от 0,5-2 %.

3. Подсистема информационной поддержки оперативного анализа качества продукции и состояния оборудования; электронной рекламы и он-лайн консультаций, предусматривающей создание обширной базы данных по оборудованию, эксплуатационным и технологическим свойствам напыляемых материалов и составления отчетов.

Использование информационных технологий находит все более широкое применение на российских промышленных предприятиях. Для их эффективного использования каждый этап должен быть обоснован, детализирован, а информационные технологии должны быть максимально формализованы, основаны на системном подходе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Архипова М.Ю. Статистический анализ основных тенденций создания и использования передовых технологий // Вопросы статистики. 2007. № 7.
- 2 Качала В.В. Основы теории систем и системного анализа. - М.: Телеком, 2007-216 с.: ISBN 978-5-93517-349-9
- 3 Галаган П.В. Оптимизация системы управления технологическим процессом газотермического напыления поверхности восстанавливаемых деталей. Материалы международной конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» - М.: Изд-во РУДН, 2009. - с. 182-183 ISBN5-209-00888-6

Галаган Павел Владимирович  
Орловский государственный технический университет  
Аспирант кафедры «Прикладная информатика и математика»  
Тел.: 8-905-165-23-88  
E-mail: [pvl@inbox.ru](mailto:pvl@inbox.ru)

УДК 621.822.5+621.822.6

ГЕРАСИМОВ С.А., МАЙОРОВ С.В., СТРУЧКОВ А.А.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОДЕМФЕРНОЙ СОВМЕЩЕННОЙ ОСЕВОЙ ОПОРЫ

*В статье впервые рассмотрены уравнения движения ротора установленного на упругодемпферной совмещенной осевой опоре, которая позволяет увеличить надежность и долговечность опорного узла путем снижения общего уровня вибраций и динамических нагрузок, за счет введения в конструкцию упругодемпферного элемента.*

**Ключевые слова:** Ротор, упругодемпферная совмещенная осевая опора, упорный многоклиновый подшипник скольжения, упорный подшипник качения.

*We considered rotor motion equation with axial combined stiffness-damping support, which allows to increase the reliability and durability per reducing the value of vibration and dynamic loads by stiffness-damping element.*

**Keywords:** rotor, axial combined stiffness-damping support, polyshoes thrust plane bearing, thrust rolling bearing.

Развитие промышленных технологий требует разработки роторных машин с высокой производительностью и повышенными требованиями по работоспособности. Для повышения полезной мощности новых роторных машин используют два пути: 1) увеличение габаритов агрегата; 2) увеличение частоты вращения ротора. Первый путь используется обычно для стационарных турбогенераторов энергетической промышленности. Для агрегатов ракетно-космической и авиационной техники, в условиях жестких ограничений по массе и габаритам, единственно приемлемым остается второй путь. Возрастание скоростей и энергонапряженности турбомашин с одновременным ужесточением требований к ним по надежности, ресурсу, габаритным размерам и массе, а также увеличивающиеся виброперегрузки и виброперемещения вызывают необходимость совершенствования опорных узлов. В настоящее время одним из путей совершенствования опорных узлов агрегатов энергетического и транспортного машиностроения является совмещение подшипников качения и скольжения в единый узел, что является эффективным путем повышения надежности и долговечности опоры и агрегата в целом за счет разделения и дублирования функций на различных режимах работы. Наиболее эффективным методом снижения общего уровня вибраций и динамических напряжений в опорах турбоагрегатов является подбор рациональных жесткостных и демпфирующих параметров системы «ротор – подшипники», а именно применение упругодемпферных опор, а также снижение внешнего возбуждающего воздействия. Однако из-за невозможности изменения параметров внешних воздействий, обусловленных заданными рабочими параметрами машины, последний метод полностью не отвечает требованиям, предъявляемым к роторным системам. Поэтому большая часть вибрационных дефектов может быть устранена за счет правильного демпфирования системы "ротор – подшипник скольжения – демпфер", потому что именно в опорах осуществляется связь ротора с корпусом.

Наряду с радиальными колебаниями обусловленными дисбалансом в роторах имеют место осевые колебания вызванные, например, пульсациями давлений в газовоздушном тракте осевых компрессоров и турбин, инерционными нагрузками возникающими при колебании лопаток, установленных под углом к плоскости вращения, изменением полезной нагрузки за оборот в шестеренных и винтовых насосах.

На рисунке 1 представлена модель упругодемпферной осевой совмещенной опоры, состоящей из упорного подшипника качения (ПК) 2 и гидродинамического подшипника скольжения (ПС) с гарантированным осевым зазором б, образованного торцом вала 1 и профилированным подпятником 3 установленным на упругодемпферном элементе (УДЭ) 4. Данная конструкция позволяет полностью разгрузить радиально-упорный подшипник качения от действия осевых сил, как в рабочем режиме (гидравлическая сила), так и в покое (сила веса).

Принцип действия данной опоры [1] заключается в следующем: в состоянии покоя или в моменты пуска и останова, когда скорость вращения вала незначительна или равна нулю, осевую нагрузку воспринимает подшипник качения, при этом гидродинамический подшипник скольжения имеет конструктивный гарантированный осевой зазор, обеспеченный при сборке, что исключает износ его упорных поверхностей. При переходных режимах и действиях возмущающих сил подпятник 3 имеет возможность возвратно-поступательного перемещения в осевом направлении за счет упругого демпфирующего элемента 4 установленного в корпусе 5.

С увеличением скорости, в результате возникновения гидродинамической реакции в зазоре подшипника скольжения и возрастания его несущей способности, внешняя нагрузка передается на корпус через тела качения и смазочный слой подшипника скольжения, что обеспечивает более легкие условия работы подшипника качения по сравнению с его одиночной постановкой.

В качестве базовых, для представленной совмещенной опоры, были выбраны многоклиновый гидродинамический подшипник скольжения и упорный шариковый подшипник качения. Нахождение деформаций подшипника качения основывается на решении контакт-

ной задачи Герца [2,3], расчетная схема которой представлена на рисунке 2. Согласно этой теории относительное сближение  $\delta$  верхнего и нижнего колец (здесь и в дальнейшем под

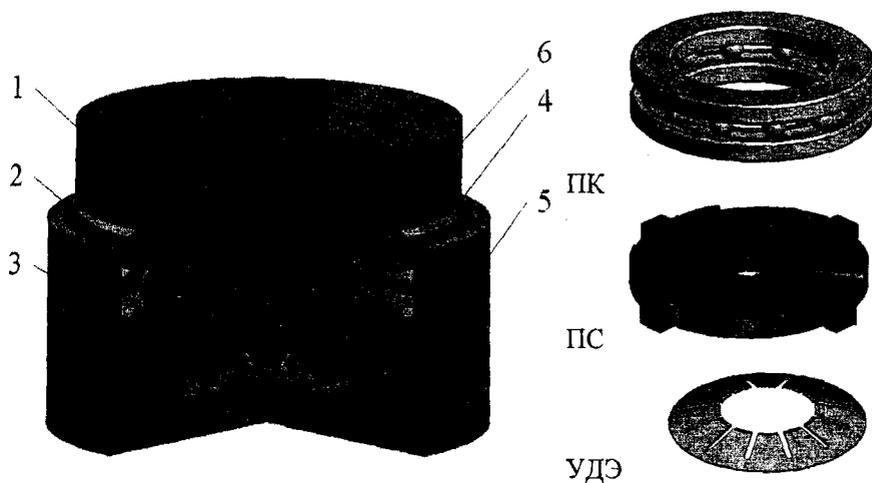


Рисунок 1 – Упругодеформерная совмещенная опора осевого типа

1- вал; 2-подшипник качения; 3-подшипник скольжения; 4-упругий элемент; 5-корпус; 6-гарантированный зазор.

внутренним кольцом упорного подшипника качения понимается тугое кольцо, закрепленное на валу, под наружным – свободное кольцо, закрепленное в корпусе;  $r_{11}$ ,  $r_{12}$  – главные радиусы кривизны шарика;  $r_{21}$ ,  $r_{22}$  – главные радиусы кривизны дорожки качения кольца) упорного подшипника качения под действием силы  $F$  имеет вид:

$$\delta = \frac{2F(k)}{\pi m} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \beta_0^2 \chi F^2}, \quad (1)$$

где  $F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}$  – полный эллиптический интеграл первого рода;

$k^2 = 1 - \frac{A}{B}$  – эксцентриситет контура эллиптической площадки контакта, величины  $A$  и  $B$  в

случае контакта шара и дорожки качения определяются следующими соотношениями:

$$A = \left( \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{21}} \right) / 2; \quad B = \left( \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{22}} \right) / 2;$$

$m = \sqrt[3]{\frac{2E(k)}{\pi(1-k^2)}}$  – вспомогательная величина;

$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$  – полный эллиптический интеграл второго рода;

$\chi = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{22}} + \frac{1}{r_{21}}$  – сумма главных кривизн;

$\beta_0 = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$  – коэффициент, характеризующий упругие характеристики материала,

где  $\nu_j$ ,  $E_j$  – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов двух соприкасающихся тел.

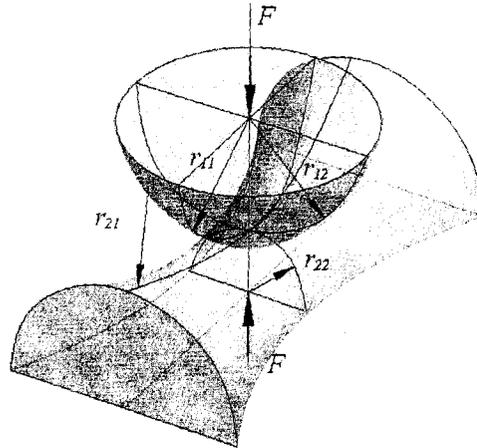


Рисунок 2 – Схема контакта поверхностей

Реакция подшипника качения  $R_{ПК}$  может быть определена на основе уравнения (1), следующим образом:

$$R_{ПК} = Fn = \frac{2n}{3\beta_0} \sqrt{\frac{1}{\chi} \left( \frac{Z_B \pi m}{2F(k)} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество тел качения,  $Z_B$  – перемещение вала в осевом направлении.

Расчет реакций и несущей способности подшипника скольжения основывается на знании поля давления в смазочном слое. Расчет гидродинамических реакций упорных подшипников скольжения в режиме жидкостного трения проводится путём интегрирования поля давлений. В свою очередь поле давлений может быть определено на основе уравнения классической гидродинамической теории смазки – уравнения Рейнольдса (3), обобщенного на случай стационарного двухмерного турбулентного течения вязкого сжимаемого смазочного материала:

$$\frac{\partial}{r \partial r} \left[ \frac{\rho h^3}{\mu K_r} r \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r^2 \partial \varphi} \left[ \frac{\rho h^3}{\mu K_\varphi} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right] = 6\omega \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho h) + 12\rho V_z, \quad (3)$$

где  $r, \varphi$  – полярные координаты;  $h$  – функция осевого зазора;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\rho$  – плотность;  $K_r, K_\varphi$  – коэффициенты турбулентности в радиальном и окружном направлениях соответственно [4];  $p$  – давление;  $\omega$  – угловая скорость вращения вала;  $V_z$  – скорость вала в осевом направлении. Распределение давления в смазочном слое зависит от его толщины  $h(r, \varphi)$ , которая в свою очередь зависит от радиуса и угловой координаты (рисунок 3). Функция осевого зазора  $h(r, \varphi)$  имеет вид:

$$h(r, \varphi) = h_0 - \text{tg} \gamma_r [r \cos(\varphi - \alpha_x(i-1) - \alpha) - R_{\text{int}}] - \text{tg}(-\gamma_\varphi) r \sin(\varphi - \alpha_x i - \alpha) + Z_B - Z_\Pi,$$

где  $h_0$  – номинальный осевой зазор;  $\gamma_r$  и  $\gamma_\varphi$  – углы наклона по направлениям  $r$  и  $\varphi$ ;  $\alpha_x$  – угол одного клина;  $\alpha$  – угол поворота пяты в плоскости  $XY$ ;  $R_{\text{int}}$  и  $R_{\text{out}}$  – внутренний и внешний радиусы подпятника соответственно;  $Z_\Pi$  – перемещение вала и подпятника в осевом направлении.

На основании интегрирования расчетных значений полей давления в смазочном слое определяется несущая способность подшипника, равная реакции смазочного слоя  $R_{\text{ПС}}$ , обусловленная вязкостью смазочного материала.

$$R_{ПС} = \int_0^{2\pi} \int_{R_{in}}^{R_{out}} r p dr d\varphi. \quad (4)$$

Методика численного решения уравнения (3) и соответствующие ему граничные условия, а также определения осевой реакции  $R_z$ , основанная на методе конечных элементов для аналогичного одноклинового подшипника изложена в работе [5]. Для рассматриваемого многоклинового подшипника подход в целом остается тем же, однако требуется некоторые уточнения, которым будут посвящены последующие работы автора.

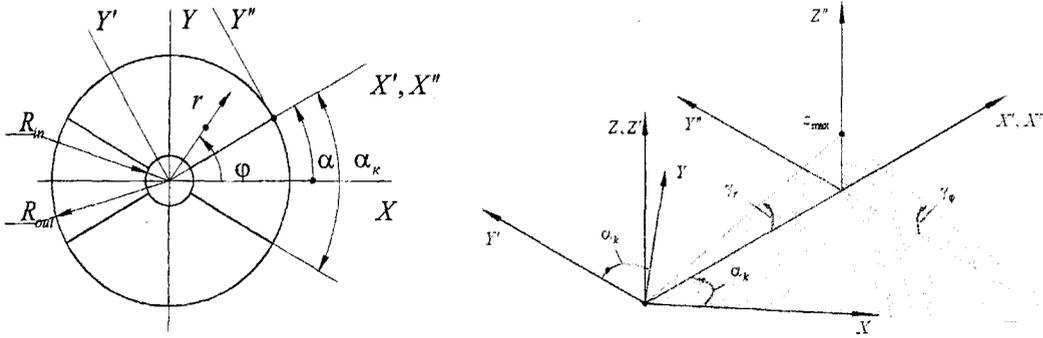


Рисунок 3 – Схема к расчету функции осевого зазора

Реакцию  $R_d$  упругодемпферного элемента (УД) можно представить следующим образом:

$$R_d = -k_d Z_{П} - b_d \dot{Z}_{П}, \quad (5)$$

где  $k_d$ ,  $b_d$  – коэффициенты жесткости и демпфирования упругодемпферного элемента,  $\dot{Z}_{П}$  – скорость подпятника в осевом направлении.

Уравнения движения могут быть получены на основании второго закона Ньютона из рассмотрения системы сил представленной на рисунке 4.

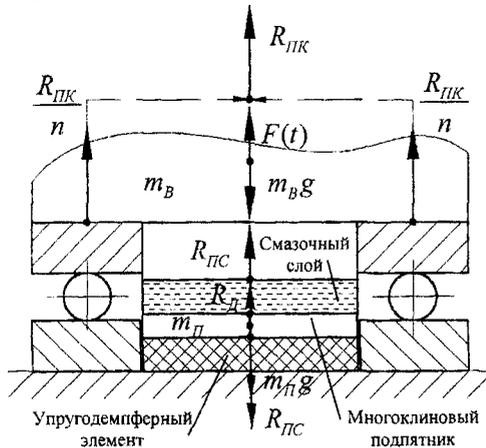


Рисунок 4 – Расчетная схема упругодемпферной опоры

Динамика системы «ротор – упругодемпферная опора» описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_B \ddot{z}_B = -m_B g + R_{ПС} + R_{ПК} + F(t); \\ m_П \ddot{z}_П = -m_П g - R_{ПС} + R_d - k_d Z_{П} - b_d \dot{Z}_{П}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $m_B$  – масса вала,  $m_{II}$  – масса подпятника;  $F(t)$  – возмущающее воздействие;  $g$  – ускорение свободного падения.

Решение системы уравнений (6) совместно с уравнениями (2) – (5) представляет собой достаточно сложную задачу. Методы решения данной задачи и анализ результатов по определению динамических характеристик «ротор – упругодемпферная опора» будут изложены в дальнейших работах авторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пат. №2323373 МПК F16C 21/00. Комбинированная опора / Савин Л.А., Герасимов С.А., Стручков А.А., Поляков Р.Н., Алехин А.В. – Оpubл. 27.04.2008, Бюл. №12.
- 2 Ландау Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М., «Наука», 1965 – 204 с.
- 3 Демидов С.П. Теория упругости: учебник для вузов [Текст] / С.П. Демидов // – М.: Высш. школа, 1979. – 432 с., ил.
- 4 Типей, Н. Подшипники скольжения: расчет, проектирование, смазка [Текст] / Н. Типей, В. Н. Константиnescу – Бухарест : Изд-во АН РНР, 1964. – 458 с.
- 5 Герасимов С.А. Конечнo-элементная модель расчета реакций упорного подшипника скольжения [Текст] / С.В. Майоров, А.А. Стручков // Вибрационные машины и технологии: сб. науч.тр. VIII Международной научно-технической конференции «Вибрация – 2010. Управляемые вибрационные технологии и машины» – Курск, КГТУ, 2010 – с. 214 –220.

### Герасимов Сергей Анатольевич

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: [sa\\_gerasimov@mail.ru](mailto:sa_gerasimov@mail.ru)

### Майоров Сергей Анатольевич

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
к.т.н., инженер кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: [pmp1@ostu.ru](mailto:pmp1@ostu.ru)

### Стручков Александр Александрович

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
к.т.н., инженер кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: [pmp1@ostu.ru](mailto:pmp1@ostu.ru)

УДК 621.922

В. Г. ГУСЕВ, П. С. ШВАГИРЕВ, Р. В. ЖИГАЛОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ ПЛОСКОМ ТОРЦОВОМ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЖЕСТКОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА

*Проанализирован механизм снятия припуска с обрабатываемых заготовок в условиях изменяющейся жесткости шпиндельного узла. Установлен факт снижения производительности технологической операции при действии главного вектора дисбалансов инструмента.*

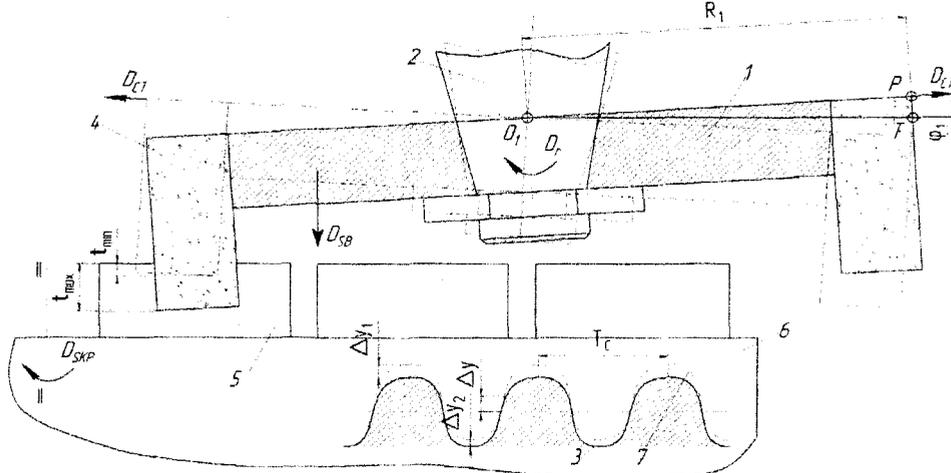
**Ключевые слова:** жесткость, шпиндельный узел, главный вектор дисбалансов, съем металла, плоское торцовое шлифование.

*Workpiece chipping had been analysed under the conditions of varying spindle block rigidity. The fact of working operation performance degradation under the influence of main unbalance vector of the cutting tool had been accepted.*

**Keywords:** rigidity, spindle block, main unbalance vector, chipping, face grinding.

Параметры процесса шлифования с течением времени непрерывно изменяются: режущая поверхность инструмента теряет первоначальную, заданную правкой, форму из-за износа и затупления абразивных зерен, частичного или полного самозатачивания круга. Изменяется геометрия обрабатываемой поверхности заготовок, образуются волны на самой режущей поверхности, появляются дисбалансы круга, являющиеся источником вибрации элементов технологической системы и др. Указанные явления достаточно глубоко изучены для различных видов шлифования.

В процессе шлифования происходит также изменение жесткости шпиндельного узла, обусловленное появлением эксплуатационных дисбалансов круга, вызывающих повышенный уровень вибрации технологической системы. Этот аспект в научно-технической литературе ранее не рассматривался, хотя изменение жесткости шпиндельного узла с установленным на нем шлифовальным кругом оказывает существенное влияние на минутный съем металла, а, следовательно, на производительность процесса обработки.



**Рисунок 1 – Колебания шпиндельного узла с установленным торцовым шлифовальным кругом при статической неуравновешенности:**

$D_r, D_{sb}, D_{skp}$  – соответственно направления вращения инструмента, скорости его вертикальной подачи и скорости круговой подачи заготовок

При шлифовании неуравновешенным торцовым шлифовальным кругом 1, (в частности, при наличии главного вектора дисбалансов  $D_{ct}$ ) шпиндельный узел 2 вместе с кругом совершает вынужденные гармонические колебания, описываемые синусоидой 3, изображенной сплошной линией (рис. 1).

Колебания приводят к изменению глубины резания и неравномерному износу инструмента. При обработке абразивным сегментом 4 заготовок 5, установленных на круглом столе 6, глубина резания изменяется от максимального  $t_{max}$  до минимального  $t_{min}$  значения. Для верхнего полупериода синусоидального колебательного движения инструмента главный вектор дисбалансов  $D_{ct}$  направлен к оси вращения II – II рабочего стола 6 (вектор  $D_{ct}$  и шлифовальный круг изображены пунктирной линией), а глубина резания будет минимальной и равной

$$t_{min} = t_0 - S_r - (A_1 - \Delta y_1). \tag{1}$$

где  $t_0$  – начальная глубина внедрения режущего зерна в материал заготовки, задаваемая настройкой станка;  $S$  – скорость вертикальной подачи инструмента;  $\tau$  – текущее время шлифования;  $A_1$  – амплитуда верхнего полупериода синусоиды 3;  $\Delta y_1$  – приращение упругой деформации шпиндельного узла, обусловленное уменьшением жесткости на верхнем полупериоде синусоиды 3.

Когда вектор  $D_{\Sigma}$  направлен от оси вращения II – II рабочего стола 6 (вектор  $D_{\Sigma}$  изображен сплошной линией), глубина резания будет максимальной

$$t_{max} = t_0 - S\tau + (A_2 - \Delta y_2), \quad (2)$$

где  $A_2$  – амплитуда нижнего полупериода синусоиды 3;  $\Delta y_2$  – упругая деформация шпиндельного узла, вызванная повышением его жесткости при увеличении глубины резания на нижнем полупериоде синусоиды 3.

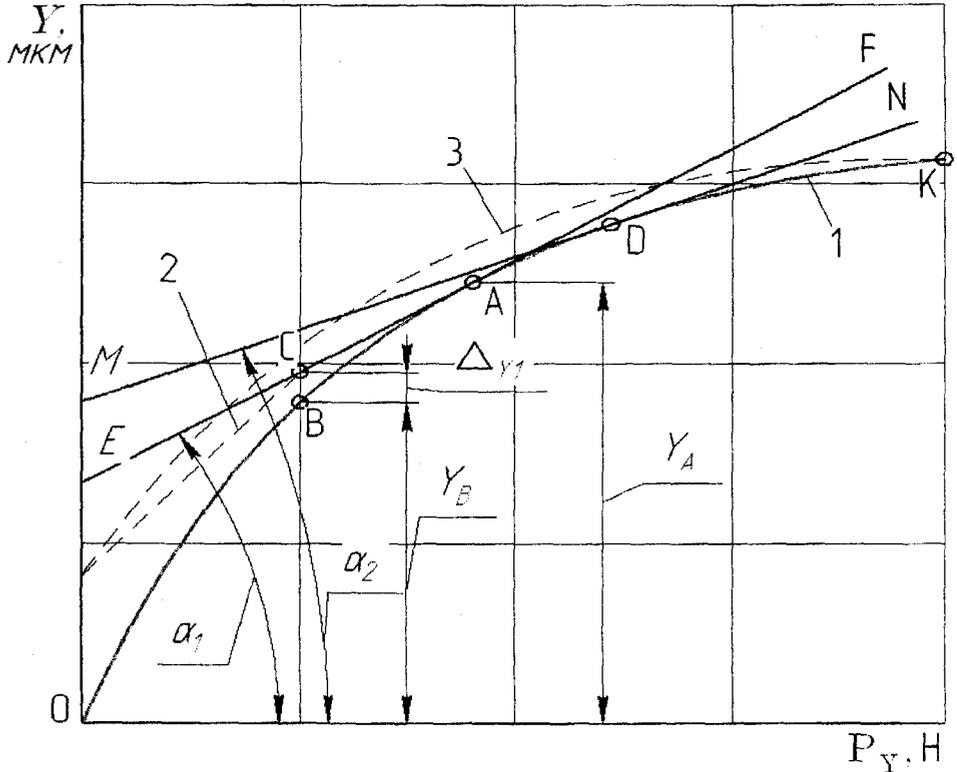


Рисунок 2 – Изменение жесткости шпиндельного узла, обусловленное действием главного вектора дисбалансов инструмента:

- 1 – ветвь нагрузки, 2 – ветвь разгрузки с началом в точке А,
- 3 – ветвь разгрузки с началом в точке К

Рассмотрим изменение жесткости шпиндельного узла, обусловленное действием главного вектора дисбалансов шлифовального круга. Пусть в рассматриваемый момент времени происходит обработка заготовок, а шпиндельный узел нагружен радиальной составляющей  $P_{yA}$  силы резания. На графике жесткости (рис. 2) этому соответствует точка А, расположенная на ветви нагрузки 1. Изменение глубины резания от  $t_{min}$  до  $t_{max}$  приводит соответственно к уменьшению и увеличению силы  $P_y$ .

В точке А радиальная составляющая силы резания равна  $P_{yA}$ , а упругая деформация  $y_A$ , следовательно, жесткость  $J_A$  шпиндельного узла, определяемая как отношение силы  $P_y$  к величине упругой деформации  $y$ , для точки А равна  $P_{yA}/y_A$ . В точке С радиальная составляющая силы резания  $P_{yC} = P_{yB}$ , а упругая деформация  $y_C = y_B - \Delta y_1$ . Так как при рассмотрении верхнего полупериода синусоиды 3 (см. рис. 1) происходит разгрузка шпиндельного узла, то точка А при уменьшении силы  $P_y$  будет перемещаться по ветви разгрузки 2 (см. рис.

2). В результате точка А не попадет в точку В, а переместится в точку С, при этом  $y_c > y_B$  на величину  $\Delta y_1$ .

Податливость  $\omega$  шпиндельного узла представляет собой величину, обратную жесткости, и в точках С и В она равна соответственно

$$\omega_c = (y_B - \Delta y_1) / P_{yB} \quad (3)$$

$$\omega_B = y_B / P_{yB} \quad (4)$$

Сравнение выражений (3) и (4) показывает, что при уменьшении силы  $P_y$  податливость шпиндельного узла возрастает, а жесткость соответственно уменьшается. Рассмотренная картина изменения жесткости шпиндельного узла характерна процессу шлифования, когда главный вектор дисбалансов  $D_{cc}$  направлен в сторону рабочего стола с заготовками.

Величина упругой деформации  $\Delta y_1$  шпиндельного узла на верхнем и  $\Delta y_2$  на нижнем полупериодах синусоиды 3

$$\Delta y_1 = \frac{\Delta P_{y1}}{\Delta j_1} = \frac{2C_{Py}(\Delta y_2)^{0.22} V_1^{0.33} V^{-0.4} B k_{Py}}{\Delta j_1} \quad (5)$$

$$\Delta y_2 = \frac{\Delta P_{y2}}{\Delta j_2} = \frac{2C_{Py}(\Delta y_2)^{0.22} V_1^{0.33} V^{-0.4} B k_{Py}}{\Delta j_2} \quad (6)$$

где  $P_y = 2C_{Py} t^{0.31} V_1^{0.33} V^{-0.4} B k_{Py}$  – зависимость для расчета радиальной составляющей силы резания [1];  $\Delta j_1, \Delta j_2$  – изменение радиальной жесткости шпиндельного узла, обусловленное приращением силы резания в процессе колебательного движения на верхнем и нижнем полупериоде синусоиды 3 соответственно;  $C_{Py}$  – коэффициент, зависящий от условий шлифования;  $t$  – глубина резания;  $V, V_1$  – скорость резания и скорость подачи;  $B$  – высота шлифовального круга;  $k_{Py}$  – поправочный коэффициент.

Вследствие того, что  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$  направлены перпендикулярно обрабатываемой поверхности заготовки, то исходная синусоида 3 смещается на величину  $\Delta y = (\Delta y_1 - \Delta y_2) / 2$ , а сам колебательный процесс протекает по синусоиде 7 с амплитудой  $A = (A_1 - A_2) / 2$  как на верхнем, так и нижнем полупериодах синусоиды 3 (см. рис. 1).

Динамическая жесткость шпиндельного узла, характерная для холостого вращения торцового шлифовального круга, без учета зазоров в подшипниковых опорах

$$I_1 = \frac{\omega_1^2 D_{cc}}{A_3} \quad (7)$$

где  $A_3$  – амплитуда колебаний шпиндельного узла на холостом ходу под действием неуравновешенной центробежной силы  $\omega_1^2 D_{cc}$ .

Упругая деформация оси шпинделя, вызванная силой  $\omega_1^2 D_{cc}$

$$y = \frac{\omega_1^2 D_{cc} l^3}{3EI} \quad (8)$$

где  $l$  – длина консоли шпинделя;  $E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлен шпиндель;  $I = \pi d_{sp}^4 / 64$  – осевой момент инерции поперечного сечения шпинделя;  $d_{sp}$  – приведенный диаметр шпинделя, на котором установлен торцовый шлифовальный круг.

На холостом ходу амплитуда колебаний  $A_3$  инструмента складывается из упругой деформации оси шпинделя и радиального зазора в передней подшипниковой опоре, выбранного неуравновешенной центробежной силой. В процессе шлифования шпиндельный узел нагружен равнодействующей силой  $\Sigma \bar{Q}$ , образованной в результате

векторного сложения радиальной  $P_{y1}$ , главной  $P_z$  составляющих силы резания и неуравновешенной центробежной силы, изменяющейся по синусоидальному закону, т. е.

$$\Sigma \bar{Q} = \bar{P}_{y1} - \bar{P}_z - \omega_1^2 D_{cc} \sin(\omega_1 \tau + \varphi) \quad (9)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость инструмента;  $\varphi$  – угол главного вектора дисбалансов.

Когда неуравновешенная центробежная сила  $Q = \omega_1^2 D_{cc}$  направлена от центра рабочего стола, абразивные сегменты, расположенные слева от оси вращения шлифовального круга, (см. рис. 1) врезаются в заготовку на максимальную глубину

$$t_{max} = t_0 + S\tau - \frac{\omega_1^2 D_{ст}}{j - \Delta j} \quad (10)$$

Когда сила  $Q$  направлена к центру стола, сегменты врезаются в заготовку на минимальную глубину

$$t_{min} = t_0 - S\tau - \frac{\omega_1^2 D_{ст}}{j - \Delta j} \quad (11)$$

В формулы (10), (11) суммарный вектор  $\vec{P}_y + \vec{P}_z$  не входит, поскольку затупление абразивных сегментов в данном случае в процессе шлифования не учитывается, а рассматривается влияние главного вектора дисбалансов  $D_{ст}$ .

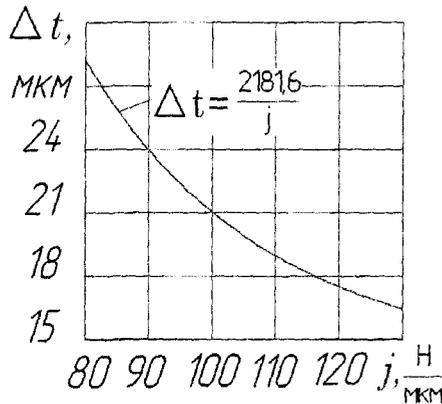
Изменение глубины резания в течение каждого оборота шлифовального круга

$$\Delta t = t_{max} - t_{min} = \frac{2j}{j^2 - (\Delta j)^2} \omega_1^2 D_{ст} \quad (12)$$

Численные значения приращения жесткости на верхнем  $\Delta j_1$  и нижнем  $\Delta j_2$  полуциклах синусоиды 3 отличаются незначительно, то можно принять, что  $\Delta j_1 = \Delta j_2 = \Delta j$ . Приращение жесткости  $\Delta j$  шпиндельного узла, обусловленное изменением глубины резания  $\Delta t$ , значительно меньше жесткости  $j$ , поэтому  $(\Delta j)^2 \ll j^2$ . Член  $(\Delta j)^2$  в выражении (12) представляет собой малую величину и ею можно пренебречь. С учетом сказанного уравнение (12) примет вид

$$\Delta t = 2 \omega_1^2 D_{ст} / j \quad (13)$$

В соответствии с (13) построены графики изменения глубины резания  $\Delta t$  в функции жесткости  $j$ , угловой скорости  $\omega_1$  шлифовального круга и главного вектора дисбалансов  $D_{ст}$ . Функция  $\Delta t = f(\omega_1)$  описывается уравнением параболы (рис. 3, а), ветви которой направлены вверх. Значительное изменение глубины резания  $\Delta t$  при увеличении угловой скорости  $\omega_1$  объясняется тем, что в уравнение (13)  $\omega_1$  входит во второй степени. Функция  $\Delta t = f(D_{ст})$  линейная, а главный вектор дисбалансов вызывает значительно меньшее изменение глубины резания по сравнению с угловой скоростью вращения инструмента. Функция  $\Delta t = f(j)$  имеет вид кривой второго порядка (рис. 3, б), согласно которой увеличение жесткости  $j$  шпиндельного узла приводит к значительному уменьшению изменения глубины резания.



а) б)

Рисунок 3 – Изменение глубины резания в зависимости от:  
а) – главного вектора дисбалансов и угловой скорости круга,  
б) – жесткости шпиндельного узла

В соответствии с зависимостью (13) можно управлять изменением глубины резания  $\Delta t$ , а, следовательно, и съемом металла в процессе плоского торцового шлифования. Для увеличения съема материала заготовки при прочих равных условиях необходимо уменьшать  $D_{ст}$ ,  $\omega_1$  и увеличивать  $j$ . Если  $D_{ст}$  направлен в противоположную сторону от центра вращения стола, то колебательный процесс протекает в соответствии с нижним полупериодом синусоиды 7 и происходит дополнительное врезание абразивных сегментов в заготовку, а,

следовательно, увеличение радиальной составляющей силы резания на величину  $\Delta P_y$ . Точка А переходит в точку D, для которой справедливо неравенство

$$P_{yD} > P_{yA} \quad (14)$$

При действии большей силы, жесткость шпиндельного узла возрастает, следовательно,  $J_D > J_A$ . Последнее неравенство подтверждается тем, что податливость шпиндельного узла в точке, наиболее удаленной от начала координат по оси абсцисс (оси  $P_y$ ), всегда меньше податливости для точки, более близко расположенной к началу координат.

В самом деле, податливость представляет собой величину, численно равную тангенсу угла наклона касательной в рассматриваемой точке графика жесткости, к положительному направлению оси абсцисс. Так, касательная EF в точке А графика жесткости (см. рис. 2) наклонена к положительному направлению оси  $P_y$  под углом  $\alpha_1$ , а касательная MN в точке D – под углом  $\alpha_2$ , при этом  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Следовательно, податливость шпиндельного узла, характерная для точки А, больше податливости, характерной для точки D. Жесткость шпиндельного узла наоборот больше в точке D, чем в точке А.

В процессе шлифования уравновешенным инструментом траектория движения единичного абразивного зерна близка к дуге окружности, в то время как для

неуравновешенного круга траектория представляется в виде синусоиды 7, располагающейся на упомянутой дуге окружности, при этом синусоида 7 смещена на величину  $\Delta y$  относительно синусоиды 3, характеризующей колебания оси шпинделя под действием главного вектора дисбалансов  $D_{ст}$ .

Вследствие смещения синусоиды 7 от обрабатываемой поверхности на величину  $\Delta y$  объем материала, снимаемого неуравновешенным шлифовальным кругом меньше объема, снимаемого уравновешенным кругом, что приводит к снижению производительности.

Шаг синусоиды 7 зависит от угловой скорости  $\omega_1$  вращения инструмента, радиуса  $R_1$ , на котором отстоит рассматриваемое абразивное режущее зерно от центра вращения шлифовального круга, и определяется:

$$T_c = \frac{\omega_1 R_1}{n} \quad (15)$$

где  $n$  – частота вращения шлифовального круга.

Площадь поперечного сечения канавки, нанесенной единичным абразивным зерном, без учета его износа

$$S_1 = \frac{2}{3} (a_1 - \Delta y) b_1 = \frac{2}{3} b_1 [t_c - S\tau - \Delta y - A \sin(\omega_1 \tau + \varphi)] \quad (16)$$

где  $a_1$ ,  $b_1$  – соответственно глубина и ширина канавки [1].

Объем металла, снимаемого единичным зерном за один оборот неуравновешенного шлифовального круга, без учета износа зерна

$$V_1 = \frac{2}{3} R_1 \varepsilon_1 b_1 (t_c + \frac{S\varepsilon_1}{\omega_1} - (\Delta y_1 - \Delta y_2)/2 - A \sin(\omega_1 \tau - \varphi)) \quad (17)$$

где  $R_1$  – упомянутый выше радиус, который находится в пределах  $0,5d_{\pi} \leq R_1 \leq 0,5d_{\pi} + B \pm 0,5T_S$ ;  $d_{\pi}$  – диаметр планшайбы, на которую устанавливают абразивные сегменты;  $B$ ,  $T_S$  – соответственно высота и допуск на высоту абразивного сегмента;  $\varepsilon_1$  – угол контакта абразивного зерна с заготовкой.

Последний член выражения (17) при изменении аргумента  $(\omega_1 \tau + \varphi)$  принимает как положительные, так и отрицательные значения.

Объем металла, снимаемого единичным зерном за один оборот уравновешенного шлифовального круга, без учета износа зерна

$$V_2 = \frac{2}{3} R_2 \varepsilon_2 b_2 (t_c + S\varepsilon_2/\omega_2) \quad (18)$$

На основании полученных зависимостей (17) и (18) проанализирован съем материала заготовки единичным абразивным зерном за время одного оборота уравновешенного и неуравновешенного торцового шлифовального круга при изменяющейся жесткости шпиндельного узла, подверженного действию главного вектора дисбалансов. При наличии  $D_{ст}$  съем металла

по сравнению с процессом плоского торцового шлифования уравновешенным кругом уменьшается, съём металла тем меньше, чем больше модуль главного вектора дисбалансов круга. Результаты настоящих исследований получили подтверждение производственными экспериментами, проведенными в условиях Владимирского моторотракторного завода в процессе торцового шлифования плоскостей детали «Лист передний».

Таким образом, плоское торцовое шлифование неуравновешенным кругом характеризуется изменением радиальной жесткости шпиндельного узла, что приводит к уменьшению объема материала, снимаемого единичным абразивным зерном в течение каждого оборота инструмента, а, следовательно, к снижению производительности шлифовальной операции. Повысить производительность процесса шлифования можно путем применения управляемого балансирующего устройства для корректировки масс инструмента, однако, это связано с финансовыми затратами на его проектирование, изготовление и эксплуатацию.

Производственные наблюдения за работой плоскошлифовальных станков, работающих торцом инструмента, показали, что в процессе эксплуатации балансирующего устройства возникает проблема: вследствие большой площади контакта инструмента с заготовками в зоне резания образуется много отходов, которые, ввиду специфики аэродинамических потоков, генерируемых инструментом, засоряют шлифовальный круг и балансирующее устройство [2]. Требуется частый останов станка для очистки их от отходов шлифования, что приводит к увеличению вспомогательного времени и снижению производительности обработки. Задача усложняется еще и тем, что значение дисбалансов, обусловленных неравномерным распределением отходов шлифования по корпусу вращающегося инструмента, в разы превышает дисбалансы, вызванные другими причинами. Это требует значительной емкости управляемого балансирующего устройства, больших по массе корректирующих грузов и приводит к существенному увеличению веса инструмента в целом, а, следовательно, к дополнительной нагрузке на шпиндельный узел, снижающей ресурс работы станка.

Для решения описанной проблемы авторами разработано устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости при плоском торцовом шлифовании [3], предотвращающее эксплуатационные дисбалансы, обусловленные сцеплением отходов шлифования с корпусом инструмента. При этом не требуются управляемое балансирующее устройство и остановки шлифовального станка для выполнения трудоемкого процесса удаления уплотненных центробежной силой отходов шлифования, прочно сцепившихся с торцовым сегментным абразивным инструментом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Резников А. Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1977. – 392 с.
- 2 Жигалов Р. В., Гусев В. Г., Швагирев П. С. Экспериментальные исследования влияния статической неуравновешенности сборного абразивного круга (САК) на производительность плоского торцового шлифования. Рыбинск: Изд – во РГАТА, 2009. – Ч. 1. – с. 172 – 176.
- 3 Патент №2385215 Российская Федерация, МПК В24В 55/02. Устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при плоском торцовом шлифовании / Гусев В. Г., Жигалов Р. В., Швагирев П. С.; заявитель и патентообладатель Владим. гос. ун-т. – Опубл. 27.03.2010, Бюл. № 9.

**Гусев Владимир Григорьевич**  
 Доктор технических наук, профессор  
 Владимирский государственный университет  
 Тел.: (4922) 479-924.  
 E-mail: [prof\\_gusev@mail.ru](mailto:prof_gusev@mail.ru)

**Швагирев Павел Сергеевич**  
 Аспирант кафедры «Технология машиностроения»

Владимирский государственный университет  
Тел.: (4922) 479-924.  
E-mail: pshvagirev@mail.ru

**Жигалов Роман Валерьевич**  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
Владимирский государственный университет  
Тел.: (4922) 279-924.

# **МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ** **ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 536.2:532/533; 532.72; 66.021.3

АБРАМОВ А.В., РОДИЧЕВА М.В., РОДИЧЕВА П.А.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ШВЕЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Проведение численной оценки интенсивности процессов тепло и массообмена одежды с окружающей средой, сопряжено с оценкой динамических характеристик, которые определяются параметрами окружающей среды и свойствами пакета одежды. Авторами предлагается экспериментальная методика для оценки динамики влагосодержания швейных материалов во времени. Результаты исследований позволяют облегчить численные расчеты интенсивности процессов тепло и массообмена одежды с окружающей средой. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 09-08-97557 на проект "Моделирование процессов тепло и массообмена в биотехнической системе "Человек-одежда-окружающая среда"*

*Ключевые слова:* Тепло-массообменные процессы; скорость сушки; влагосодержание; тепловой баланс

*Carrying out a numerical evaluation of the intensity of heat and mass transfer clothes to the environment associated with the evaluation of dynamic characteristics, which are determined by environmental parameters and the properties of a package of clothes. The authors proposed an experimental technique for assessing the dynamics of moisture content of sewing materials in time. The results can alleviate the numerical calculations of the intensity of heat and mass transfer clothes to the environment. Work is executed within the limits of the Russian Federal Property Fund grant № 09-08-97557 on the project "Modeling of processes heat - and substance exchange in biotechnical system" Person-clothes-environment"*

*Key words:* Heat and mass transfer; speed of drying; moisture content; thermal balance

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

При исследовании процессов тепло и массообмена в биотехнической системе «человек - одежда - окружающая среда», необходимо знать закономерность протекания термо-влажностных процессов в структуре швейных материалов и процессов теплоотдачи с поверхности пакета в окружающую среду. Для численной оценки процессов тепло и массообмена, создаются соответствующие математические модели. Например, модель теплоотдачи вертикального многослойного цилиндра [3]. Геометрические параметры цилиндра соизмеримы с элементами тела человека, геометрические параметры цилиндрических оболочек моделируют пакет одежды. В основу математического описания положены следующие уравнения (1,2):

$$D_1 + Q_{изл1} + Q_{конв1} + Q_{внут} = 0 \quad (1)$$

$$D_2 + Q_{изл1} + Q_{конв1} + Q_{изл2} + Q_{конв2} + Q_{изл3} = 0 \quad (2)$$

где:  $D_1 = m_i c_b \left( \frac{dT_b}{dt} \right)$  – изменение внутренней энергии элемента тела, Вт;  $D_2 = m_o c_o \left( \frac{dT_o}{dt} \right)$  – изменение внутренней энергии оболочки, Вт;  $Q_{изл1} = \epsilon_e \sigma 2\pi \cdot R \cdot l \left[ \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right]$  – теплообмен излучением между элементом тела и внутренней поверхностью оболочки, Вт;  $Q_{конв1} = \epsilon_e \sigma 2\pi \cdot R \cdot l \left[ \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right]$  – интенсивность теплообмена излучением в оболочке, Вт;

$Q_{изл3} = A \cdot J \cdot 2\pi(R + \delta)\lambda + \varepsilon_0 \sigma 2\pi(R + \delta)\lambda \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 \right]$  – теплообмен оболочки с окружающей средой, Вт;  $Q_{конв1} = \frac{\lambda_v 2\pi R l}{\delta} \varepsilon_k (T_b - T_0)$  – конвективный теплообмен в прослойке пододежного воздуха, Вт;  $Q_{конв2} = \alpha_k 2\pi(R + \delta)\lambda \cdot (T_0 - T_e)$  – конвективный теплообмен оболочки с окружающей средой, Вт;

$R$  – радиус элемента тела,  $\delta$  – толщина воздушной прослойки,  $l$  – высота элемента тела,  $m_b$  – масса элемента тела,  $c_b$  – удельная теплоемкость элемента тела,  $\varepsilon_k$ ;  $\varepsilon_e$  – приведенная степень черноты поверхностей элемента тела и оболочки,  $m_o$  – масса оболочки,  $\varepsilon_o$  – степень черноты поверхности оболочки,  $c_o$  – удельная теплоемкость оболочки,  $\sigma$  – постоянная Стефана - Больцмана;  $A$  – коэффициент поглощения поверхности оболочки,  $\lambda_e$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки,  $T_e$  – температура окружающей среды,  $J$  – интенсивность солнечной радиации,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Модель позволяет исследовать температурное поле в пакетах одежды, с учетом теплотеплопродукции человека, а также параметры окружающей среды. Однако, модель не учитывает воздействие влаги на пакет одежды. Для этого, необходимо рассматривать влияние влагосодержания на температурное поле за счет дополнительной составляющей балансовых уравнений [2]:

$$Q_{влаж} = \rho \cdot R \cdot r \frac{dj}{du} \left( 1 + \frac{c}{r} \frac{dt}{du} \right) F_n \quad (3)$$

где:  $\rho$  – плотность материала, г/м<sup>3</sup>;  $N = \frac{du}{d\tau}$  – скорость сушки, г/с;  $b = \frac{dt}{du}$  – температурный коэффициент, °C/(г/г);  $c$  – теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·K);  $F_n$  – площадь поверхности слоя, м<sup>2</sup>;  $r$  – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;

Вычисление составляющей теплового баланса (3), основывается на расчетах температурного коэффициента и скорости сушки. Эти параметры являются сложными функциями от природы волокон ткани, влагосодержания и характеристик внешнего тепло- и массообмена.

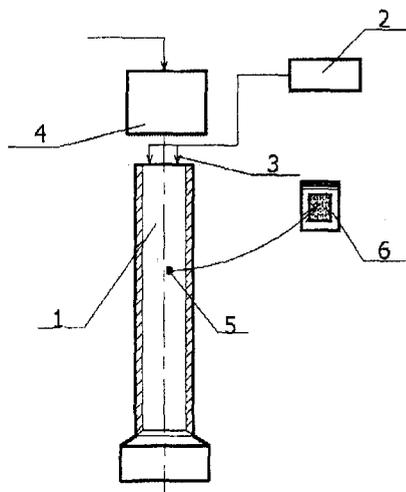
## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования динамики влагосодержания пакетов одежды во времени, которая определяет скорость сушки, авторами предложена экспериментальная методика. Сущность методики основана на том, что исследуемый пакет одежды (1) размещается на рабочей поверхности биотехнического эмулятора теплообмена, после чего увлажняется. [1]. В процессе сушки, из пакета одновременно вырезаются по одному образцу размером 25×25 мм (5), на соответствующих высотах. Время между отборами проб составляет 2-4 мин (рисунок 1). Отобранная проба помещается в герметичный пакет (6) для исключения внешней массоотдачи, после чего взвешивается, сушится в сушильном шкафу до постоянной массы и взвешивается повторно. По разности масс вычисляется влагосодержание исследуемого образца.

Увлажнение пакета одежды может происходить двумя способами: за счет внешней влаги (атмосферная влага) и за счет внутренней влаги (потоотделение). Механизмы влагоотдачи в окружающую среду в этих случаях будут существенно различаться. Предложенная экспериментальная схема позволяет моделировать оба вида увлажнения: посредством устройства для моделирования потоотделения (2,3); посредством установки моделирующей параметры дождя (4).

Для проведения исследования параметров скорости сушки влажных материалов, авторы статьи ограничивались воздействием на пакет внутренней влаги. При этом подача влаги осуществлялась на верхний торец эмулятора, после чего она беспрепятственно, под действием сил тяжести и капиллярного потенциала распределялась по структуре пакета одежды.

Время воздействия влаги составляло 40 мин. По истечению этого промежутка времени, без выключения блока подачи воды, осуществлялся отбор проб на 4-х высотах.

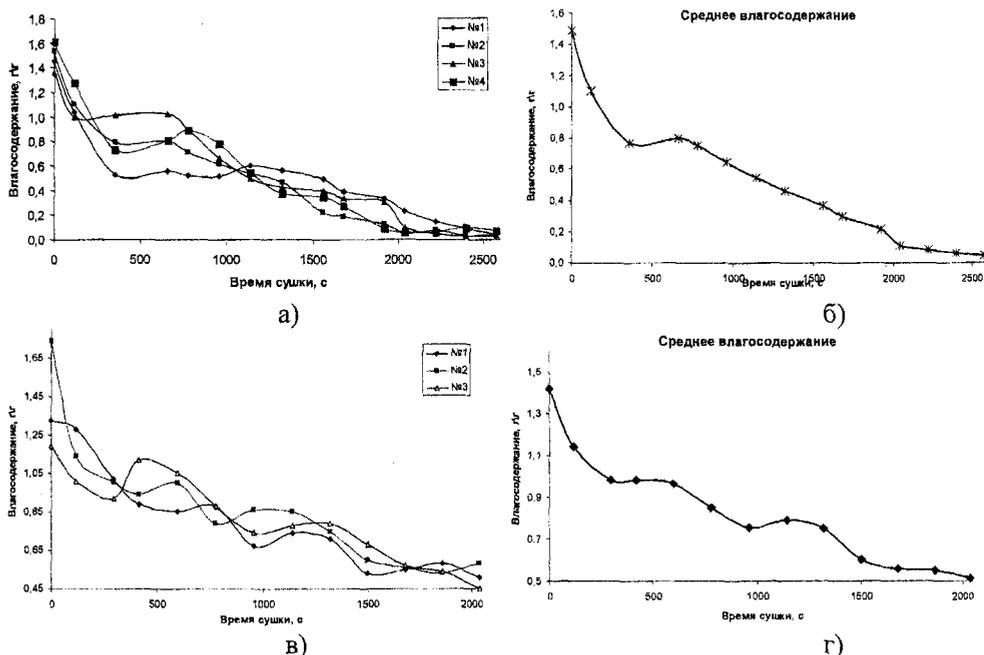


**Рисунок 1. Схема проведения экспериментального исследования**  
 1 - исследуемый пакет одежды; 2, 3 -элементы устройства для моделирования потоотделения; 4 - установка моделирующая параметры дождя; 5 - проба материала; 6 - герметичный пакет

После отбора проб, блок подачи воды отключался. Отбор проб на 4-х высотах осуществлялся через каждые 3 минуты с начала процесса сушки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С помощью описанной методики были исследованы параметров скорости сушки образцов хлопчатобумажной и льняной ткани (рисунок 2).



**Рисунок 2. Результаты исследований динамики влагосодержания**  
 а, б - хлопчатобумажная ткань; в, г - льняная ткань

Согласно полученным результатам, средняя по высоте пакета кривая убыли влагосодержания характеризуется наличием нескольких критических точек. Кривая убыли влагосодержания хлопчатобумажной ткани содержит 2 критические точки (400 сек и 2000 сек с момента начала сушки). До первой критической точки из структуры материала удаляется свободная влага, содержащаяся в порах между нитями. Между первой и второй критическими точками, из структуры хлопчатобумажной ткани удаляется сводная влага, содержащаяся в порах между волокнами внутри самых нитей. После второй критической точки из структуры материала удаляется микрокапиллярная влага до достижения равновесной влажности.

Кривая убыли влагосодержания льняной ткани содержит три критические точки. Появление третьей точки объясняется влиянием коллоидных частиц материала.

Таким образом, полученные результаты позволяют не только исследовать динамику влагосодержания швейных материалов во времени, но и проводить качественный анализ процессов переноса массы в структуре исследуемого материала.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Родичева М.В. Применение потенциала влагопереноса швейных материалов к исследованию параметров теплоотдачи влажных пакетов одежды. - Известия ВУЗов. Технология легкой промышленности. - 2010. - в печати.
- 2 Лыков А.В. Теория сушки - М.- Знамя. - 1968г. - 472с.
- 3 Уваров, А.В. Улучшение условий и охраны труда работников АПК путем разработки и внедрения спецодежды для защиты от переохлаждения и перегрева: дис. ...канд. технич. наук - Орел. - 2000. - 186 с.

### **Абрамов Антон Вячеславович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Охрана труда и окружающей среды"  
Тел. (4862)76-14-39  
e-mail: gal@ostu.ru

### **Родичева Маргарита Всеволодовна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой "Технология и конструирование швейных изделий"  
Тел. (4862)55-10-31  
e-mail: tikshi@ostu.ru

### **Родичева Полина Андреевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
студент группы 41-ЭИ  
Тел. (4862)76-49-71  
e-mail: polka190@yandex.ru

УДК 632.95+34:631.95

Т.В. ГУЩИНА

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬХОЗПРОДУКЦИИ**

*Рассмотрены особенности применения пестицидов в сельскохозяйственном производстве, их негативные свойства и необходимость мероприятий безопасности для человека и окружающей среды.*

*Ключевые слова: пестициды, методы применения, препаративные формы, уровень опасных и вредных факторов, защита, санитарно-эпидемиологическое благополучие*

*Features of application of pesticides in an agricultural production, their negative properties and necessity of actions of safety for the person and an environment are considered.*

*Key words: pesticides, methods of application, a level of dangerous and harmful factors, protection, sanitary-and-epidemiologic well-being*

*«Современный экологический кризис ставит под угрозу возможность устойчивого развития человеческой цивилизации. Дальнейшая деградация природных систем ведет к дестабилизации биосферы, утрате ее целостности и способности поддерживать качества окружающей среды, необходимой для жизни. Преодоление кризиса возможно только на основе формирования нового типа взаимоотношений человека и природы, исключающих возможность разрушения и деградации природной среды»*

*(Экологическая доктрина Российской Федерации).*

Повышение урожайности сельскохозяйственных культур зависит от тенденций развития и совершенствования способов ведения и уровня химизации современного сельхозпроизводства. По мере роста урожайности возрастает значение пестицидов.

Пестициды - это химические или биологические препараты, используемые для борьбы с вредителями и болезнями растений, сорными растениями, вредителями хранящейся сельскохозяйственной продукции, бытовыми вредителями и внешними паразитами животных, а также для регулирования роста растений, предуборочного удаления листьев (дефолианты), предуборочного подсушивания растений (десиканты).

Химический метод занимает ведущее место в защите растений, но имеет положительные и негативные стороны:

- рациональное применение пестицидов обеспечивает предотвращение основной доли потенциальных потерь урожая;

- оказывает загрязняющее действие на окружающую среду;

- высокие дозы пестицидов значительно ускоряют отбор устойчивых популяций;

- вызывают необходимость синтеза все новых препаратов;

- вызывают необходимость применения защитных мероприятий.

На площадях, где применяются пестициды, возрастает объем сохраненного урожая. При урожайности пшеницы 20 ц/га отношение затрат на применение удобрений и пестицидов равно 3:1, то при урожайности 40-60 ц/га оно приближается к 1:1 /1-4/.

Химические органические соединения, применяемые в сельском хозяйстве, обладают не только пылеобразной, но и жидкой, маслянистой и тестообразной консистенции.

Продолжительность обработки растений различными препаратами пестицидов достигает 13,3 % при ежедневной занятости до 2-х часов; 38,0 % - при занятости 2-4 часа; 42,0 % - при занятости 4-6 часов и 6,7 % - при занятости свыше 6 часов. В сельском хозяйстве велика доля ручного немеханизированного труда, например, 47,2 % рабочего времени при приготовлении рабочих растворов затрачивается на немеханизированные работы; 17 % - при транспортировке; 31,7 % - при обработке семенного материала и растений.

При использовании пестицидов необходимо учитывать их свойства и обеспечивать работникам необходимые меры безопасности и гигиену применения. Наиболее важными являются следующие свойства токсичных веществ:

а) токсичность, возможность острого или хронического отравления;

б) токсичность при непрерывном воздействии;

в) стойкость к воздействию факторов природной и производственной среды;

г) опасность отдаленных последствий от воздействия.

По основным гигиеническим критериям в зависимости от токсичности и степени опасности пестициды делятся на группы. Для обеспечения надежной безопасности и охраны здоровья следует принимать во внимание гигиеническую классификацию пестицидов. Например, степень летучести препаратов увеличивается при повышении температуры окружающей среды и влияет на содержание паро- и газообразных пестицидов в воздухе рабочей зоны.

По своему составу пестициды бывают неорганического, растительного, бактериального, грибкового происхождения. Большей физиологической активностью обладают органические пестициды, которые подразделяются на группы в зависимости от содержащихся в них элементов, например, фосфорорганические, хлорорганические, ртутьорганические соединения и другие. Содержание вредных веществ в объектах внешней среды определяется физико-химическими свойствами пестицидов и условиями их применения.

Препаративные формы пестицидов, которые чаще всего применяют в сельском хозяйстве, бывают: концентраты эмульсий, порошки (дусты), гранулы, растворы в воде и органических растворителях. Препаративные формы ядохимикатов содержат стабилизаторы, эмульгаторы, растворители, наполнители и само действующее вещество. Эффективность использования пестицидов зависит от способа их применения, токсичности и формы препарата /1/.

Опрыскивание и опыливание растений, протравливание семян, внесение в почву являются основными способами применения пестицидов. Сильнодействующие пестициды являются источником более 86 % всех отравлений, в том числе острых. Более 80 % применяемых в сельском хозяйстве пестицидов обладают кожно-резорбтивной активностью, при этом до 70 % токсической дозы пестицидов может проникать через кожу.

Поступление вредных веществ в организм человека осуществляется через поверхность кожи, слизистые оболочки органов дыхания и зрения, желудочно-кишечный тракт. Количество токсичных веществ, поступающих в организм человека, зависит от кожно-резорбтивных свойств пестицидов, величины поверхности контакта, концентрации и растворимости в органических веществах.

Интенсивное загрязнение пестицидами воздуха рабочей зоны происходит при уборке и переработке зерна различных культур. Почвенная пыль, собранная с участков, не обработанных ранее пестицидами и агрохимикатами, является малотоксичной. Среднецитотоксическая доза ее составляет 3,2 мг/мл. Цитотоксическое действие пыли обрабатываемых пестицидами и агрохимикатами участков колеблется в пределах  $8 \cdot 10^{-2}$  -  $2 \cdot 10^{-3}$  мг/мл. Эти величины превышают значения цитотоксичности калийных удобрений ( $TD_{50}$  составляет  $1 \cdot 10^{-1}$  -  $3,3 \cdot 10^{-1}$  мг/мл). В пыли черноземных почв по сравнению с другими в более высоких концентрациях обнаруживаются хлорорганические пестициды, что обусловлено повышенной емкостью поглощения, характерной для данного типа почв, и высокой энергией связи ХОП с почвенным поглощающим комплексом. В пыли, собранной при переработке зерна, выращенного в условиях повышенного увлажнения, концентрация ХОП увеличивается в 5 - 50 раз /1-3/.

Использование пестицидов, при несоблюдении агротехнических и технологических требований и несовершенстве технологий и технических средств, приводит к избыточному содержанию их в почве, угнетению жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, уничтожению полезной микрофлоры, загрязнению водоемов и грунтовых вод.

Пестициды применяются в сельскохозяйственном производстве для обработки почвы не только с помощью наземной аппаратуры, но и авиации на огромных площадях. Применяемые вещества находятся во внешней среде до полного распада, загрязняя биосферу. Мелкие частицы пестицидов доставляются воздушными потоками в верхние слои атмосферы, остаются там длительное время и циркулируют вокруг земного шара, выпадая с атмосферными осадками (снегом и дождем).

В условиях химизации сельскохозяйственного производства возрастает актуальность разработки новых технологий и технических средств по применению химических средств

защиты растений, направленных на снижение загрязнения биосферы и решению проблем экологической безопасности.

Определяющей концепцией в области применения пестицидов является нормативный подход, который предусматривает соблюдение требований нормативных документов, регламентирующих применение пестицидов.

В концепции основывается на следующих положениях:

- конкретный вид организмов обладает комплексом физиологических, поведенческих и экологических особенностей, присущих только ему;
- каждый вид вредителя сельхозкультур обладает индивидуальной чувствительностью к применяемым препаратам защиты растений;
- зарегистрированный препарата химической защиты растений используется в соответствии с назначением и обоснованной нормой расхода по каждой культуре и вредителю.

С другой стороны согласно требованиям ГОСТ12.3.002-75, при осуществлении производственных процессов должна быть обеспечена безопасность работника, участвующего в нем. Безопасность производства достигается выполнением следующих мероприятий:

- выбором соответствующих производственных помещений, оборудования, исходных материалов, технологических процессов, приемов, режимов работы и порядка;
- удалением опасных и вредных веществ и материалов из рабочей зоны;
- снижением уровня вредных факторов до величины, установленной действующими санитарными нормами, утвержденными в установленном порядке;
- защитой работающих от действия опасных и вредных производственных факторов, сопутствующих принятой технологии и условиям работы;
- защитой работающих от действия опасных и вредных производственных факторов, возникающих при нарушении технологического процесса.

Для обработки сельскохозяйственных культур следует применять химические средства защиты растений, зарегистрированные в соответствии с Федеральным законом от 19.07.97г. 109-ФЗ и внесенные в «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенный к применению на территории Российской Федерации».

В соответствии с Конституцией Российской Федерации каждый человек имеет право на благоприятную окружающую среду, каждый человек обязан сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам, которые являются основой устойчивого развития, жизни и деятельности народов, проживающих на территории Российской Федерации. Основные положения об охране окружающей среды изложены в Федеральном Законе «Об охране окружающей среды» ФЗ от 10 января 2002 г. № 7.

К природной среде (природе) относится совокупность компонентов природной среды, природных и природно- антропогенных объектов. Все компоненты природной среды должны обеспечивать в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле.

Объектами охраны окружающей среды от загрязнений, истощения, деградации, порчи, уничтожения и иного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности являются:

- земли, недра, почвы;
- поверхностные и подземные воды;
- леса и иная растительность, животные и другие организмы и их генетический фонд;
- атмосферный воздух, озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство.

**Санитарно-эпидемиологическое благополучие населения.** Состояние объектов окружающей среды должно обеспечивать санитарно-эпидемиологического благополучия населения, которое регулируется законодательством Российской Федерации и характеризует состояние здоровья населения, среды обитания человека, отсутствие вредного воздействия факторов среды обитания на человека и обеспечивает благоприятные условия его жизнедеятельности.

Санитарно-эпидемиологическое благополучие населения регулируется Федеральным Законом «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» ФЗ от 30 марта 1999 г. № 52 и санитарными правилами СП 1.1.1058-01 «Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемиологических (профилактических) мероприятий».

Вредное воздействие на человека – это воздействие факторов среды обитания, создающее угрозу жизни или здоровью человека или угрозу жизни или здоровью будущих поколений.

К среде обитания человека относится совокупность объектов, явлений и факторов окружающей природной и искусственной среды, которые определяют условия жизнедеятельности человека.

Среду обитания человека характеризуют следующие факторы:

- биологические (вирусные, бактериальные, паразитарные и др.);
- химические и физические (шум, вибрация, ультразвук, инфразвук; тепловые, ионизирующие, неионизирующие и иные излучения);
- социальные (питание, водоснабжение, условия быта, труда и отдыха);
- оказывающие воздействие на человека и на состояние здоровья будущих поколений.

Критерии безопасности и (или) безвредности для человека водных объектов, включая предельно допустимые концентрации в воде химических и биологических веществ, микроорганизмов, уровень радиационного фона устанавливаются санитарными правилами и регулируются соответствующими нормативами.

Питьевая вода должна быть безопасной в эпидемиологическом и радиационном отношении, безвредной по химическому составу и должна иметь благоприятные органолептические свойства.

Атмосферный воздух в городских и сельских поселениях, на территории промышленных организаций, а также воздух в рабочих зонах производственных и жилых помещений, т.е. в местах постоянного и временного пребывания человека, не должен оказывать вредного воздействия на человека.

Критерии безопасности и (или) безвредности для человека атмосферного воздуха, а также предельно допустимые концентрации (уровни) химических и биологических веществ, микроорганизмов в воздухе и их выбросы устанавливаются санитарными правилами и нормативами.

В почвах любых поселений и сельскохозяйственных угодий содержание потенциально опасных для человека веществ, микроорганизмов и радиационный фон не должно превышать предельно допустимых концентраций (уровней), которые устанавливаются санитарными правилами и соответствующими нормативами.

Отходы производства и потребления подлежат сбору, использованию, транспортировке, хранению и захоронению, условия и способы которых должны быть безопасными для населения и среды обитания и которые должны осуществляться в соответствии с санитарными правилами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации.

Условия труда, рабочее место и трудовой процесс не должны оказывать вредное воздействие на человека. Производственные процессы и технологическое оборудование, организация рабочих мест, коллективные и индивидуальные средства защиты работников, режим труда, отдыха и бытовое обслуживание должны соответствовать санитарным нормам и нормативным правовым актам РФ и не вызывать травмы, профессиональные и инфекционные заболевания, отравления, вследствие условий труда.

За соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий осуществляется производственный контроль в порядке, установленном правилами и государственными стандартами.

В целях предупреждения возникновения и распространения инфекционных и профессиональных заболеваний и отравлений работники отдельных профессий при выполнении своих трудовых обязанностей обязаны проходить медицинские осмотры (при поступлении

на работу и периодически для профилактики). На работников заводится медицинская книжка, без прохождения медосмотра работники не допускаются к работе. Порядок медосмотров определяется федеральным органом исполнительной власти по здравоохранению.

Отдельные виды деятельности (работ, услуг), которые могут представлять потенциальную опасность для человека, подлежат лицензированию в соответствии с законодательством РФ. К подобной деятельности относятся, например, работы с потенциально опасными для человека химическими и биологическими веществами. Подобная деятельность подлежит сертификации в соответствии с законодательством Российской Федерации при наличии санитарно-эпидемиологического заключения.

Государственной регистрации подлежат:

- впервые внедряемые в производство и ранее не использовавшиеся химические, биологические вещества и изготавливаемые на их основе препараты (вещества), потенциально опасные для человека;
- отдельные виды продукции, представляющие потенциальную опасность для человека;
- отдельные виды продукции, включая пищевые продукты, впервые ввозимые на территорию РФ.

Оценка опасности веществ и отдельных видов продукции для человека и среды обитания, установление гигиенических и иных нормативов по содержанию данных веществ и отдельных компонентов в среде обитания, разработка защитных мер осуществляются аккредитованными организациями.

В Российской Федерации организован государственный санитарно-эпидемиологический надзор, который включает в себя контроль выполнения санитарного законодательства и санитарно-эпидемиологической обстановкой; санитарно-карантинный надзор; разработку предложений о проведении профилактических мероприятий; статистическое наблюдение в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения, учета инфекционных и профессиональных заболеваний и отравлений, их связи с воздействием факторов среды обитания; меры пресечения нарушений санитарного законодательства, выдачу предписаний и постановлений о фактах нарушения, привлечение к ответственности лиц, их совершивших.

Пестициды - это химические вещества, предназначенные для уничтожения живого. Особенностью применения пестицидов по сравнению с химическими веществами другого назначения - это их циркуляции в биосфере и присутствие во внешней среде до полного распада. Происходят загрязнения воздушного бассейна, вод открытых водоемов и подземных вод химическими веществами промышленных предприятий /1, 2/.

При эксплуатации объектов сельскохозяйственного назначения должны соблюдаться требования в области охраны окружающей среды, проводиться мероприятия по охране земель, почв, водных объектов, растений, животных и других организмов от негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду. Объекты сельскохозяйственного назначения должны иметь санитарно-защитные зоны и очистные сооружения, исключющие загрязнение почв, поверхностных и подземных вод, водосборных площадей и атмосферного воздуха.

Пестициды обладают биологической активностью, они потенциально опасны для живой природы и здоровья людей. При обработке растений создаются концентрации, способные уничтожить вредителей, но они могут быть опасными и для работающих, однако снижать их нельзя, поскольку не будут уничтожены вредители.

Невозможно предотвратить контакты больших масс населения с пестицидными препаратами в связи с циркуляцией их во внешней среде и наличием остатков в пищевых продуктах.

Нормированием установлены допустимые величины остатков пестицидов в пищевых продуктах. Превышение их делает непригодными продукты к употреблению. Установлены гигиенические нормативы допустимых безопасных уровней загрязнения рабочих помещений

(воздуха рабочей зоны) химическими веществами. Если нормативы не соблюдаются, то временно закрывается рабочее помещение и внедряются санитарно-технические устройства безопасности. Строительство эффективных очистных сооружений, систем замкнутого цикла водопользования, устройств по газоочистке и пылеулавливанию может предотвратить поступление химических веществ в биосферу.

Несмотря на принимаемые меры предосторожности и безопасности применения пестицидов, их остаточные количества обнаруживаются в питьевой воде и продуктах питания.

При создании новых пестицидных препаратов и разработке мероприятий по охране среды и здоровья населения учитываются их особенности и достижения таких наук, как химия пестицидов и химическая защита растений.

Гигиена применения пестицидов - наука о методах, способах и средствах о здоровья населения в связи с использованием химических средств защиты растений, циркуляцией их во внешней среде и накоплением в различных объектах, в том числе живых организмах, включая животных и человека.

В задачу гигиены применения пестицидов входят решение следующих проблем:

- разработка методов и средств профилактики острых и хронических отравлений и других видов заболеваний;

- разработка эффективных мер санитарной охраны внешней среды, особенно таких важных для жизни и здоровья людей компонентов, как воздух, вода, почва, пищевые продукты растительного и животного происхождения.

Гигиенисты при оценке ежегодных списков пестицидов, рекомендуемых для сельского хозяйства и других областей народного хозяйства, регламентов их применения, а также подготовке заключений о новых препаратах обязаны руководствоваться:

- учитывать физико-химические, токсические и другие свойства веществ, назначение их и дозировки, способы, современные качественные и количественные методы обнаружения;

- обеспечивать безопасность человека и окружающей среды;

- разрабатывать и контролировать соблюдение инструкций, санитарных правил и регламентов применения пестицидов, уже применяемых и вновь создаваемых.

В целях государственного регулирования воздействия на окружающую среду, гарантии благоприятной окружающей среды и обеспечение экологической безопасности осуществляется нормирование, которое устанавливает нормативы качества окружающей среды, нормативы воздействия на окружающую среду при осуществлении хозяйственной деятельности, государственные стандарты и иные нормативов в области охраны окружающей среды.

Нормированием установлены гигиенические нормативы допустимых безопасных уровней загрязнения рабочих помещений (воздуха рабочей зоны) химическими веществами и допустимые величины остатков пестицидов в пищевых продуктах.

Посредством аналитического контроля и экологического аудита осуществляются природоохранные мероприятия и документированная оценка хозяйственной и иной деятельности на соответствие нормативам и нормативным документам, в области охраны окружающей среды, требованиям международных стандартов и подготовка рекомендаций по улучшению таковой деятельности.

Экономическое регулирование в области охраны окружающей среды осуществляется путем разработки государственных прогнозов социально-экономического развития; федеральных программ в области экологического развития и охраны окружающей среды; мероприятий и установления платы за загрязнение в целях предотвращения причинения вреда; установления лимитов на размещение отходов, выбросы и сбросы загрязняющих веществ; возмещения причиненного вреда и предоставление налоговых льгот; экономической оценки природных и природно-антропогенных объектов и воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду.

Экологически рациональное обезвреживание неиспользуемых средств защиты растений осуществляется низкотемпературной утилизацией и захоронением в герметичных контейнерах; переработкой методом высокотемпературного сжигания.

## ВЫВОДЫ

1. Законодательством Российской Федерации обеспечивается охрана окружающей среды от загрязнений, истощения, деградации, порчи, уничтожения и иного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности.

2. Санитарно-эпидемиологическое благополучие и состояние здоровья населения, среды обитания человека, наличие вредного воздействия факторов среды обитания на человека и благоприятные условия его жизнедеятельности зависят от состояния объектов окружающей среды.

3. Пестициды обладают биологической активностью. Они потенциально опасны для живой природы и здоровья людей вследствие: применения концентраций опасных для вредителей и работающих; циркуляции в биосфере и присутствие во внешней среде до полного распада; загрязнения воздушного бассейна, вод открытых водоемов и подземных вод химическими веществами промышленных предприятий; наличием остатков препаратов в пищевых продуктах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Справочник по пестицидам (гигиена применения и токсикология) Под редакцией академика АМН СССР Л.И. Медведя. Изд. 2-е испр. и доп. Киев изд-во «Урожай».- 1977.- 376 с.
- 2 Гущина Т.В. Концепция безопасного применения пестицидов: Монография./ Т.В. Гущина. – Орел: изд-во ОрелГАУ, 2008.- 356 с. ISBN 978-5-93382-119-9
- 3 Харина С.Г. Сельскохозяйственная экология. Учебное пособие. – Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2002. – 102 с., С. 80 - 87
- 4 Кольцов А.С. Сельскохозяйственная экология.- Ижевск, 1995. – С. 228-233

**Гущина Татьяна Викторовна**

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры БЖД на производстве  
Тел. (4862) 720333

УДК 681.527.5; 664.1.048.5

К.А. ЕМЕЛЬЯНОВ, Ю.К. СОТНИКОВ, А.С. ТИМАКОВ

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕНОПОДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЫПАРИВАНИИ ЖИДКОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ В ВАКУУМЕ

*Разработано устройство автоматического подавления пены, возникающей при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме, проведены испытания на соке черной смородины, показана эффективность устройства*

*Ключевые слова* – жидкое сельскохозяйственное сырье, выпаривание, вакуум, пеноподавление, автоматизация

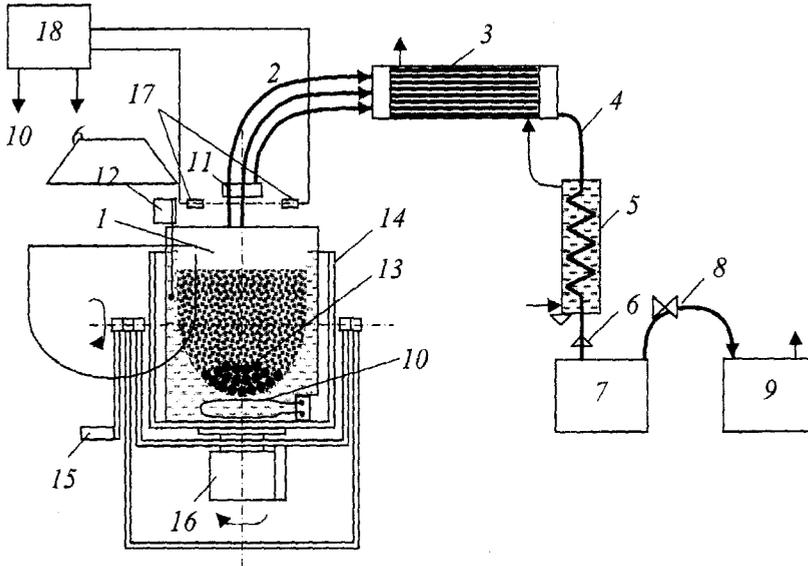
*Automatic depression apparatus of foam that appears at evaporation of watery agricultural raw material in vacuum is developed. The apparatus is tested for blackcurrant juice and its efficiency is shown*

*Key words* – watery agricultural raw material, evaporation, vacuum, foam depression, automation

Выпаривание жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме минимизирует потери биологической ценности при переработке и продлевает сроки хранения получаемых продуктов. Переработка плодово-ягодных соков, выполненная с помощью малогабаритной вакуумной установки [1], показала, что на начальной стадии при переходе к устойчивому режиму кипения образуется пена. Пенообразование замедляет процесс переработки сока вплоть до его полной остановки. Методы подавления пены, основанные на регулировании давления и температуры в испарителе, предложены в [2]. Однако реализация методов осуществлена путем ручного регулирования, включающего визуальный контроль и многократное изменение давления в испарителе отсечкой и подключением вакуумного насоса, что снижает эффективность переработки.

С целью повышения эффективности выпаривания жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме разработано электронное устройство автоматического подавления пенообразования.

Схема установки для удаления влаги в вакууме приведена на рис. 1.



**Рисунок 1.** Схема установки для удаления влаги в вакууме: 1 – испаритель; 2 – паропровод; 3, 5 – конденсаторы; 4 – трубопровод; 6 – вакуумный клапан; 7 – сборник конденсата; 8 – вакуумный вентиль; 9 – насос; 10 – электронагреватель; 11 – брызгоуловитель; 12 – терморегулятор; 13 – рабочие тела; 14 – ячейка с двумя осями вращения; 15 – рукоятка; 16 – привод колебательного движения; 17 – оптопара; 18 – блок управления пеноподавлением

Установка включает испаритель 1 рабочим объемом 40 л, соединенный паропроводом 2 с горизонтальным кожухотрубчатый конденсатором 3. Паропровод содержит шесть параллельно включенных вакуумных шлангов длиной 750 мм с проходным диаметром 20 мм. Горизонтальный конденсатор предназначен для конденсации пара и подсоединен трубопроводом 4 к вертикальному конденсатору 5. В конденсаторах использовано водяное охлаждение. Вертикальный конденсатор осуществляет охлаждение конденсата и соединен через вакуумный клапан 6 со сборником конденсата 7. Сборник подсоединен через вентиль 8 к форвакуумному насосу 9, обеспечивающему разрежение (6 – 10) Па. Испаритель оснащен шестью трубчатыми электронагревателями 10 мощностью 2,2 кВт каждый, брызгоуловителем 11 и терморегулятором 12. При сушке в камеру испарителя, помимо высушиваемого материала, загружают рабочие тела 13 в виде шаров из нержавеющей стали диаметром 25-50 мм. Испаритель помещен в ячейку 14 с двумя осями вращения. С помощью рукоятки 15 изменяется положение оси симметрии ячейки. Привод 16 обеспечивает колебательное вращение ячейки на пол-оборота относительно оси симметрии и осуществляет перемешивание материала при сушке.

В основу автоматического пеноподавления положена фиксация момента достижения пеной критического уровня вблизи крышки испарителя, превышение которого угрожает проникновением пены и выпариваемого сырья в паропровод, а затем и в сборник конденсата. Учитывая, что пенообразование является достаточно плотным и не пропускает свет, в качестве датчика критического уровня использована оптопара 17, установленная внутри испарителя вблизи крышки. Оптопара состоит из расположенных на одной оптической оси фотодатчика и фотоприемника и является входной цепью блока управления пеноподавлением 18. По управляющему сигналу от оптопары блок формирует сигналы управления вакуумным клапаном 6 и электронагревателем 10.

После загрузки сырья включают питание и вакуумный насос, по достижении разрежения 10 Па блок управления включает нагрев испарителя. На этапе прогрева сырья пенообразование отсутствует и световой поток от фотодатчика поступает на фотоприемник, формируя управляющий сигнал, по которому блок управления пеноподавлением обеспечивает открытое положение вакуумного клапана и непрерывную откачку испарителя.

При закипании жидкости образуется пена, которая, поднимаясь, перекрывает световой поток от фотодатчика. В отсутствии света фотоприемник формирует управляющий сигнал, по которому блок управления переводит клапан из открытого положения в положение отсечки и одновременно отключает нагрев. В отсутствии откачки температура и давление в испарителе повышаются за счет теплообмена между рабочей жидкостью в рубашке и перерабатываемым сельхозсырьем. С ростом давления пенообразование сокращается в объеме и пена оседает.

При снижении уровня пены ниже оптической оси оптопары блок управления возвращает вакуумный клапан в открытое положение. С открытием клапана давление в испарителе понижается, усиливая пенообразование. При превышении уровнем пены оптической оси оптопары блок управления вновь переводит клапан в режим отсечки. Регулирование уровня пены в испарителе осуществляется до момента перехода выпариваемой жидкости в режим объемного кипения. При объемном кипении усиливается поступление и конденсация пара в горизонтальном конденсаторе, охлаждение конденсата в вертикальном конденсаторе и его поступление в сборник. По достижении установившегося режима выпаривания блок управления выдает сигнал на включение нагрева. Задержка включения обеспечивается таймером, входящим в состав блока управления, и может быть отрегулирована оптимальным образом согласно типу перерабатываемого сырья. После выхода в установившийся режим выпаривания температуру в испарителе поддерживают на заданном уровне регулятором температуры.

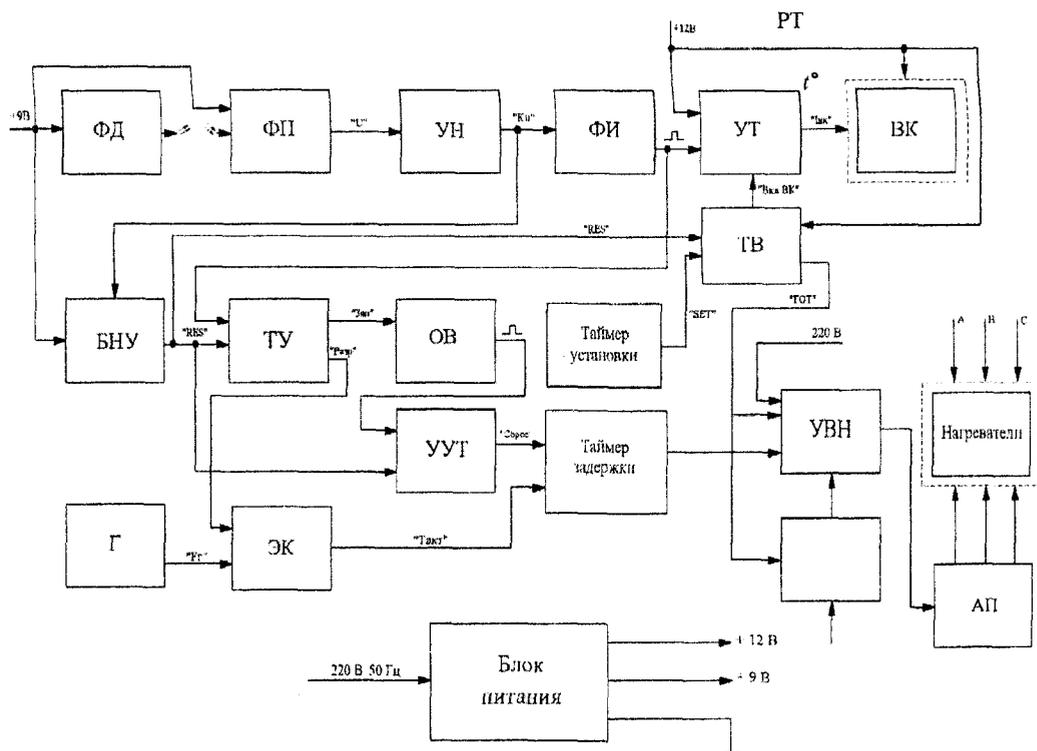
Структурная схема блока управления пеноподавлением приведена на рис. 2.

При включении питания блок начальной установки БНУ формирует сигнал, устанавливающий в нулевое состояние триггеры включения ТВ и управления ТУ и таймер задержки через устройство управления таймером УУТ. Прямой выход триггера ТВ воздействует на

узел включения нагрузки УВН, обратный выход – на усилитель тока УТ. Усилитель УТ по сигналу с обратного выхода ТВ переводит вакуумный клапан ВК в открытое положение. При открытом клапане вакуумный насос откачивает испаритель. Сигнал с прямого выхода ТВ блокирует нагреватели через УВН а автоматический переключатель АП и регулятор температуры РТ. Блокировка осуществляется на время 60-90 минут, за которое в вакуумной системе создается разрежение 10 Па. По достижении разрежения 10 Па таймер установки переводит ТВ в единичное состояние и управление усилителем УТ осуществляется формирователем импульсов ФИ. Управляющий сигнал прямого выхода ТВ разрешает работу УВН и регулятора температуры РТ. Узел включения нагрузки через автоматический переключатель АП подключает нагреватели к силовой цепи. Регулятор РТ обеспечивает поддержание температуры рабочей жидкости в рубашке испарителя в диапазоне 60-80 °С в зависимости от стадии процесса выпаривания.

В отсутствии пенообразования световой сигнал фотодатчика ФД преобразуется фотоприемником ФП в электрический сигнал, который после усиления усилителем напряжения УН, в свою очередь, преобразуется формирователем ФИ в импульсы напряжения прямоугольной формы, при этом сигнал высокого уровня (логическая единица) на выходе ФИ соответствует отсутствию пенообразования в испарителе. Сигнал формирователя обеспечивает открытое положение клапана ВК и одновременно переводит триггер установки ТУ в единичное состояние. Передний фронт сигнала с прямого выхода триггера ТУ запускает одновибратор ОВ, импульс которого через устройство установки таймера УУТ переводит таймер задержки в нулевое состояние. По окончании действия импульса ОВ сигнал с обратного выхода триггера ТУ через электронный ключ ЭК разрешает подачу тактовых импульсов от генератора Г на таймер задержки. По истечении времени, обеспечивающего подавление пенообразования, таймер задержки разрешает работу устройства включения нагревателей.

При превышении уровнем пены оптической оси оптопары световой поток от фотодатчика не достигает фотоприемника и сигнал с выхода УН через БНУ переводит триггер ТУ в нулевое состояние, блокируя работу УВН и нагрев сырья. Одновременно сигнал низкого



уровня с выхода ФИ блокирует работу усилителя УТ и вакуумный клапан отсекает испаритель от насоса. Повторное включение нагрева происходит в автоматическом режиме после снижения уровня пены ниже оптической оси оптопары.

Испытания устройства автоматического пеноподавления проведены при выпаривании сока черной смородины. Внутри испарителя с противоположных сторон вблизи крышки на одной оптической оси смонтирована оптопара. В отсутствие пены световой поток от фотодатчика падает на фотоприемник, обеспечивая на входе блока управления пеноподавлением сигнал высокого уровня. В выходные цепи блока управления включены электромагнитный привод вакуумного клапана КМУ25 и электронагреватель. Клапан установлен между вертикальным конденсатором и сборником конденсата и в открытом состоянии обеспечивает подсоединение испарителя к насосу. После включения вакуумного насоса и подачи питания блок управления пеноподавлением перевел клапан в открытое положение. В процессе откачки давление в вакуумной системе медленно уменьшалось. Через 70 минут откачки при давлении  $\approx 10$  Па таймер установки включил нагрев мощностью 13,2 кВт. По истечении 45 мин нагрева на поверхности сока появилась пена. Пенообразование, медленно поднимаясь, перекрыло световой поток от фотодатчика. В отсутствие светового потока на фотоприемнике триггер ТУ заблокировал нагрев, а формирователь ФИ – работу усилителя УТ, обеспечив отсечение испарителя от насоса вакуумным клапаном.

Через две минуты после отсечки испарителя пена начала оседать и световой поток от фотодатчика достиг фотоприемника. По световому сигналу блок управления перевел клапан в открытое положение. Подключение испарителя к вакуумному насосу сопровождалось резким подъемом пены, перекрывшей световой сигнал. В отсутствие светового потока на фотоприемнике блок управления вновь перевел клапан в положение отсечки. В течение следующих четырех минут произошло двукратное регулирование уровня пены в автоматическом режиме путем отсечки и подключения испарителя к насосу. По завершении регулировки выпаривание вышло в установившийся режим, когда в сборник начал интенсивно поступать конденсат. Через семь минут после первого подъема пены таймер задержки осуществил включение электронагревателей, обеспечив управление процессом выпаривания через регулятор температуры.

Устройство автоматического пеноподавления повысило эффективность процесса выпаривания за счет освобождения оператора от выполнения операций визуального контроля и ручного регулирования давления в испарителе.

Таким образом, разработано устройство автоматического пеноподавления при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме. Проведены испытания устройства при выпаривании сока черной смородины и показана его эффективность.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Патент RU № 2276314. Устройство для удаления влаги в вакууме / А.А. Емельянов, К.А. Емельянов, Я.А. Морозов. Оpubл. 10.05.2006, бюл. № 13.
- 2 Емельянов А.А., Емельянов К.А. Подавление пены при выпаривании жидкого сельскохозяйственного сырья в вакууме // Пиво и напитки, 2009, № 1, С. 38-39.

**Емельянов Константин Александрович**

Орловский государственный технический университет

Аспирант кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»

г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел.: (4862)541503

**Сотников Юрий Кузьмич**

Орловский государственный технический университет

Заведующий лабораторией кафедры «Электротехнические дисциплины» факультета СПО

Тимаков Андрей Сергеевич  
Орловский государственный технический университет  
Студент факультета СПО

УДК 536.2:532/533; 532.72; 66.021.3

РОДИЧЕВА М.В., АБРАМОВ А.В., РОДИЧЕВА П.А.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЖИ

*Одним из показателей теплового состояния человека, является средневзвешенная температура кожи (СВТК). В статье предложено аппаратное решение для контактного измерения СВТК, а также приведены результаты исследования тепловых состояний человека в вентилируемой специальной одежде и спецодежде «закрытого» типа. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 09-08-97557 на проект "Моделирование процессов тепло- и массообмена в биотехнической системе "Человек-одежда-окружающая среда".*

**Ключевые слова:** *Средневзвешенная температура кожи; тепловые состояния человека; вентилируемая специальная одежда; первичные преобразователи температуры; субъективные теплоощущения.*

*One index of the thermal state of man is the weighted average temperature of the skin. The article suggested that the hardware solution for contact measurement index of the thermal state of man, and the results of investigations of the thermal states of men in a ventilated special clothes and overalls "closed" type special clothes. Work is executed within the limits of the Russian Federal Property Fund grant № 09-08-97557 on the project "Modeling of processes heat - and substance exchange in biotechnical system" Person-clothes-environment".*

**Key words:** *The weighted average temperature of the skin; thermal states of men; ventilated special clothes; primary converters of temperature; thermal sensations.*

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из показателей теплового состояния человека является средневзвешенная температура кожи (СВТК), которая рассчитывается по результатам точечных замеров температуры по поверхности тела (1) [2]:

$$t_{\text{СВК}} = 0,0886 t_{\text{Лба}} + 0,34 t_{\text{Тул}} + 0,134 t_{\text{Плч}} + 0,045 t_{\text{Кис}} + 0,23 t_{\text{Бед}} + 0,125 t_{\text{Гол}} + 0,0644 t_{\text{Ст}};$$

где:  $t_{\text{Лба}}$  - температура лба, °С;  $t_{\text{Тул}}$  - температура туловища, °С;  $t_{\text{Плч}}$  - температура плеча, °С;  $t_{\text{Кис}}$  - температура кисти, °С;  $t_{\text{Бед}}$  - температура бедра, °С;  $t_{\text{Гол}}$  - температура голени, °С;  $t_{\text{Ст}}$  - температура стопы, °С (рисунок 1).

Для измерения температуры используются бесконтактный и контактный методы. В первом случае, используются инфракрасные пирометры, которые позволяют проводить измерения на расстоянии. Однако, при этом, измеряется температура поверхности пакета, при заранее известной степени черноты. Верхний слой одежды может нагреваться от солнца, а нижележащие охлаждаться за счет пота, что приводит к существенным погрешностям измерения. Для определения величины СВТК, в пакете одежды вырезаются отверстия типа «форточка» над соответствующими точками. Введение таких отверстий влияет на температуру кожи в измеряемой точке и снижает точность получаемых результатов.

Контактный метод предполагает размещение на теле испытуемого первичных преобразователей. Температура, измеренная таким методом, может отличаться от температуры измеряемой поверхности. Однако, при исследованиях величины СВТК, контактный метод является предпочтительным.

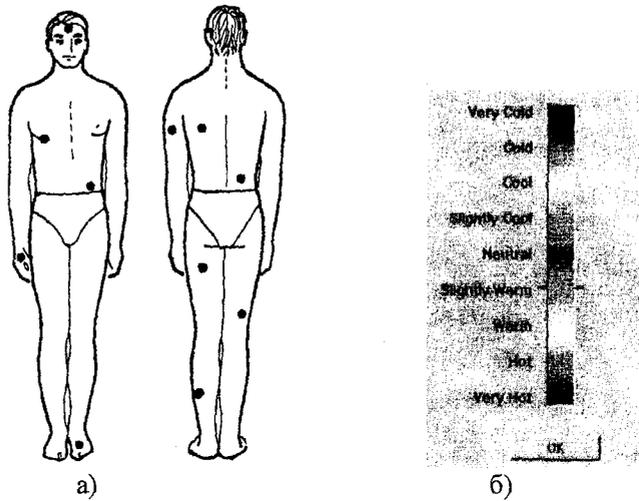


Рисунок 1. Методы исследования тепловых состояний  
 а - одиннадцатая точечная схема измерения СВТК; б - шкала субъективных теплоощущений

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

На теле испытуемого располагаются первичные преобразователи температуры DS18B20 (рисунок 2 а), которые подключаются к ПЭВМ через коммутирующее устройство (рисунок 2 б). Для автоматизированного сбора данных используется специализированная программа (рисунок 2 в). Замеры снимаются для 3-х состояний с различным уровнем энергозатрат: «покой», «ходьба», «бег» [1]. Параллельно испытуемый фиксирует субъективные теплоощущения по 6 бальной шкале (рисунок 1 б) [3].

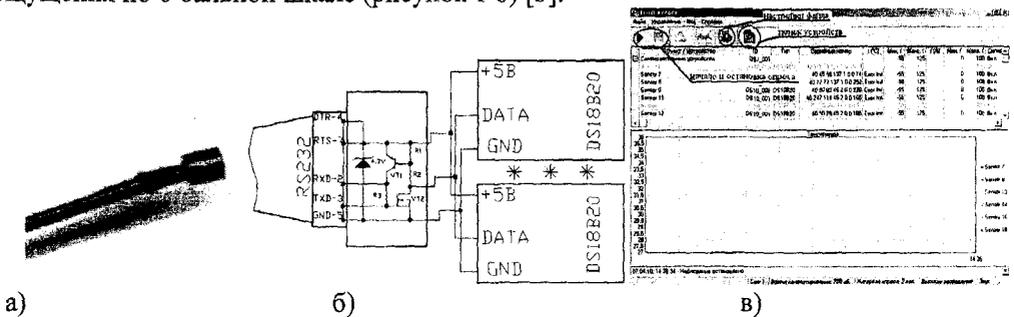
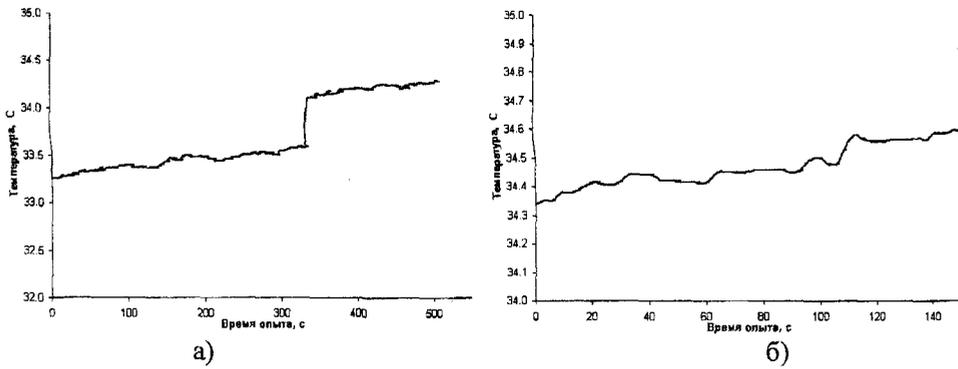


Рисунок 2. Первичный преобразователь температуры DS18B20  
 а - внешний вид первичного преобразователя DS18B20; б - схема коммутирующего устройства; в - интерфейс программы для сбора данных

Оценим с помощью предложенной методики СВТК испытуемого в костюме химзащиты Л1 и вентилируемом костюме. Костюм Л1 является спецодеждой «закрытого» типа, в то время как вентилируемый костюм позволяет осуществлять регулируемый забор воздуха под одежду за счет вентиляционных элементов.

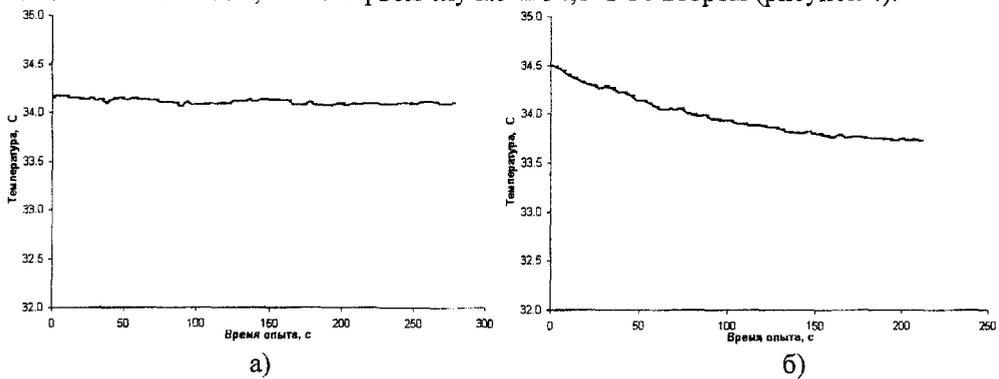
**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования проводились в следующих климатических условиях:  $t_{возд}=22,5^{\circ}\text{C}$ ;  $\phi=42\%$ ,  $v_{движ-воздуха}=0,03$  м/с. Значения СВТК, рассчитанные по локальным значениям температуры в состоянии «покой» приведены на рисунке 3. В обоих случаях испытуемый оценивал свои теплоощущения на уровне «комфортно». Средние значения СВТК: в костюме Л1 соответствуют температур  $33,7^{\circ}\text{C}$ ; в костюме с вентиляцией пододежного пространства - температуре  $34,5^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 3. Динамика СВТК в состоянии покоя**  
 а - костюм Л1; б - вентилируемый костюм

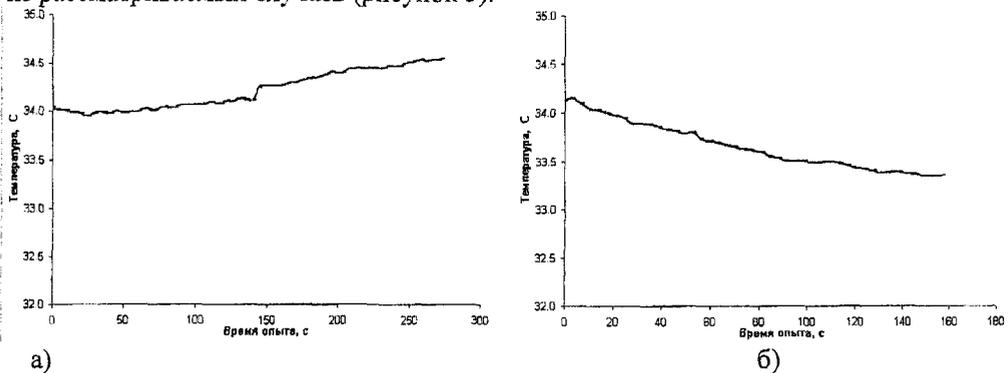
При переходе в состояние «ходьба», субъективные теплоощущения испытуемого соответствовали уровню «слегка тепло» в вентилируемом костюме и «тепло» в костюме Л1. Средние значения СВТК: 34,0°С в первом случае и 34,1°С во втором (рисунок 4).



**Рисунок 4. Динамика СВТК при ходьбе**  
 а - костюм Л1, б - вентилируемый костюм

Как видно, вследствие совершаемых движений, СВТК в обоих случаях повышается. В вентилируемом костюме на 0,2°С за 220 сек, в костюме Л1 - на 0,8°С. Подобные различия объясняются тем, что в вентилируемом костюме наблюдается дополнительный приток более холодного воздуха из окружающей среды под одежду, что приводит к охлаждению тела человека. В костюме химзащиты воздух постоянно нагревается от тела, приток более холодного воздуха отсутствует, что приводит к интенсивному росту СВТК.

При переходе испытуемого с ходьбы на бег, СВТК показывает различную динамику в каждом из рассматриваемых случаев (рисунок 5).



**Рисунок 5. Динамика СВТК при беге**  
 а - костюм Л1; б - вентилируемый костюм

Средние значения СВТК составляли: в костюме Л1 на уровне 34,2°C; в вентилируемом костюме на уровне 33,7°C. То есть, СВТК в костюме химзащиты повышается на 0,1°C и снижалась на 0,3°C в вентилируемом костюме. Субъективные теплоощущения испытуемого: «слегка жарко» в вентилируемом костюме и «жарко» в костюме Л1. В обоих случаях испытуемый отмечал начало потоотделения. Значение СВТК в костюме Л1 продолжает расти, не смотря на дополнительное охлаждение тела за счет пота. В вентилируемом костюме интенсифицируется воздухообмен пододежного пространства с окружающей средой, за счет чего увеличивается теплоотдача с поверхности тела.

Согласно данным объективных исследований, теплоощущению «комфортно» соответствует диапазон значений СВТК 32÷34°C, в то время, как при СВТК большем 34°C, наблюдается начало потоотделения [1]. Согласно результатам наших исследований, состоянию теплового комфорта соответствовали значения СВТК в диапазоне 33÷34 °C. Начало потоотделения наблюдалось при СВТК 34,2°C. Следовательно, полученные данные подтверждают результаты проводимых ранее исследований.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Кошечев В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода, М: Медицина. - 1981. - 188с.
- 2 Методы контроля. Физические факторы. Физиолого-гигиеническая оценка одежды для защиты работающих от холода (методика) М. - 2004. - 18 с.
- 3 McGuffin Rom Human thermal comfort model and manikin. Society of Automotive Engineers.- 01 - 2002. -17p.

**Родичева Маргарита Всеволодовна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой "Технология и конструирование швейных изделий"  
Тел. (4862)55-10-31  
e-mail: tikshi@ostu.ru

**Абрамов Антон Вячеславович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Охрана труда и окружающей среды"  
Тел. (4862)76-14-39  
e-mail: ral@ostu.ru

**Родичева Полина Андреевна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
студент группы 41-ЭИ  
Тел. (4862)76-49-71  
e-mail: polka190@yandex.ru

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

## И BIOTEХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 535.8 (088.8)

Ю. Б. ИВАНОВ, Д. П. САННИКОВ

### **ПРИБОР ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ИСТОЧНИКА СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Для повышения точности фотоэлектрических приборов, применяемых для контроля состава веществ методом просвечивания на разной длине световой волны, предлагается измерять мощность излучения вторым фотодатчиком и его выходным напряжением компенсировать нестабильность светового потока*

**Ключевые слова:** фотодатчик, светочастотный преобразователь, интегратор фототока

*For increase of accuracy of the photo-electric devices applied to the control of structure of substances by a method of a luminescence on different length of a light wave, it is offered to measure capacity of a luminescence by the second photogauge and its output pressure to compensate instability of a light stream*

**Keywords:** the photogauge, the lightfrequency converter, the integrator of a photocurrent

Фотоэлектрические приборы, в том числе газовые или жидкостные хроматографы и масс-спектрометры, широко применяют для экологического мониторинга и экспрессного анализа качественного и количественного состава различных веществ. Принцип действия таких приборов основан на формировании светового излучения с разной длиной волны, задаваемой дифракционной решеткой, которым просвечивается прозрачная кювета с контролируемым веществом, и измерении мощности излучения, прошедшего через кювету. После этого выполняется вычисление коэффициентов оптического пропускания светового потока на разной длине волны, по которым можно судить о составе контролируемого вещества и его соответствии допустимым нормированным значениям для данного вида продукции [1].

Одним из факторов, ограничивающих точность спектрального анализа веществ, является временная или температурная нестабильность светового потока, формируемого источником излучения. Для повышения стабильности источников света в приборах фотоэлектрического контроля используют стабилизаторы питающего напряжения, однако их применение не позволяет устранить мультипликативную погрешность, обусловленную изменением коэффициента преобразования электрической мощности излучателя в мощность светового потока. Кроме того, наличие случайных внешних факторов (запыление поверхности излучателя, изменение яркости света в зависимости от температуры окружающей среды и т. п.) также приводит к повышению погрешности фотоэлектрических приборов и, соответственно, к уменьшению достоверности результатов экологического мониторинга или допускового контроля.

Применяемые в масс-спектрометрах и других приборах широкодиапазонные излучатели светового потока имеют, как правило, большую рассеиваемую мощность – несколько десятков ватт, причем для их принудительного охлаждения нельзя применять вентиляторы, так как они приводят к быстрому накоплению пыли на поверхности излучателей. Поэтому собственный нагрев световых излучателей в номинальном рабочем режиме превышает температуру  $T_{\max} \approx (100 \dots 200)^\circ\text{C}$ , что не позволяет устанавливать вблизи мощных источников света полупроводниковые датчики для контроля мощности оптического излучения.

Вследствие этого для повышения качества приборов фотоэлектрического контроля, основанных на просвечивании веществ излучением с изменением длины световой волны, необходимо принимать меры для компенсации нестабильности потока оптического излучения.

Применение структурного и конструктивного методов коррекции погрешностей позволяет реализовать решение этой технической задачи, но при выполнении следующих условий.

Во-первых, для контроля мощности излучения нужно использовать дополнительный фотодатчик, установленный на большом расстоянии от источника света. Для исключения нагрева фотодатчика нужно его отделить в корпусе прибора от излучателя теплозащитной прослойкой и подводить к нему контролируемый световой поток через стеклянный световод.

Во-вторых, для ослабления влияния нестабильности оптического излучения на результаты контроля нужно использовать выходное напряжение фотодатчика в качестве сигнала обратной связи в схеме преобразователя оптической мощности в электрический сигнал.

В-третьих, для ослабления влияния пульсаций мгновенной мощности излучателя целесообразно выполнять преобразование измеряемого фототока в частоту импульсов, так как при цифровом измерении частоты обеспечивается высокая помехоустойчивость и точность.

С учетом этих условий разработана универсальная схема прибора фотоэлектрического контроля, в оптической части которого применены широкополосный источник светового излучения, фотоэлектронный умножитель и фотодатчик для контроля мощности излучения. Выходное напряжение фотодатчика  $U_0$  используется в качестве сигнала обратной связи в схеме преобразователя анодного фототока  $I_{\Phi А}$  ФЭУ в частоту импульсов (рисунок 1).

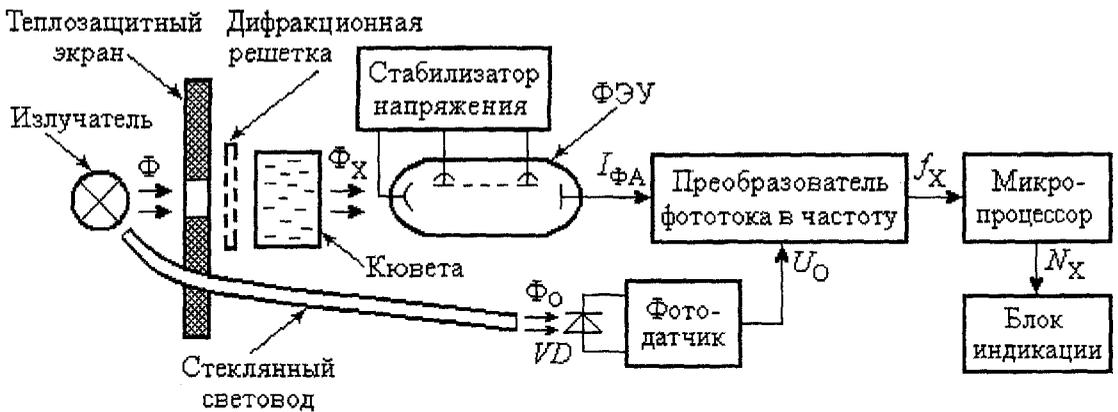


Рисунок 1 – Структурная схема прибора фотоэлектрического контроля с компенсацией нестабильности оптического излучения

Принцип действия данного устройства с микропроцессорной обработкой результатов измерений заключается в следующем. Исследуемое вещество помещается в кювету, на которую подается поток  $\Phi$  оптического излучения от широкополосного источника света. При этом с помощью регулируемой дифракционной решетки задается необходимая длина световой волны  $\lambda$ , на которой определяется коэффициент оптического пропускания контролируемого вещества. В процессе измерения на фотоэлектронный умножитель поступает ослабленное оптическое излучение  $\Phi_x$ , пропорционально которому появляется фототок  $I_{\Phi А}$  на аноде ФЭУ. Этот анодный фототок преобразуется в частоту  $f_x$ , измеряемую микропроцессором, выходной код  $N_x$  которого выводится на цифровой индикатор.

Для формирования опорного напряжения  $U_0$ , выполняющего функцию меры в преобразователе фототока в частоту, используется часть светового потока  $\Phi_0$  излучателя, которая через стеклянный световод подается на фотодатчик. Медленные изменения светового потока  $\Phi_0 \pm \Delta\Phi_0$  на выходе излучателя приводят к аналогичному изменению фототока  $I_{\Phi А} \pm \Delta I_{\Phi А}$  на аноде ФЭУ и опорного напряжения  $U_0 \pm \Delta U_0$  на выходе фотодатчика, поэтому их отношение остается практически постоянным (при линейных коэффициентах преобразования фотоэлектронного умножителя и фотодиодного датчика).

Обычно масс-спектрометрический или фотоэлектрический анализ состава различных контролируемых газов или жидкостей выполняют методом сравнения. При этом сначала оп-

ределяют коэффициенты пропускания оптического излучения через кювету с известным (образцовым) веществом при его облучении световым потоком с разной длиной волны, а затем аналогичные операции выполняют с исследуемым веществом. После сопоставления полученных значений амплитуд сигналов в спектре излучения делают вывод о соответствии контролируемого вещества заданным требованиям или допустимым значениям [1].

Применение в схеме прибора дополнительного фотодатчика для получения опорного напряжения  $U_0$ , пропорционального мощности светового потока  $\Phi$  излучателя, позволяет упростить и сократить процесс масс-спектрометрического анализа за счет применения предлагаемого способа контроля, который заключается в следующем.

Перед проведением цикла контроля исследуемого вещества нужно выполнить фотоэлектрический анализ состава образцового вещества, а полученные результаты (коэффициенты оптического поглощения на соответствующих им длинах световых волн) записать в блок памяти микропроцессора, чтобы затем использовать эти данные в качестве образцовых величин для сравнения с результатами анализа контролируемых веществ. В частном случае, запоминание образцовых значений в микропроцессоре можно реализовать непосредственно при изготовлении аппаратуры контроля, используя для этой цели цифровые данные, полученные в результате ранее проведенных исследований образцовых жидкостей или газов.

Наличие такого банка данных в памяти микропроцессора позволяет вдвое сократить длительность цикла масс-спектрометрического анализа, так как при этом не нужно измерять состав образцовых веществ, а определять только коэффициенты оптического поглощения контролируемого вещества и микропроцессором сравнивать их с образцовыми данными.

Для пояснения этого способа можно рассмотреть процесс преобразования светового потока  $\Phi_X$  в частоту  $f_X$  в двухканальной схеме устройства (рисунок 2). Результат преобразования определяется отношением фототока  $I_{\Phi A}$  на аноде ФЭУ к выходному напряжению  $U_0$  фотодатчика, т. е. отношением измеряемого потока излучения  $\Phi_X$  к основному потоку  $\Phi_0$ .

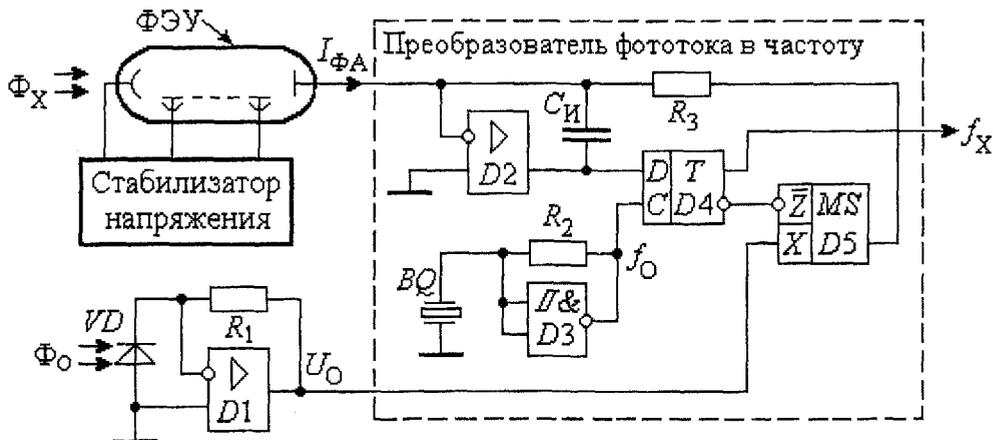


Рисунок 2 – Схема преобразователя фототока в частоту импульсов с компенсацией нестабильности потока светового излучения

Учитывая коэффициент умножения фототока  $K_I$  ФЭУ и чувствительность  $S_\Phi$  фотодиода  $VD$ , можно представить уравнение преобразования устройства в следующем виде:

$$f_X = I_{\Phi A} R_3 f_0 / U_0 = \Phi_X K_I^N R_3 f_0 / \Phi_0 S_\Phi R_1 = K_{\text{ПР}} K_I^N R_3 f_0 / K_{\text{СВ}} S_\Phi R_1,$$

где  $\Phi_X = K_{\text{ПР}} \Phi$  – поток излучения на входе ФЭУ, зависящий от коэффициента пропускания  $K_{\text{ПР}}$  контролируемого вещества;

$I_{\Phi A} = \Phi_X K_I$  – значение измеряемого фототока на аноде ФЭУ;

$\Phi_0 = K_{CB}\Phi$  – поток излучения на входе фотодатчика, зависящий от коэффициента пропускания  $K_{CB}$  стеклянного световода;

$U_0 = I_{\Phi}R_1 = S_{\Phi}\Phi_0R_1 = S_{\Phi}K_{CB}\Phi R_1$  – опорное напряжение на выходе фотодатчика, зависящее от чувствительности  $S_{\Phi}$  фотодиода, сопротивления  $R_1$  в цепи отрицательной обратной связи усилителя  $D1$  и коэффициента пропускания  $K_{CB}$  стеклянного световода.

$f_0$  – стабильная (образцовая) частота выходных импульсов кварцевого генератора, собранного на логическом элементе  $D3$  с кварцевым резонатором  $BQ$ .

При работе данного устройства в каждом такте преобразования после интегрирования анодного фототока  $I_{\Phi A}$  разряд емкости  $C_{\Pi}$  интегратора на усилителе  $D2$  выполняется выходным напряжением  $U_0$  фотодатчика на усилителе  $D1$  (рисунок 2). При этом выходная частота  $f_X$  устройства не зависит от оптического потока  $\Phi$  излучателя, а определяется только коэффициентом пропускания  $K_{\Pi P}$  контролируемого вещества и стабильностью коэффициента умножения  $K_I$  ФЭУ, чувствительности  $S_{\Phi}$  фотодиода  $VD$  и резисторов  $R_1$  и  $R_3$ .

Особенность работы устройства фотозлектрического контроля (рисунок 1) заключается в том, что на оптический вход фотодиода  $VD$  через световод поступает мощный поток  $\Phi_0$  от источника излучения. Это позволяет получить большое опорное напряжение  $U_0 \geq 2$  В на выходе фотодатчика при использовании сравнительно небольшого резистора  $R_1 \leq 100$  кОм в цепи отрицательной обратной связи усилителя  $D1$ . Практически уменьшение этого резистора позволяет снизить напряжение теплового шума фотодиода  $VD$  благодаря применению небольшой эквивалентной нагрузки фотодиода  $R_{Н.Э} = R_1/K_{U1}$ , которая обратно пропорциональна коэффициенту усиления  $K_{U1} \geq 10^5$  усилителя  $D1$  и не превышает десятков Ом [2].

Поэтому шум опорного напряжения зависит, в основном, от спектральной плотности шума усилителя  $D1$ , составляющей для современных микросхем  $S_{\Pi} \leq 10$  нВ/Гц<sup>0,5</sup> [3], с учетом которого шум опорного напряжения  $U_0$  составляет

$$U_{\Pi.0} = \sqrt{S_{\Pi}^2 \Delta f} = \sqrt{10^2 \cdot 10^{-18} \cdot 10^4} \approx 1 \text{ мкВ.}$$

Следовательно, влияние шума на опорное напряжение  $U_0 \geq 2$  В не превышает относительного значения  $\gamma_{\Pi} \leq 0,5 \cdot 10^{-4} \%$ , т. е. пренебрежимо мало.

Такое относительно малое значение шумового напряжения дает возможность расширить динамический диапазон работы ФЭУ, т. е. применять такой преобразователь фототока в частоту для контроля веществ с различными коэффициентами оптического поглощения без изменения или переключения пределов измерения.

В цифровых приборах фотозлектрического экспресс-контроля состава газообразных и жидких веществ целесообразно реализовать автоматическую коррекцию аддитивной погрешности преобразования, которая обусловлена влиянием темновых токов ФЭУ и фотодиода.

Нижняя граница пороговой чувствительности ФЭУ зависит от одноэлектронных импульсов темнового тока  $I_{\Phi J}$ , интенсивность которых определяется распределением Пуассона. Поэтому общий анодный ток  $I_{\Phi A}$  ФЭУ кроме токовой составляющей  $I_{\Phi X}$ , пропорциональной световому потоку  $\Phi_X$ , содержит ток фоновой засветки  $I_{\Phi T}$  и импульсы тока  $I_{\Phi J}$ :

$$I_{\Phi A} = I_{\Phi X} + I_{\Phi T} + I_{\Phi J}.$$

Выходной ток фотодиода  $VD$   $I_{\Phi} = I_{\Phi 0} + I_T$  содержит две составляющих, первая из которых  $I_{\Phi 0}$  зависит от потока оптического излучения  $\Phi_0$ . Вторая составляющая определяется темновым током  $I_T = I_{OBR} + I_{YT}$ , зависящим от обратного тока  $I_{OBR}$  фотодиода  $VD$  и тока поверхностной утечки  $I_{YT}$ , которые возрастают при увеличении обратного напряжения.

Для уменьшения темнового тока фотодиода нужно уменьшать обратное напряжение до нулевого уровня, т. е. обеспечивать его работу в фотовольтаическом режиме на эквивалентную короткозамкнутую нагрузку. При работе в таком режиме уменьшается не только обратный ток, но и ток утечки, что позволяет понизить темновой ток кремниевого фотодиода до уровня  $I_T \leq 1$  нА. При этом пороговая чувствительность фотодатчика практически ограничивается только шумовым напряжением  $U_{ш.о} \approx 1$  мкВ операционного усилителя  $D1$ , применяемого во втором канале преобразования для контроля потока излучения  $\Phi_0$  (рисунок 2).

При работе в производственных условиях нижняя граница динамического диапазона фотодатчиков практически ограничивается влиянием внешней фоновой засветки, для компенсации которой можно использовать автоматическую коррекцию аддитивной погрешности.

Обычно для коррекции аддитивной погрешности в цифровых вольтметрах вход прибора подключают к нулевой цепи. После этого кодируют напряжение начального смещения и запоминают начальный код, который вычитают из результатов последующих измерений. Для выполнения аналогичных операций в приборах фотоэлектрического контроля необходимо механическим способом затемнять светочувствительную поверхность фотодиода или катода ФЭУ, затем кодировать напряжение, пропорциональное темновому току, и вычитать полученное значение "темнового кода" из результатов измерений светового потока.

Такие сравнительно простые операции можно реализовать программным способом в микропроцессорном блоке обработки данных при минимальной временной задержке, не превышающей единиц микросекунд. Поэтому быстрдействие приборов фотоэлектрического контроля с автоматической коррекцией аддитивной погрешности практически определяется только длительностью цикла измерения исследуемого излучения.

Применение структурного способа (двухканальной структуры приемника излучения с компенсацией нестабильности источника света) в сочетании с конструктивным способом (установкой теплозащитного экрана между источником и приемником излучения, а также стеклянного световода перед фотодиодом для уменьшения нагрева) позволяет значительно повысить точность измерения оптического излучения. Реализация двух этих способов и применение автоматической коррекции аддитивной погрешности в приборах фотоэлектрического контроля дает возможность расширить универсальность их применения для исследования состава самых различных газообразных и жидких веществ.

Введение дополнительного такта преобразования для цифрового измерения начального уровня фоновой засветки ФЭУ или темнового тока фотодиодного приемника излучения с последующим использованием полученных данных для компенсации аддитивной погрешности позволяет повысить достоверность контроля слабых световых потоков с разной длиной волны. При этом одновременно можно увеличить чувствительность устройства за счет автоматического переключения напряжения питания фотоэлектронного умножителя в зависимости от его анодного тока: при малом значении фототока увеличивать напряжение питания ФЭУ, а при большом фототоке, наоборот, понижать напряжение питания. Например, при четырехкратном увеличении напряжения питания в диапазоне от 400 до 1600 В чувствительность ФЭУ и коэффициент усиления фототока повышаются на четыре порядка [2], что позволяет расширить диапазон контроля потоков излучения до пяти-шести десятичных порядков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Левшин Л. В., Салецкий А. М. Оптические методы исследования молекулярных систем. – М.: МГУ, 1994. – 257 с.
- 2 Жеребцов И. П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1995. – 352 с.
- 3 Интегральные схемы: Операционные усилители. – М.: Физматлит, 1993. – 240 с.

**Иванов Юрий Борисович**  
Академия ФСО России, г. Орел  
Кандидат технических наук, преподаватель

Тел. (4862) 42-61-61  
E-mail: [zhmur@yahoo.com](mailto:zhmur@yahoo.com)

**Санников Дмитрий Петрович**  
Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Старший преподаватель кафедры "Информационные системы"  
Тел. (4862) 42-22-31  
E-mail: [sdp@rekom.ru](mailto:sdp@rekom.ru)

УДК 621.3.08

В.Г. ЛИСИЧКИН

## ПОВЫШЕНИЕ ФАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИБОРОВ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

*Для повышения чувствительности цифровых приборов вихретокового контроля, применяемых для измерения различных параметров окружающей среды, предлагается включать индуктивные преобразователи в колебательные контуры и выполнять следующую подстройку частоты возбуждающего сигнала до момента изменения знака разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами вихретоковых преобразователей и измерять резонансную частоту.*

*Ключевые слова:* фазовая чувствительность, вихретоковый контроль, резонансная частота.

*For increase of sensitivity of the vortical current control digital devices, various parametres of environment applied to measurement, it is offered to include inductive converters in oscillatory contours and to carry out watching frequency trim of an exciting signal till the moment of change of a sign on a difference of phases between raising and target signals vortical current converters and to measure resonant frequency.*

*Key words:* phase sensitivity, vortical current control, resonant frequency.

### ВВЕДЕНИЕ.

При осуществлении неразрушающего контроля параметров различных сред, материалов и веществ самое широкое распространение находят высокочастотные резонансные методы с использованием вихретоковых преобразователей, которые основаны на взаимодействии электромагнитного поля с контролируемой средой [1]. Большое значение в этом случае имеет правильный выбор типа датчика, рабочей частоты и вида колебательной системы. Необходимо учитывать не только частотные дисперсии электрических и магнитных свойств среды, но и значения чувствительности резонансной системы к изменению контролируемого параметра. Доказано [2], что для контроля параметров среды с невысокой электропроводностью наиболее целесообразно применение двухконтурной колебательной системы с индуктивным или емкостным датчиком в качестве первичного измерительного преобразователя. При этом если контролируемый параметр характеризуется малыми относительными изменениями, то максимальная чувствительность прибора контроля достигается при измерениях фазовых параметров.

Таким образом, цель данной работы – предложить схему прибора вихретокового контроля с повышенной чувствительностью, позволяющего увеличить точность измерений в условиях малого диапазона изменений контролируемых параметров.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

В большинстве практических случаев процесс вихретокового контроля реализуется в три этапа: сначала измеряются амплитудно-фазовые параметры эталонного образца, затем – параметры контролируемого вещества, после чего выполняется вычитание результатов двух измерений и их сравнение с допустимыми граничными значениями. Разделение во времени

процессов измерения параметров образцового материала и исследуемого вещества может приводить в ряде случаев к понижению достоверности контроля, обусловленному, в частности, изменением температуры окружающей среды, влиянием случайных помех, шумов и т. п. Радикальным способом, позволяющим уменьшить влияние мешающих факторов на результаты измерений, является одновременная подача возбуждающего сигнала на эталонный образец и контролируемый материал с выделением разностных амплитудно-фазовых параметров в реальном масштабе времени. Реализация такого способа возможна, в частности, при подключении двух вихретоковых преобразователей в измерительную систему на основе двух резонансных LC-контуров со слабой емкостной связью между ними.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Для анализа процесса сравнения амплитудно-фазовых параметров двух вихретоковых преобразователей, работающих в системе взаимосвязанных контуров, проведено схемотехническое моделирование устройств на ПЭВМ по программе *Electronics Workbench (EWB)* при различном сочетании и варьировании эквивалентных RLC-параметров.

Для построения графиков амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик использовались модели генератора гармонических колебаний и характериографа (*Bode plotter*). Расчетная погрешность моделирования и установки параметров по программе *EWB* не превышала значения 0,1%.

Модель типовой схемы с двумя контурами приведена на рисунке 1.

Для получения плоской формы амплитудно-частотной характеристики конденсатор связи  $C_{CB}$  между двумя LC-контурами при одинаковых параметрах образцового и рабочего вихретоковых преобразователей  $L_0 = L$ ,  $C_0 = C$  выбирался в модели по условию  $C_{CB} \approx 0,03C$  (рисунок 1). Подключение конденсатора связи  $C_{CB}$  понижает частоту квазирезонанса  $f_p$ , которая отличается от резонансной частоты настройки  $f_0$  каждого контура:

$$f_p = 1/2\pi\sqrt{L_0(C_0 + C_{CB})} \approx f_0(1 - C_{CB}/2C_0).$$

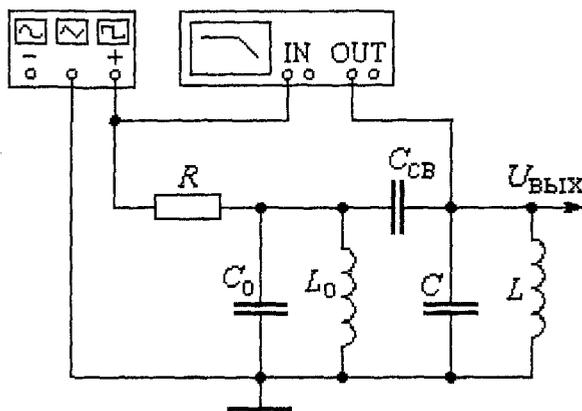


Рисунок 1 – Моделируемая схема

При изменении частоты возбуждающего сигнала  $f_B$  в полосе пропускания  $2\Delta f$  двух взаимосвязанных LC-контуров амплитуда выходного напряжения практически не зависит от частоты, а фаза  $\Delta\phi$  выходного сигнала на рабочем LC-контуре равномерно уменьшается от  $-180^\circ$  до  $-360^\circ$ , причем значение фазы на частоте квазирезонанса  $f_p$  составляет  $\Delta\phi = -270^\circ$ .

Следовательно, применение вихретоковых преобразователей в двухконтурной системе позволяет обеспечить два существенных преимущества по сравнению с одноконтурным преобразователем:

- при малом изменении эквивалентной индуктивности  $L$  вихретокового преобразователя (в диапазоне  $\Delta L / L \leq \pm 2\%$ ) амплитуда выходного напряжения остается постоянной, что позволяет уменьшить инструментальную погрешность при ее последующем преобразовании в импульсную форму или детектировании;

- вдвое расширяется диапазон изменения фазы выходного сигнала в полосе пропускания ( $\Delta\varphi \approx 180^\circ$ ) по сравнению с диапазоном отдельного  $LC$ -контура, для которого изменение фазы в полосе пропускания составляет всего  $\Delta\varphi \approx 90^\circ$  и лежит в пределах от  $+45^\circ$  до  $-45^\circ$ .

Фазовая чувствительность индуктивного или емкостного датчиков при использовании взаимосвязанных контуров зависит от эквивалентной добротности контура  $Q \approx R / \sqrt{L_0 / C_0}$ , т. е. повышается при увеличении сопротивления  $R$  в эквивалентной схеме (рисунок 1). В частности, при добротности  $Q = 20$  и отклонении частоты возбуждающего сигнала  $f_B$  от частоты квазирезонанса  $f_P$  на  $\pm 1\%$  (что соответствует изменению эквивалентной индуктивности вихретокового преобразователя на  $\Delta L / L \approx \pm 2\%$ ), фаза выходного сигнала изменяется в пределах  $\Delta\varphi \approx \pm 30^\circ$ .

Согласно полученным результатам моделирования, фазовая чувствительность к относительному изменению индуктивного или емкостного параметров составляет  $\Delta\varphi / (\Delta L / L) \approx \Delta\varphi / (\Delta C / C) \approx 15^\circ / \%$ . При этом относительное изменение частоты квазирезонанса при аналогичной девиации  $LC$ -параметров существенно ниже и составляет всего  $\Delta f_P / f_P \approx 1\%$  при изменении этих параметров на  $\Delta L / L = \Delta C / C \approx 2\%$ .

Для получения результатов вихретокового контроля параметров среды необходимо выполнять дальнейшие функциональные преобразования сигналов. При этом значительно проще реализовать высокоточное измерение частоты, а не разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами измерительного преобразователя. Современные цифровые частотомеры позволяют измерять частоту в диапазоне до 100 МГц методом прямого счета с погрешностью менее 0,01%, в то время как точность фазометров в радиочастотном диапазоне относительно невысока.

В частности, для цифрового измерения фазы сигналов на частотах выше 1 МГц в схемах современных фазометров выполняют в аналоговой форме несколько преобразований опорного и измеряемого сигналов. При этом нормируют амплитуды входных сигналов переключением коэффициентов усиления предварительных усилителей в каждом канале фазометра, выполняют аналоговое умножение входных сигналов на образцовый высокочастотный сигнал, после чего выделяют с помощью фильтров сигналы суммарной частоты и лишь затем измеряют разность фаз.

Большинство перечисленных операций реализуют в аналоговой форме, поэтому погрешность измерения фазы на высоких частотах достигает единиц градусов. Данная погрешность зависит от отношения амплитуд сигналов в каналах фазометра, а также от стабильности статических и динамических параметров аналоговых устройств, в частности, полосовых фильтров. Вследствие этого для повышения точности измерений и уменьшения сложности и стоимости аппаратуры контроля более целесообразно реализовать цифровое измерение частоты квазирезонанса, а не разности фаз двух сигналов.

Согласно полученной при моделировании зависимости напряжения  $U_{\text{ВЫХ}} = F(f_B)$ , амплитудно-частотная характеристика взаимосвязанных контуров имеет плоскую форму в полосе пропускания. Поэтому для выделения частоты квазирезонанса  $f_P$  нужно дополнительно измерять фазу выходного сигнала и выделять момент ее перехода через расчетное значение  $\varphi = -270^\circ$ . Однако даже использование современной элементной базы и быстродействующих цифровых микросхем не позволяет обеспечить погрешность измерения фазы ниже  $\pm 1^\circ$ . Вследствие этого необходимо изменить алгоритм преобразования, чтобы получить высокую

чувствительность устройства вихретокового контроля к изменению контролируемого параметра.

Возможность улучшения фазовой чувствительности проверена моделированием модифицированной схемы (рисунок 2) с установкой LC-параметров аналогично предыдущей модели.

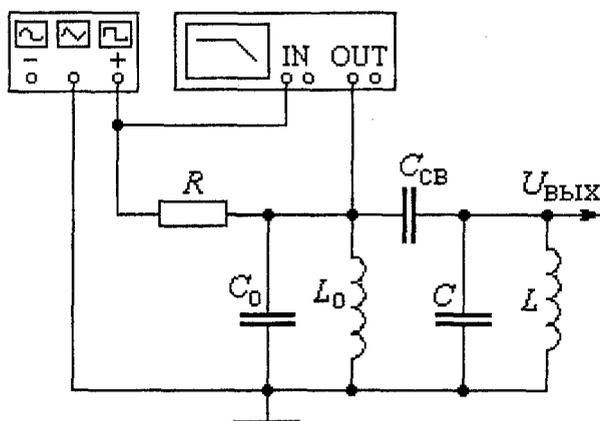


Рисунок 2 – Улучшенная двухконтурная схема

В результате проведенного моделирования установлено, что при аналогичной плоской форме амплитудно-частотной характеристики выходного напряжения  $U_{ВЫХ} = F(f_B)$  наблюдается резкое, практически вертикальное изменение фазы сигнала на выходе образцового контура в пределах от  $-85^\circ$  до  $+85^\circ$  на частоте квазирезонанса  $f_p$ . При этом фаза переходит через нулевое значение не только на частоте квазирезонанса  $f_p$ , но и на границах полосы пропускания резонансного контура.

Следовательно, в устройстве контроля на взаимосвязанных контурах нужно выполнять регулирование амплитуды напряжения на выходе рабочего контура, а фазовый угол выделять по сигналу на выходе образцового контура. При этом можно определить частоту резонанса по изменению знака фазы, а не по ее значению. Такой алгоритм позволяет заменить процесс измерения фазы операцией ее сравнения с нулевым уровнем. При этом отклонение порогов срабатывания фазового компаратора в несколько угловых градусов не будет оказывать влияния на точность выделения частоты резонанса  $f_p$  вследствие большой крутизны фазочастотной характеристики взаимосвязанных контуров  $\varphi = F(f_B)$  на частоте  $f_p$ .

Анализ данных, полученных в результате моделирования, показал, что чувствительность частоты квазирезонанса к изменению LC-параметров в двух контурах с емкостной связью практически аналогична чувствительности одиночного резонансного LC-контура при одинаковой добротности сравниваемых контуров. Однако использование двухконтурной схемы построения прибора контроля позволяет значительно повысить фазовую чувствительность в области частоты квазирезонанса, что является существенным преимуществом такого способа построения приборов, предназначенных для вихретокового контроля параметров среды.

Понижение добротности второго резонансного контура приводит к некоторому уменьшению крутизны фазочастотной характеристики взаимосвязанных контуров. Установлено, что при подключении дополнительной нагрузки  $R_H$  параллельно второму LC-контуру на рисунке 2 диапазон изменения фазы вблизи частоты резонанса уменьшается от типовых значений, составляющих  $\pm 85^\circ$ , до уровня  $\varphi \approx \pm(15...20)^\circ$ .

Такое влияние связано со снижением эквивалентной добротности взаимосвязанных контуров, которую практически можно повысить несколькими способами.

В частности, для исключения подобного эффекта необходимо уменьшать характеристическое сопротивление контуров  $\rho = \sqrt{L/C}$ , например, одновременным уменьшением ин-

дуктивности  $L$  преобразователя и увеличением емкости  $C$  резонансного контура, чтобы при вихретоковом контроле не изменять расчетную частоту квазирезонанса

$$f_p = 1/2\pi\sqrt{LC} \approx 1/2\pi\sqrt{L_0C_0}.$$

Уменьшение характеристического сопротивления  $LC$ -контура (рисунок 2) на порядок (от исходного значения  $\rho = 1$  кОм до  $\rho = 100$  Ом) приводит к двукратному расширению диапазона изменения фазы и повышению крутизны фазочастотной характеристики в окрестности частоты резонанса  $f_p$ .

Снижение влияния эквивалентной нагрузки  $R_H$  можно обеспечить также подключением к вихретоковому датчику вторичных измерительных преобразователей (усилителя и амплитудного детектора) с большими входными сопротивлениями (на полевых транзисторах). Кроме того, для повышения эквивалентной добротности  $Q$  целесообразно применять в качестве источника возбуждающего сигнала генератор переменного тока с большим выходным сопротивлением  $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow \infty$ , а не источник переменного напряжения, выходное сопротивление которого обычно мало ( $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$ ).

Таким образом, применение двухконтурной схемы измерительного автогенератора при осуществлении вихретокового контроля дает ряд преимуществ, к которым относятся:

- повышение частоты возбуждающего сигнала вплоть до десятков мегагерц не оказывает существенного влияния на фазовую погрешность, так как при высокой добротности связанных контуров процесс измерения фазы заменяется измерением частоты при простом сравнении фазы с нулевым или опорным значением;
- высокая крутизна фазочастотной характеристики на частоте квазирезонанса позволяет снизить требования к чувствительности и ширине зоны гистерезиса фазовых компараторов и тем самым повысить диапазон частоты возбуждающего сигнала, подаваемого на вихретоковый датчик при осуществлении контроля;
- благодаря плоской форме амплитудно-частотной характеристики контуров с емкостной связью можно повысить точность детектирования амплитудных значений выходного сигнала вихретокового преобразователя.

### ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ.

На рисунке 3 приведена структурная схема двухконтурного устройства вихретокового контроля. Учитывая ограничения по точности измерения фазовых параметров высокочастотных сигналов, в данном устройстве реализовано непрерывное слежение за резонансной частотой параллельного  $LC$ -контура в процессе контроля, и по ее изменению можно судить о величине соответствующего параметра контролируемого материала. Для повышения фазовой чувствительности и обеспечения высокой добротности взаимосвязанных  $LC$ -контуров необходимо использовать катушки намагничивания без ферромагнитных сердечников, чтобы исключить дополнительные потери на вихревые токи в области высоких частот.

Принцип следящего регулирования частоты возбуждающих импульсов заключается в том, что в цикле вихретокового контроля изменяется направление развертки частоты импульсов при каждом изменении знака разности фаз между возбуждающим и выходным сигналами рабочего преобразователя. При этом амплитудный детектор подключается к выходу рабочего вихретокового преобразователя, а формирователь импульсов для выделения фазы сигнала – к образцовому преобразователю. Такое разделение цепей позволяет сочетать высокую фазовую чувствительность с равномерностью амплитудно-частотной характеристики устройства в широком диапазоне контроля.

В схеме устройства используются управляемый генератор импульсов УГИ, преобразователь напряжения в ток ПНТ с высоким выходным сопротивлением и система из двух связанных колебательных контуров. Амплитудным детектором АД и дифференциальным усилителем ДУ выделяется и усиливается сигнал разбаланса  $U_p = K_U (U_{\text{ПОР}} - U_M)$  между пороговым напряжением ( $U_{\text{ПОР}} \geq 2$  В), формируемым источником опорных напряжений ИОН,



чувствительности  $\Delta f_n$ , которая для микросхем быстродействующей серии КР1554 зависит от длительности фронта и спада импульсов, составляющих примерно  $t_{ФР} \approx t_{СП} \approx 4$  нс. Наличие зоны фазовой нечувствительности  $\Delta f_n$  может привести к флуктуации частоты возбуждающего сигнала  $\Delta f_B$  относительно резонансной  $f_P$  при следящем регулировании частоты возбуждающего тока. Так, при частоте резонанса  $f_P = 1$  МГц средняя длительность периода импульсов возбуждающего импульсного сигнала составляет  $T_B = 1/f_P = 1$  мкс, и при ее относительном изменении от нечувствительности  $D$ -триггера на  $t_{ФР}/T_P \approx 0,4$  % частота возбуждающих импульсов в режиме слежения может изменяться в диапазоне от 998 до 1002 кГц или на  $\Delta f_B = 4$  кГц, что ограничивает точность измерений.

Для повышения фазовой чувствительности в структурной схеме прибора контроля на рисунке 3 установлены два цифровых счетчика на входах  $D$ -триггера, которые увеличивают период следования импульсов. При использовании 8-разрядных двоичных счетчиков с коэффициентом деления  $K_D = 2^8 = 256$  зона нечувствительности  $D$ -триггера снижается до уровня  $t_{ФР}/(T_P K_D) \approx 0,0016$  %, а изменение частоты возбуждающего сигнала в окрестности резонанса уменьшается до значения  $\Delta f_B \approx 16$  Гц.

Применение двух дополнительных микросхем счетчиков позволяет уменьшить влияние запаздывания  $D$ -триггера на точность выделения знака фазы. При этом также существенно ослабляются требования к быстродействию аналогового коммутатора АК и интегратора при реализации процесса следящего преобразования.

Например, при аналогичных параметрах контура  $f_P = 1$  МГц и скорости развертки частоты возбуждающих импульсов  $V_f = 10$  кГц/с срабатывание  $D$ -триггера и соответствующее ему переключение направления развертки будет происходить с относительно низкой частотой, составляющей всего  $f_{ТТ} = V_f / 2\Delta f_B = 312,5$  Гц.

## ВЫВОДЫ

Применение двухконтурной схемы построения прибора вихретокового контроля со следящей подстройкой частоты позволяет обеспечить высокую фазовую чувствительность и реализовать достаточно точное сравнение параметров эталонного и рабочего вихретоковых преобразователей. Разделение выходных сигналов в резонансных контурах позволяет сочетать высокую фазовую чувствительность с равномерностью амплитудно-частотной характеристики в рабочем диапазоне контроля. Дополнительным преимуществом схемы на рисунке 3 является то, что использование следящего режима автоматической подстройки частоты возбуждающего сигнала позволяет реализовать вихретоковый контроль в непрерывном режиме работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под редакцией Г. С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
- 2 Арш Э.С. Автогенераторные методы и средства измерений. – М.: Машиностроение, 1979. – 256 с.

Лисичкин Владимир Георгиевич  
 Академия ФСО России, г. Орел  
 Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
 г. Орел, ул. Панчука, 66  
 Тел. (4862) 47-00-96  
 E-mail: [lisichkin@rekom.ru](mailto:lisichkin@rekom.ru).

Р.Н. ПОЛЯКОВ, С.А. ГЕРАСИМОВ

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В статье рассматриваются базовые предпосылки создания подшипников скольжения с наноструктурированными поверхностями, обосновываются преимущества перед существующими на сегодняшний день технологиями и получаемые улучшения рабочих характеристик подшипника, а также приводится ориентировочное описание технологического цикла получения наноструктурированной поверхности.*

*Ключевые слова:* подшипник скольжения, роторная система, наноструктурирование, ресурс, трение, износ.

*The article covers the prerequisites for creation of bearings with nano-structured surface, justified advantages over currently existing technologies and their improved performance of the bearing, as well as a tentative description of the technological cycle for nano-structured surface.*

*Keywords:* plain bearing, rotors system, nanostructurization, durability, friction, wear.

Роторно-опорные узлы двигательных установок машин и агрегатов энергетических и транспортных систем во многом определяют наработку на отказ и основные параметры работоспособности данных устройств. В свою очередь, обеспечение удовлетворительной работы ротора – стабильность вращения, приемлемый уровень вибраций, передача внешней нагрузки на корпус – обеспечивается подшипниками. Актуальность постоянного совершенствования опорных узлов роторов агрегатов энергетического и транспортного машиностроения определяется весомостью повреждений всей машины вследствие внезапных или постепенных отказов опорных узлов. Неправильный выбор подшипника качения или ошибочное проектирование подшипника скольжения может приводить к поломке всего роторного агрегата и выходу из строя всей машины. Существующие на сегодняшний день виды подвеса роторов имеют по сравнению друг с другом определенные достоинства и недостатки: для подшипников качения характерны малые пусковые моменты трения, меньший расход цветных металлов, высокий уровень технологичности, но они имеют ограничение по быстроходности и меньшее демпфирование по сравнению с подшипниками скольжения; для подшипников скольжения нет ограничений по быстроходности, имеют возможность быть выполненными съемными, но требуют дополнительную систему подачи смазочного материала, обладают на некоторых режимах неустойчивостью; магнитные подшипники лишены этих недостатков, но требуют сложной и дорогостоящей системы управления.

Развитие и прогресс технологических, транспортных и энергетических машин связаны не только с созданием и изобретением новых принципов движения и взаимосвязи элементов машин, но и в огромной своей части созданию новых конструкционных материалов и уникальных сплавов на их основе. Современный уровень развития нанотехнологий дает огромные возможности в области улучшения физических и механических характеристик материалов и деталей машин, на их основе. Исследование возможностей повышения работоспособности деталей машин путем применения наноструктурированных материалов является актуальной научно-практической задачей, степень решения которой на сегодняшний день достаточно невелика.

В первую очередь объектами применения данных возможностей должны стать детали машин работающих в условиях постоянного трения друг относительно друга (подшипники скольжения и качения, узлы двигателей внутреннего сгорания, резьбовые соединения и др.), так как для этих деталей первоочередными критериями работоспособности являются прочность и износостойкость. Большинство случаев выхода таких деталей из строя и последующего отказа всего роторного узла, а затем и всей машины, происходит после постепенного

изменения геометрических размеров под действием сил трения. Структурирование поверхности конструкционных материалов за счет нанесения наночастиц одного материала на поверхность другого приводит к появлению новых, зачастую уникальных свойств по прочности и износостойкости, то есть наноструктурирование материалов позволяет повысить ресурс детали, уменьшить риск возникновения внезапного отказа всей машины в целом, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт.

Подшипники скольжения являются ответственными деталями роторных машин (роторные узлы двигателей внутреннего сгорания, насосы, компрессоры, детандеры агрегатов двигателей летательных аппаратов и жидкостных реактивных двигателей, турбоустановки генераторов электростанций и мн. др.) и не просто ответственными, а в большинстве своем определяющими удовлетворительные параметры работы и надежности всей машины в целом. Поэтому исследование возможностей совершенствования опорных узлов за счет применения нанотехнологий и создание рыночной ниши по их созданию и внедрению является актуальной проблемой.

Для большинства деталей машин основными критериями работоспособности являются прочность, жесткость и износостойкость (зубчатые, червячные, винт-гайка передачи, подшипники скольжения и качения, резьбовые соединения и др.). Технология модифицирования поверхностей материалов на макроуровне, начиная от химико-термических покрытий и заканчивая многослойными металлами и уникальными сплавами, уже давно доказала свою эффективность с позиций повышения показателей работоспособности относительно базовой детали. При таких подходах усложнение технологического процесса с лихвой покрывается получаемыми положительными эффектами на прочность, износостойкость и другие механические характеристики. Затраты с ними связанные гораздо меньше затрат на ремонт и эксплуатацию, не говоря уже о повышенном ресурсе и снижении рисков возникновения отказов и, как следствие, повышение конкурентоспособности базового изделия.

Современный уровень развития нанотехнологий существенно расширяет область возможностей по созданию новых видов конструкционных материалов – металлов с поверхностью модифицированной или структурированной на наноуровне.

Технологический процесс создания наноструктурированных поверхностей достаточно сложен и может выполняться несколькими различными способами, например, упомянутым ранее методом распыления в газоплазменном разряде частиц металла-присадки с дальнейшим осаждением на металл-основу в специальных установках (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Установка для напыления газоплазменным разрядом

При этом можно предположить, что наночастицы полностью покрывают микронеровности металла-основы и образуют на нем высокопрочную поверхность за счет межмолекулярных сил и близкую к абсолютно гладкой за счет очень малого размера осаждаемых частиц (рисунок 2).

Положительное влияние такого модифицирования поверхности на физические и механические характеристики уже доказано российскими и зарубежными учеными, специализирующихся на создание новых видов конструкционных материалов на основе нанотехнологий, но конечных решений и законченных коммерческих продуктов в этой сфере не так уж много и относятся они больше к нанoeлектронике. При этом можно констатировать, что возможности применения нанотехнологий для уже существующих (традиционных) деталей машин остаются неизученными, несмотря на всю логичность обоснований улучшения рабочих характеристик и принципиальную возможность их изготовления, хоть и весьма трудную технологически.

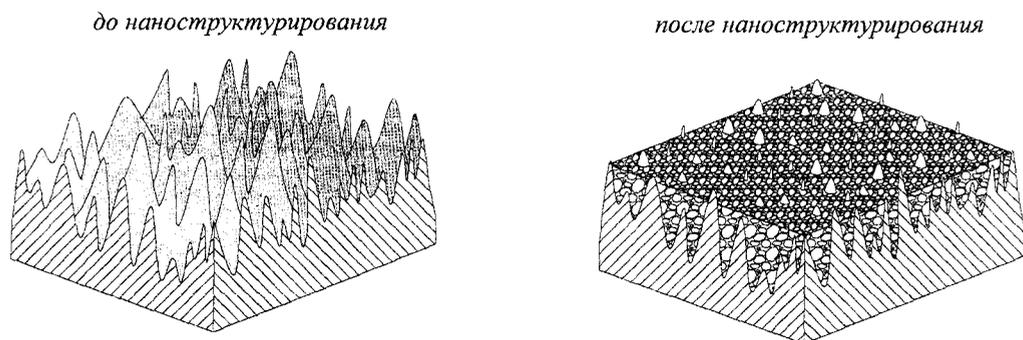


Рисунок 2 – Структура металла до и после наноструктурирования

В таблице 1 представлены характеристики традиционных подшипников скольжения [2] и возможные положительные результаты для подшипников с наноструктурированной поверхностью.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики традиционных подшипников скольжения и подшипников скольжения с наноструктурированной поверхностью

| Традиционный подшипник скольжения<br>1   | Наноструктурированный подшипник скольжения<br>2  |
|--|--|
| <b>Потери на трение</b>  |  |
| Коэффициент трения гидродинамического подшипника для режима жидкостного трения составляет $f=10^{-3}$ .  | За счет получения поверхностей скольжения, близкой к абсолютно гладкой предполагается значительное уменьшение коэффициента трения до $f=10^{-4}$ .   |
| <b>Износостойкость</b>   |  |
| Поверхность традиционных подшипников скольжения, выполненная из «мягких» антифрикционных материалов, подвержена постепенному износу в периоды пуска и останова ротора, когда подшипник работает в режиме сухого и граничного трения. | Повышенная износостойкость из-за низкого коэффициента трения и высокой поверхностной прочности за счет образования межмолекулярных связей между наночастицами присадки из антифрикционного материала с кристаллической решеткой основного металла. |
| <b>Быстроходность</b>  |  |
| Неограниченная предельная быстроходность в режиме жидкостного трения. Предельная линейная скорость на поверхности цапфы для подшипников скольжения достигает $v=150$ м/с.  | Улучшение характеристик трения и износостойкости позволит повысить предел быстроходности до $v=200$ м/с.   |
| <b>Несущая способность</b>   |  |
| Зависит от скорости относительного движения и вязкости смазки – базовых составляющих гидродинамической силы.   | Повышенная несущая способность из-за улучшения условий прилипания смазки на поверхности втулки подшипника на основе появления взаимодействия на межмолекулярном уровне.  |

| Продолжение таблицы 1   |   |
|---|---|
| 1   | 2   |
| <b>Ресурс</b>   |   |
| Долговечность подшипников скольжения в режиме жидкостного трения теоретически неограниченна. Основной износ втулки подшипника скольжения происходит во время пуска и останова ротора, а также во время ударных взаимодействий в результате неустойчивой работы.                       | Выше чем у традиционного подшипника скольжения в несколько раз.   |
| <b>Технологичность и стоимость</b>  |   |
| Достаточно простые высокотехнологичные детали, но относительная стоимость (по сравнению со стандартными подшипниками качения) достаточно высока из-за применения дорогостоящих антифрикционных материалов. Технологические сложности возрастают при изготовлении многослойных втулок. | Технологическая сложность сопоставима со сложностью изготовления многослойных подшипников. Стоимость опытных образцов будет высокой, но с дальнейшим совершенствованием технологии изготовления и выходом на серийное производство будет соизмерима со стоимостью существующих подшипников. |

Резюмирую все выше сказанное, можно утверждать, что за счет полученной новой наноструктурированной поверхности в подшипнике скольжения улучшаются его рабочие характеристики: нанесение на поверхность нанопорошка позволяет получить поверхность близкую к абсолютно гладкой (шероховатость определяется размерами наночастиц), что уменьшает трение в подшипнике скольжения и повышает его быстроходность и износостойкость; малая шероховатость наноструктурированной поверхности подшипника скольжения обуславливает тот факт, что сцепление поверхности со смазкой осуществляется на молекулярном уровне, что способствует появлению более благоприятных условий для создания гидродинамического режима, то есть повышается грузоподъемность подшипника скольжения.

В дальнейшем авторами планируется разработать модифицированную гидродинамическую теорию с учетом процессов происходящих на уровне межмолекулярных связей наноструктурированных металлов и смазки подшипника скольжения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков Ю.Д. Микро- и наноструктурированные материалы. М.: Премиум, 2008. – 182 с.
2. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. – М.: Машгиз, 1959. – 404 с.

#### **Поляков Роман Николаевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент каф. «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 49-98-85  
E-mail: [romanpolak@mail.ru](mailto:romanpolak@mail.ru)

#### **Герасимов Сергей Анатольевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Заведующий лабораторией «Моделирование гидромеханических систем»  
Тел. (4862) 49-98-85  
E-mail: [pmp1@ostu.ru](mailto:pmp1@ostu.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 3 до 7 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).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полуужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

#### *Рисунок 1 – Текст подписи*

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.ostu.ru](http://www.ostu.ru).

*Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.*

*Адрес учредителя:*

Орловский государственный технический университет  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 43-48-90  
www.ostu.ru  
E-mail: admin@ostu.ru

Технический редактор А.В. Морозова  
Компьютерная верстка А.В. Морозова

Подписано в печать \_\_\_\_\_.2010 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 7,7.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № 42-1012

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.