

# ВЕСТНИК

## САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2021

№ 1 (88)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Март 2021 года

**Главный редактор**  
д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

**Заместитель главного редактора**  
д.т.н., профессор Ю.Б. Томашевский

**Ответственный секретарь**  
к.т.н., доцент И.В. Злобина  
**Технический секретарь**  
к.т.н., доцент В.О. Горбачев

### Редакционная коллегия:

Д.т.н., проф. А.Н. Васин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.ф.-м.н., проф. М.В. Жигалов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. А.Е. Зверовщиков (ПГУ)  
К.т.н. А.А. Казинский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. А.В. Королёв (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)  
Д.т.н., проф. А.А. Львов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. Т.Г. Насад (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Резчиков (ИПУ РАН)  
Д.т.н., проф. И.В. Родионов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.ф.-м.н., проф. М.Д. Старостенков (АлтГТУ)  
Чл.-корр. РАО, д.т.н., проф. А.А. Сытник  
Д.т.н., проф. А.А. Фомин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)  
Д.т.н., проф. А. Аман (Германия)  
Д.т.н., проф. Р. Крехел (Словакия)  
Д.т.н., проф. В. Хардт (Германия)

Редактор Л.А. Скворцова  
Компьютерная верстка Т.В. Семёновой  
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

---

Адрес редакции:  
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77  
Телефон: 8 (845-2) 99-89-81  
E-mail: vestnik@sstu.ru

---

Подписано в печать 15.03.2021 Дата выхода в свет 30.03.2021  
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.  
Усл. печ. л. 14,5 Уч.-изд. л. 5,8  
Тираж 500 экз. Заказ 14  
Отпечатано в Издательстве СГТУ,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

---

Полная электронная версия журнала  
размещена в системе РИНЦ  
в открытом доступе на платформе  
eLIBRARY.RU

Свидетельство о регистрации средства массовой  
информации *ПИ № ФС77-65155 от 28 марта 2016 г.*

© Саратовский государственный  
ISSN 1999-8341 технический университет, 2021

# VESTNIK

**SARATOV  
STATE  
TECHNICAL  
UNIVERSITY**

**2021**

**№ 1 (88)**

**Scientific Journal**

Since 2003

**Published quarterly**

March 2021

**Editor-in-chief**

Professor A.A. Ignatiev

**Editor-in-chief assistant**

Professor Yu.B. Tomashevsky

**Executive secretary**

PhD, Associate Professor I.V. Zlobina

**Technical secretary**

Associate Professor V.O. Gorbachev

**Editorial board:**

Dr. Sc., Professor A.N. Vasin (SSTU)

Dr. Sc., Professor M.V. Zhigalov (SSTU)

Dr. Sc., Professor O.V. Zakharov (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.E. Zverovschikov (PSU)

Ph. D. A.A. Kazinski (SSTU)

Dr. Sc., Professor A.V. Korolev (SSTU)

Dr. Sc., Professor V.A. Kushnikov (Scientific centre of RAS)

Dr. Sc., Professor A.A. Lvov (SSTU)

Dr. Sc., Professor T.G. Nasad (SSTU)

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor

A.F. Rezchikov (ISP RAS)

Dr. Sc., Professor I.V. Rodionov (SSTU)

Dr. Sc., Professor M.D. Starostenkov (AltSTU)

Corresponding member of RAE,

Dr. Sc., Professor A.A. Sytnik

Dr. Sc., Professor A.A. Fomin (SSTU)

Dr. Sc., Professor A. Aman (Germany)

Dr. Sc., Professor R. Krekhel (Slovakia)

Dr. Sc., Professor V. Hardt (Germany)

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering A.H. Askarova

---

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street  
Saratov, 410054 Russia

Phone: +7 (845-2) 99-89-81

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

---

Print date: 15.03.2021. Date of publication 30.03.2021

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 14,5

Publication base sheet 5,8

Circulation: 500 printed copies

Order 14

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

---

eLIBRARY.ru

© Yuri Gagarin State Technical  
ISSN 1999-8341 University of Saratov, 2021

# СОДЕРЖАНИЕ

## 60-ЛЕТИЕ ПЕРВОГО КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА Ю.А. ГАГАРИНА

**Кирюшкина В.В., Лобачева Г.В.**

ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ГАГАРИН В ИСТОРИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ..... 8

**Буйкевич И.Н.**

ГАГАРИНСКИЙ КОЛЛЕДЖ..... 17

**Плотников П.К.**

К 60-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ПОЛЕТА Ю.А. ГАГАРИНА В КОСМОС..... 25

**Байбурин В.Б.**

ВКЛАД УЧЕНЫХ СГТУ В РАЗВИТИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕКТРОНИКИ..... 29

**Никифоров А.А.**

ЗНАЧИМЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ  
В РАЗВИТИИ АВИАЦИОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ ..... 32

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Дробынин М.Е., Ясюк Н.А., Филина Е.А.,**

**Аль-Таи О.Д.М., Торопова О.А.**

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ  
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АВИАНИКИ..... 37

**Игнатъев М.А., Игнатъев А.А.**

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛА КАТАСТРОФИЧЕСКОГО  
ИЗНОСА РЕЗЦА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ  
ПО ЗАПАСУ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ..... 51

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**Васин А.Н., Изнаиров Б.М., Решетникова О.П.**

ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ  
И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ..... 58

**Мулдашева Г.К., Бекрёнев Н.В., Казинский А.А.**

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ  
МАЛОГО ДИАМЕТРА В ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОРРОЗИОННО-  
И ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВАХ ..... 62

**Насад Т.Г., Насад И.П., Шеров К.Т.**

ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ  
В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ..... 73

**Решетникова О.П., Изнаиров Б.М., Топенева А.С., Колесников А.Ф.**

СХЕМА БАЗИРОВАНИЯ ВАЛОВ И ЕЕ ПОГРЕШНОСТЬ  
ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ ШЛИФОВАНИИ С ВРЕЗНОЙ ПОДАЧЕЙ..... 79

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Головков И.С., Сперанский С.К., Проскуряков В.И., Вавилина Н.А.**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МИКРОТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТИ  
ОТ НАПРЯЖЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ  
С НАЛИЧИЕМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫХОДНЫХ ВЕЛИЧИН..... 85
- Злобина И.В., Бекренёв Н.В.**  
ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПУТЕМ СВЧ МОДИФИЦИРОВАНИЯ..... 93
- Исаев А.Е., Сафошкин Д.З., Михайлов И.Н., Кособудский И.Д., Ушаков Н.М.**  
МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕЗОПОРИСТОГО ОКСИДА КРЕМНИЯ  
НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА МЕТОДОМ «ОБРАТНОЙ» ЭМУЛЬСИИ ..... 104



# CONTENTS

## 60<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF THE FIRST SPACE FLIGHT OF YURI GAGARIN

<b>Kiryushkina V.V., Lobacheva G.V.</b> YURI GAGARIN IN PUBLIC MEMORY .....	8
<b>Buykevich I.N.</b> GAGARIN COLLEGE .....	17
<b>Plotnikov P.K.</b> TO MARK THE 60 <sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF YURI GAGARIN'S FLIGHT INTO SPACE .....	25
<b>Baiburin V.B.</b> CONTRIBUTION OF SSTU SCIENTISTS TO THE DEVELOPMENT OF AEROSPACE TECHNOLOGY, INSTRUMENTATION AND ELECTRONICS.....	29
<b>Nikiforov A.A.</b> COMPANIES OF STRATEGIC IMPORTANCE FOR THE DEVELOPMENT OF AIRCRAFT INSTRUMENTATION IN SARATOV REGION .....	32

## COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND MANAGEMENT

<b>Drobynin M.E., Yasyuk N.A., Filina E.A., Al-Tai O.D.M., Toropova O.A.</b> NONLINEARITY IN PIEZORESISTIVE MICROELECTROMECHANICAL SENSORS USED IN AVIONICS.....	37
<b>Ignatiev M.A., Ignatiev A.A.</b> ALGORITHMS TO DEFINE THE MAIN GROSS WEAR DURING TURNING OPERATIONS BASED ON STABILITY MARGIN OF A DYNAMIC SYSTEM .....	51

## MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<b>Vasin A.N., Iznairov B.M., Reshetnikova O.P.</b> SPACE AND AVIATION TECHNOLOGIES IN THE XXI CENTURY.....	58
<b>Muldasheva G.K., Bekrenev N.V., Kazinsky A.A.</b> ULTRASONIC CHARACTERISTICS OF DRILLING SMALL DIAMETER HOLES IN HIGH-STRENGTH CORROSION- AND HEAT-RESISTANT ALLOYS .....	62
<b>Nasad T.G., Nasad I.P., Sherov K.T.</b> FORMING QUALITY CHARACTERISTICS OF A WORKPIECE SURFACE BY MEANS OF THERMAL EFFECTS .....	73
<b>Reshetnikova O.P., Iznairov B.M., Topeneva A.S., Kolesnikov A.F.</b> A SCHEME FOR SHAFT LOCATING AND ERRORS UNDER CENTRELESS GRINDING WITH THE INFEEED .....	79

## **METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE**

**Golovkov I.S., Speransky S.K., Proskuryakov V.I., Vavilina N.A.**

DETERMINATION OF THE MICROHARDNESS DEPENDENCE THE SURFACE IS  
AFFECTED BY THE PULSE VOLTAGE DURING LASER HARDENING  
TREATMENT WITH THE PRESENCE OF ERRORS IN THE OUTPUT VALUES ..... 85

**Zlobina I.V., Bekrenev N.V.**

IMPROVING PRODUCTIVITY AND QUALITY OF MACHINING PRODUCTS  
FROM POLYMER COMPOSITES USING MICROWAVE MODIFICATION ..... 93

**Isaev A.E., Safoschkin D.Z., Michailov I.N., Kosobudskiy I.D., Ushakov N.M.**

MODIFICATION OF MESOPOROUS SILICON OXIDE BY SILVER  
NANOPARTICLES BY THE «INVERSE» EMULSION METHOD..... 104



## Дорогие друзья!

60 лет назад человечество совершило огромный прорыв в развитии космических технологий. Юрий Алексеевич Гагарин первым покориł космическое пространство, и наш университет гордо носит его имя.

Символично, что юбилейный для полета Ю.А. Гагарина год Президент России Владимир Владимирович Путин объявил Годом науки и технологий. Основные задачи, стоящие перед СГТУ имени Гагарина Ю.А., – развитие научного потенциала, подъем науки на качественно новый уровень, тесное взаимодействие с промышленным сектором, обмен опытом и взаимовыгодное сотрудничество между всеми вузами.

В юбилейном номере журнала «Вестник СГТУ» отражены достижения ученых СГТУ имени Гагарина Ю.А. Здесь представлены наши исследования и разработки в области математического моделирования, информационных технологий, инновационных материалов, высокоэффективных технологий машиностроения и автоматизации производства.

Мы должны делом, нашими достижениями доказывать, что достойны славного имени Юрия Алексеевича Гагарина.

Ректор

О.А. Афонин



<https://obiografii.ru/yurij-gagarin-biografiya/>

## 60-ЛЕТИЕ ПЕРВОГО КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА Ю.А. ГАГАРИНА

---

### **В.В. Кирюшкина**

доктор культурологии, доцент кафедры истории и культурологии СГТУ имени Гагарина Ю.А.

### **Г.В. Лобачева**

доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой истории и культурологии  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

### **ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ГАГАРИН В ИСТОРИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ**

Место, которое занимает Ю.А. Гагарин в нашей исторической памяти, уникально, определено его ролью первого человека, вырвавшегося за пределы сферы земного тяготения, что навсегда разделило историю человечества на две эры. Объективное значение этого события и его центрального участника бесспорно, но в данной статье речь пойдет о тех проекциях, которые личность Гагарина получила в коллективном сознании российского общества советского и постсоветского периодов.

Образ Ю.А. Гагарина в исторической памяти общества лишь частично совпадает с реальной личностью. Как заметил французский философ Р. Хальбвакс, память – всегда реконструкция прошлого, а не его копия, и ее реактуализация происходит в связи со сменой потребностей, ценностей общества [1, с. 79]. Эти потребности, ценности общества на определенном историческом этапе его развития формировали и образ Гагарина, оформлявшийся в том или ином монументе, книге, фильме и т. д.

Этот образ не был плодом исключительно идеологических построений, но результатом сложного взаимодействия идеологии, истории, памяти, мифологических свойств коллек-

тивного сознания. Образ Гагарина складывался из публикаций советской прессы и индивидуального восприятия личности Ю.А. Гагарина и его подвига, оформляясь в то, что еще один французский исследователь П. Нора, анализирувавший феномен коллективной памяти, назвал «местом памяти» [2, с. 40].

Таким местом памяти стало и само имя Гагарина в названии города (в 1968 году в Гагарин был переименован старинный русский городок Гжатск в Смоленской области – родном крае Ю.А. Гагарина), около семидесяти улиц в России, парков, площадей, улиц на Украине, Белоруссии, в Казахстане, Латвии, Армении, Молдавии, Польше, Сербии и т. д. в наименовании учебных заведений России и даже сортов цветов. Причем, как показывает, в частности, саратовская практика, это имя не утрачивает актуальности, но остается востребованным в ономастике современной России – с 2011 года Саратовский государственный университет носит имя Гагарина Ю.А., в 2018 году новому международному аэропорту Саратова распоряжением Правительства РФ было присвоено название «Гагарин».

Понятно, что первый космонавт Земли был обречен стать живым символом. В правительстве СССР, в окружении главного конструктора С.П. Королёва прекрасно понимали, что этот человек с момента сообщения о полете в СМИ станет в глазах миллионов полномочным представителем Советского Союза, эмблемой первого в мире социалистического государства, олицетворением его научных, технических и иных достижений. Его личность и его облик приобретут мощное пропагандистское значение.

И вот – 12 апреля 1961 года. Современники тех событий оставили множество самых эмоциональных свидетельств. В частности, в архиве одного из российских вузов сохранились отклики студентов на полет первого человека в космос. На фоне официозных, оформленных советской пропагандой, таких как, например, запись преподавателя В.Н. Елисейевой («Сбылась мечта человечества! Гражданин первого в мире социалистического государства совершил полет в космос. Радостно, великолепно! Хочется крикнуть на весь мир вслед за В. Маяковским: «Читайте, завидуйте нам, гражданам Советского Союза!») особенно привлекают внимание те отклики студентов, что передают ощущение начала новой эры в жизни человечества, страны, их собственных судьбах: «Братцы! Вы представляете, значит, через какой-нибудь год мы все полетим», «Теперь знаем, куда будем распределяться – на Луну!» [3, с. 286-287]. По выражению П. Вайля: «В сознании утверждается ощущение новых пространственно-временных отношений» [4, с. 15].

Складывается своего рода культ Гагарина: его именем женщины называют своих детей, его изображения конкурируют по своей частоте с портретами вождей партии. Героизация Гагарина в коллективном сознании советского общества прошла легко и естественно в силу разных причин, и массивная пропаганда была лишь одним из факторов; другими нужно назвать объективную значимость подвига Юрия Алексеевича, его личное обаяние, наконец, его образ легко укладывался в традиционную формулу «героя», характеризующую еще мифологическое сознание (В. Пропп, Дж. Кемпбелл, Е. Мелетинский): преодоление препятствий, могущественный помощник, испытание, выполнение невыполнимого задания, смерть. В свою очередь, многочисленные исследования показали, как успешно формулы мифологического сознания работают в современных типах коллективного сознания [5], и коллективная память здесь не будет исключением.

Образ Гагарина в коллективной памяти россиян неоднороден. Об этом свидетельствуют его воплощения в культуре советского и постсоветского периодов. Выделим ключевые, наиболее распространенные, типичные символы, структурирующие этот образ.

*Символ 1. Взлет, вознесение, прорыв...* Символ взлета, конечно, был проникнут идеологическими установками – человек в космосе как закономерный результат рабоче-крестьянской революции, символ торжества социалистической системы. Нужно понимать, что достижения космонавтики эксплуатировались не только советской, но и западной буржуазно-демократической пропагандой. Американский историк-славист и известный фотограф У. Брумфилд вспоминает сюжеты американских новостей о героическом полете Гагарина и о политических последствиях этого события: «Да, это считалось победой безбожного коммунистического режима. Да, неугомонный Никита Хрущёв, в чьей фамилии многие американцы делали ударение на первый слог, сразу объявил, что Юрий Гагарин не видел в космосе никакого бога. Но наша страна тоже отправила в космос первый спутник в январе 1958 года...» [6, с. 9].

Но этот символ не получил бы такую распространенность, не преодолел такую значительную историческую дистанцию, если бы не базировался еще и на общечеловеческих ценностях прогресса, прорыва в светлое, но не коммунистическое, а научно-техническое будущее, не коррелировал бы с важной для XX столетия идеей могущества человека.

Именно этот символ был положен в основу образной системы, пожалуй, главного памятника Ю.А. Гагарину – монумента, установленного в 1980 году к Олимпиаде-80 в Москве на площади Гагарина на Ленинском проспекте. Скульптор Павел Иванович Бондаренко заложил в свое творение ряд ярких семиотических кодов: монумент изготовлен из титана – металла, используемого при строительстве космических кораблей; установлен на Ленинском проспекте, а именно по нему Юрий Алексеевич въехал в город, направляясь из аэропорта Внуково, чтобы сделать доклад в ЦК КПСС об итогах первого полета в космос; ну и, конечно, перед нами яркий, запоминающийся образ Человека-ракеты, рассчитанный на восприятие на расстоянии и при движении на скорости, который нельзя не заметить, не запомнить. Перечисленные коды заложены в образную систему памятника самим автором, но интересно и то, что памятник как семиотический текст продолжает выстраиваться под воздействием его восприятия обществом, вокруг него появляются городские легенды, например рассказы о том, что колосс накрывается, что он издает особые звуки. Внутри памятника, в пространстве, сконструированном для восстановительных работ над монументом, проводятся экстремальные экскурсии. Таким образом, наблюдается взаимодействие между историей и коллективной памятью, которое характеризует «место памяти» в теории П. Нора: «места памяти формируются в динамике между памятью и историей, в их взаимной игре» [1, с. 81].

Предыстория и история другого памятника Ю.А. Гагарину работы скульптора Григория Постникова, установленного в Ташкенте в 1979 году, отражает трансформацию образа Гагарина в системе национальной памяти. В начале 60-х годов XX века на территории первого ботанического сада в Ташкенте, на левом берегу канала Анхор, был устроен парк, названный в честь Ю.А. Гагарина. В 1969 году, на следующий год после трагической гибели Юрия Алексеевича, в парке был установлен обелиск, имевший вид стелы

с водруженным на нее бетонным кубом, на одной из сторон которого был выполнен барельеф в виде портрета космонавта.

Только в 1979 году обелиск был заменен памятником авторства Постникова. Ростовая бронзовая скульптура изображает Юрия Гагарина в космическом скафандре без шлема, стоящего на вершине земного шара, на фоне 28-метровой стелы в виде стилизованного конденсационного следа ракеты. В правой руке, поднятой вверх, он держит макет первого искусственного спутника. Композиционно и стилистически памятник схож с монументом «Первый спутник» работы скульптора С. Ковнера, установленным в 1958 году на улице у вестибюля станции метро Рижская в Москве.

В 1995 году памятник был перенесен в Чиланзарский район города на улицу, носящую имя Юрия Гагарина, напротив кинотеатра «Чайка», позднее также переименованного в честь первого космонавта Земли. На месте первоначального открытия памятника, в парке им. Ю.А. Гагарина, постамент был установлен на высоком холме, от подножия которого к вершине вела широкая гранитная лестница. На новом месте постамент памятника установлен на ровной бетонной площадке и сам памятник оказывается «ближе к людям».

Разные города Советского Союза стремятся закрепить в исторической памяти советского общества, фиксируя свою причастность к биографии героя. В Оренбурге в 1986 г. появляется памятник Гагарину скульптора Юрия Львовича Чернова – бронзовая фигура космонавта высотой 3,8 метра установлена на полутораметровый бетонный постамент, облицованный гранитом. Глядя на Гагарина, который как бы готов снова преодолеть земное тяготение, трудно не вспомнить известные слова первого космонавта, выпускника Оренбургского летного училища, вспоминавшего «родное училище, давшее мне крылья в космос» [7, с. 29].



Памятник Ю.А. Гагарину, г. Москва



Памятник Ю.А. Гагарину, г. Гагарин

*Символ 2. Человек шагает как хозяин...* Идеологически этот символ продвигался как «человеческое лицо социализма»: знаменитая «гагаринская улыбка», призывы к миру, зарубежные турне... Уже через три недели после своего полета в космос Юрий Алексеевич отправился в Чехословакию, в итоге – с высокой интенсивностью объездил более 30 стран, каждый раз становясь героем митингов, лекций, пресс-конференций, официальных приемов. Конечно, он должен был воплощать идеал советского человека, на этот образ должны были работать его биография, личные качества, внешность. Что касается биографии Юрия Алексеевича, то в пропагандистских материалах она отлилась в четкую, «бронзовую» формулу: «внук путиловского рабочего, сын крестьянина, летчик-космонавт СССР», где последнее – почетное звание, учрежденное Указом Президиума Верховного Совета СССР от 14 апреля 1961 года. Формула наглядно демонстрировала возможности, открытые перед любым советским человеком, – «социальный лифт», который не снился странам буржуазных демократий. Советским гражданам было чем гордиться, к чему стремиться.

Этот символ лег в основу образной системы многих монументов Гагарину, возникших на территории страны. Один из них – памятник скульпторов Ю.Г. Орехова и М.А. Шмакова, установленный на центральной площади города Гагарина в 1974 году. На Красной площади на узком высоком черном гранитном постаменте возвышается 5-метровая бронзовая скульптура космонавта. У ног Юрия Алексеевича висит бронзовый «бумажный самолетик».

Гагарин словно парит над городом, его поза и развевающийся пиджак, перекинутый через плечо, придают образу динамичность и иконографически отсылают к образу молодого советского человека, полного планов и энергии, свободного и готового к великим свершениям на благо страны советов, растиражированному советским искусством. А бумажный самолетик – очаровательный символ детской мечты, способной привести к таким грандиозным результатам.

Саратовский памятник, открытый в 1995 г. на Набережной Космонавтов, воплощает ту же идею. Интересно, что автором проекта стал Ю.Л. Чернов, уже известный нам как автор монумента в Оренбурге, но теперь обратившийся к совершенно другой символической парадигме – к образу молодого человека, энергично шагающего к своей цели. При этом у саратовского «Гагарина», как и у оренбургского, биографические основания: здесь в индустриальном техникуме учился будущий первый космонавт.

С монументом, установленным на месте приземления Гагарина в Энгельском районе, связана длительная история формирования мемориального комплекса и его символического ряда, продолжающаяся и сегодня. Место, расположенное к югу от города Энгельса, где приземлился первый космонавт, назвали «Гагаринским полем». Сначала там вкопали столбик с дощечкой, на которой была надпись: «Не трогать. 12.04.61. 10 ч. 55 м. Моск. врем.», через год соорудили небольшой постамент, в 1965 году установлен 27-метровый обелиск в виде взмывающей вверх ракеты, а в 1981 году перед обелиском появился памятник Ю.А. Гагарину, выполненный по проекту скульптора Клары Алексеевны Матвеевой.

Памятник представляет совершенного мифологический образ Гагарина, шагающего в комбинезоне, со скафандром в руке и взмахом другой руки приветствующего встречающих его после приземления. В 2011 году в ознаменование 50-летия первого полета человека в космос на памятном месте был открыт мемориал «Галерея космонавтики», и образ самого Гагарина оказался центральным в композиции, состоящей из прочих «героев космо-



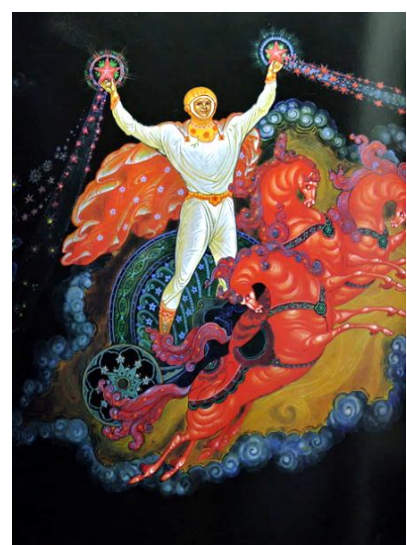
са»: К.Э. Циолковского, С.П. Королёва, с одной стороны, и 12 космонавтов, родившихся или проходивших подготовку и приземлившихся в Саратовской области – с другой. Таким образом, в семиотическом пространстве комплекса можно увидеть как горизонтальную структуру – связь между теоретиками и практиками космонавтики, так и вертикальную линию, связывающую саратовскую землю с космической высотой.

Памятник Гагарину на Байконуре скульптора Олега Песоцкого, установленный в 1984 году, неожиданно оказался вписан в космологическую символику. Памятник представляет собой четырехметровую фигуру космонавта с устремленными вверх руками. Фигура выполнена из бетона. По первоначальному проекту автора первый космонавт должен был держать в руках земной шар. Однако выяснилось, что технически водрузить и закрепить на вершине конструкции планету из бетона невозможно. Уже после открытия памятника обнаружилось, что во время восхода или заката между рук Гагарина на месте неустановленного земного шара оказывается солнце, или, соответственно – луна. Этот оптический эффект, зафиксированный на многих фотоснимках, обогатил символическую структуру памятника. Кроме того, памятник оказался вписан в своего рода ритуал: в период подготовки к пилотируемым космическим полетам космонавты считают необходимым его посетить.

**Символ 3. Сын России...** На примере многочисленных воплощений образа Гагарина в советской культуре мы обнаруживаем его трансформацию из героя «советского» в героя «российского». Так проявляется победа национальной идеи над классовой, воскрешение национальной памяти российского общества. Эту эволюцию образа наглядно демонстрирует сопоставление двух книжных изданий, посвященных Ю.А. Гагарину. В издании 1978 г. «Рассказы о Гагарине» Ю. Нагибина с иллюстрациями Г.А. Мазурина память о первом космонавте укладывается в схему «советского детства»: он, конечно, с трепетом внимает рассказам учительницы о русских витязях и героях войны 1812, всегда готов прийти на помощь нуждающимся в ней, как может, вредит немецким оккупантам; и уж очень напоминает история Юры и Пузана другую известную историю о Мальчише-Кибальчише и Плохише [8].



Нагибин Ю. Рассказы о Гагарине.  
Ил. Г.А. Мазурина



Сын России: книга-альбом.  
Ил. К.В. и Б.Н. Кукулиевых,  
О.В. Ана

Другое издание – книга-альбом «Сын России» с текстом А. Лиханова и иллюстрациями К.В. и Б.Н. Кукулиевых, и О.В. Ана, изданная в 1981 г. Здесь образ Гагарина представлен в символической системе русской традиции через сплав народного искусства и иконографии: на нем развевающийся плащ, рукавицы как для соколиной охоты, высокий аристократичный воротник, которые каким-то волшебным образом стилизуют костюм космонавта в княжеский наряд, каким представлялся он русским художникам XIX-XX веков, а вытянутые, плавные линии тел героев как будто заимствованы из русской иконографии XVII века; в свою очередь, цветовая гамма напоминает о русских народных промыслах. И уже герб СССР на груди космонавта производит впечатление традиционной русской вышивки, подобной той, что делались на праздничных рубахах, а образ Богородицы и картинка по углам напоминают житийные клейма в иконописи. Космонавты поразительно похожи на возносящихся в Рай праведников, а сам Гагарин узнается в образе бога Солнца, мчащегося на огневой тройке с горящими пятиконечными звездами в руках [9].

**Символ 4. Очеловечивание образа...** В памятниках постсоветской культуры заметно стремление к очеловечиванию образа Гагарина. Основным прием – вторжение биографии в его образ. В 2001 г. на родине Юрия Алексеевича во дворе мемориального Дома-музея школьных лет Юрия Гагарина в г. Гагарине появился памятник его матери – Анне Тимофеевне Гагариной работы скульптора Эдуарда Пахомова, представляющий очень человечный, каждому понятный образ.

Памятник Гагарину в Калуге скульптора А. Леонова был установлен в 2011 г. напротив входа в Калужский областной музей истории космонавтики и изображает Гагарина простым парнем в рубашке, раскинувшим руки к небесам.

Большую роль в создании монументов постсоветского времени играют фотографии, зафиксировавшие знаковые моменты жизни космонавта, позволяющие скульптору сделать акцент на какие-то реалистичные, бытовые детали. В памятнике Гагарину, установленном в 2014 г. в Брянске, скульптора Р. Юсупова мы узнаем отражение знаменитой фотографии, на которой герой широким шагом идет навстречу первому лицу государства во время официальной встречи, устроенной правительством после исторического полета. В скульптурном образе подмечена деталь – развязавшийся шнурок на ботинке героя.

Два памятника были созданы по мотивам одной исторической фотографии, сделанной также в 1961 году Игорем Снегирёвым. На снимке дружески сидят на скамейке Юрий Алексеевич и Сергей Павлович. Один из этих монументов появился в 2017 году в г. Королёве (работа скульптора Виталия Казанцева), а другой – на набережной г. Энгельса в том же году (скульпторы Мария Галина, Александр Садовский).

Очеловечивание Гагарина порой становится приемом намеренной разгероизации его образа. Яркий пример – бюст Гагарину в Риге работы скульптора Глеба Пантелеева, установленный у 2004 году. Здесь первый космонавт неожиданно получил латышские имя и фамилию – Юриус Гагаринс и изображен постаревшим – автор решил изобразить его так, как будто он дожил до сего дня и, соответственно, до своих 70 лет. Мы видим в этом случае уже вторжение автора в биографию героя, ее неправомерную корректировку и, понятно, нацеленную на лишение его всяких оснований, собственно, этим героем быть.

**Символ 5. Универсализация/Десоветизация образа...** В условиях спада идеологического противостояния между Россией и Западом наблюдается трансформация образа

Гагарина к универсальному символу прогресса человечества. Об этом свидетельствуют копия памятника Гагарину (оригинал находится в Люберцах с 1984 г.), установленная в Лондоне в 2011 г. по проекту скульптора Анатолия Новикова и по решению Британского совета в рамках культурной программы, посвященной 50-летию полета человека в космос. Сегодня британский Гагарин переехал в Гринвич, на территорию Королёвской обсерватории.

В Хьюстоне у исторического здания штаб-квартиры NASA и в Монпелье в 2012 и 2017 году были установлены копии калужского памятника Гагарину.

В 2011 году на церемонии открытия памятника Ю.А. Гагарину на площади имени Гагарина в Караганде (авторы – Мурат Байсбай и Аскар Нартов) глава Карагандинской области С. Ахметов назвал монумент «символом устремленности нашей страны в будущее» [10].

**Символ 6. Человек – Мечта – Судьба – Память...** Это символическое наполнение образа Гагарина чаще всего доминирует в современном российском кинематографе. Яркий пример темы мечты – фильм Алексея Учителя «Космос как предчувствие» 2005 г. с Дмитрием Муляром в роли Гагарина. В фильме Алексея Германа-мл. «Бумажный солдат» 2008 г. с Валентином Кузнецовым в роли Гагарина мы наблюдаем противостояние человека и государства, индивидуальных ценностей и долга. Кинокартина Павла Пархоменко «Гагарин: Первый в космосе» 2013 г. с Ярославом Жалниным в роли Гагарина выстраивает сюжет вокруг идеи «жизнь как судьба», о чем подсказывает и символическая длительность фильма – 108 мин, равная длительности исторического полета.

Удивительный и яркий пример современной интерпретации образа Гагарина мы находим в графике немецкого художника Клауса Энзиката 2011 года. Это иллюстрации не к подвигу Гагарина, а к самой Памяти о нем. Его сюжетами стали «Космическая гонка СССР и США», «В окрестностях деревни Смеловка», «Юные фанаты в швейцарской глубинке» и т. д. В рисунках-аллегориях, выполненные в стилистике поп-арта, мы узнаем образы советской и американской пропаганды периода холодной войны в том числе – обезьяну, запущенную в космос США, и собаку Лайку – «героиню советской космической эпопеи»; старушку с внучкой, пасших корову близ деревни Смеловка Саратовской области в момент катапультирования Гагарина; русского мальчика, замороженно слушающего рассказ бабушки о космическом полете Юрия Гагарина и, разумеется, решающего стать космонавтом. Обнаруживаем мы в художественном мире Клауса Энзиката и учеников швейцарской школы, восторгающихся Гагариным, намеренных брать с него пример [11].



Графика Клауса Энзиката

Попытаемся подвести некоторые итоги. Можем утверждать, что образ Гагарина не утрачивает своей ценности, но живет и меняется вместе с изменениями, происходящими с самим обществом, общественным сознанием. Появляются новые памятники, естественным образом меняется их язык, развиваются новые символические парадигмы. Но и старые памятники продолжают жить и функционировать как места памяти в историческом сознании современного общества, обрастая легендами и ритуалами, рожденными самим обществом. Наблюдая трансформацию образа Гагарина в советской и постсоветской культуре, мы обнаруживаем две противоположные тенденции: с одной стороны, образ героя размывается, превращаясь из «Советского гражданина Юрия Алексеевича Гагарина» в «Первого человека в космосе»; с другой же стороны, образ уплотняется за счет возвращения ему человеческих качеств, в нем становится меньше Героя, но больше – выдающейся исторической личности – Юрия Алексеевича Гагарина.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт И., Пфайферова Ш. Рамки и места коллективной памяти: старая тема, новые взгляды // *Личность, Культура, Общество*. 2011. Т. XIII. Вып. 1 № 61-62. С. 77-85.
2. Нора П. Проблематика мест памяти // Нора П., Озуф М. *Франция – память*. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 1999. С. 17-50.
3. Новиков И.А. «Советский человек в космосе» в оценке студентов и преподавателей Челябинского государственного педагогического института // *Двенадцатые Татищевские чтения: материалы Всерос. науч.-практ. конф.* 2020. С. 284-290.
4. Вайль П., Генис А. 60-е. Мир советского человека. 3-е изд. М.: Новое литературное обозрение, 2001. 368 с.
5. Кавелти Дж. Изучение литературных формул // *Новое литературное обозрение*. 1996. № 22. С. 33-64.
6. Брумфилд У. Юрий Алексеевич и мой полет в космос // *Родина*. 2011. № 14. С. 9-10.
7. Симонов К. Гагарин и гагаринца. Челябинск: Челябинское Южно-Уральское книжное издательство, 1980. – 123 с.
8. Нагибин Ю. Рассказы о Гагарине. 1-е изд. М.: Дет. лит., 1978. 96 с.
9. Сын России: Книга-альбом / Ил. К.В. и Б.Н. Кукулиевых, О.В. Ана. 2-е изд. М.: Мол. гвардия, 1982. 112 с.
10. В Караганде открыт памятник покорителям космоса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.zakon.kz/4464222-v-karagande-otkryt-pamjatnik.html>.
11. Королёва Н. Юрий Гагарин: неизвестные рисунки известного графика [Электронный ресурс] // *Deutsche Welle*. Режим доступа: <https://www.dw.com/ru/гагарину-посвящается-советский-космонавт-глазами-немецкого-художника/a-43321169>.

**И.Н. Буйкевич**

заведующая Народным музеем Ю.А. Гагарина

## **ГАГАРИНСКИЙ КОЛЛЕДЖ**

### ***СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ***

Командир первого отряда космонавтов, прославленный летчик Герой Советского союза Н.П. Каманин писал: «Для становления личности Гагарина решающее значение имеют 1951-1955 годы. Техникум дал Ю.А. Гагарину не только специальное образование, но и резко поднял его физическое и духовное развитие».

Это был Саратовский индустриальный техникум, сегодня – профессионально-педагогический колледж СГТУ имени Гагарина Ю.А., вот уже более 50 лет носящий имя первого космонавта планеты.

Славная история учебного заведения уходит корнями в XIX век, когда 30 августа 1871 года было открыто первое в городе ремесленное училище, с высочайшего соизволения получившее право называться в честь царя Александра II. Инициатором создания училища «для детей бедных горожан и лично занимающихся нищенством» (по Уставу) был купец первой гильдии Почетный гражданин Саратова Т.Е. Жегин, привлекший средства многих благотворителей – саратовских и московских, в том числе своего друга П.М. Третьякова.

В 1919 году училище преобразуется в политехнические курсы, затем – в профтехшколу им. А.В. Луначарского, перед войной в ремесленное училище № 2 металлистов, на базе которого в январе 1945 года по Приказу Главного управления трудовых резервов при СНК СССР и был открыт индустриальный техникум, призванный готовить так необходимых для послевоенного восстановления страны квалифицированных специалистов с профессиональным образованием.

Первым директором техникума стал Герой Советского Союза С.Я. Батышев, впоследствии долгое время проработавший заместителем председателя Госкомитета по профтехобразованию при Совете Министров СССР, академик, автор многих учебников. Вместе с ним пришли работать в индустриальный техникум В.Г. Филиппов, А.Е. Крестьянский, Н.И. Москвин, А.П. Акулова, Н.В. Рузанова, Н.А. Бренько, О.Н. Никитина, З.Н. Шапошникова, Г.Г. Душутин, К.В. Шапиро, М.Я. Паршкова, В.В. Сливко, Р.Н. Плотников.

Особую атмосферу серьезного отношения к учебе, товарищеской дружбы создавали преподаватели и учащиеся-фронтовики: А.М. Коваль, С.Н. Романцов, А.Н. Дзякович, Г.Г. Соколов, В.М. Чапаев, А.А. Тимохин, А.Ф. Ульянычев, М.И. Руденко.

Несмотря на трудные послевоенные годы, большое внимание уделялось укреплению здоровья, физической закалке будущих организаторов производства, воспитателей рабочей смены. Учащихся одевали, обували, кормили. Управление трудовых резервов, руководители техникума обеспечивали бесперебойное снабжение продуктами питания столовой, располагавшейся в двухэтажном здании, где сегодня размещается музей Ю.А. Гагарина. СИТовцы занимались в коллективах Дома культуры профтехобразования, в спортивных секциях на стадионе «Динамо». Вскоре техникум стал одним из ведущих в стране.



## 60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина

---

Летом 1951 года по направлению Московского управления трудовых резервов приехал в Саратов учиться выпускник Люберецкого РУ № 10, литейщик-формовщик 5 разряда Юрий Гагарин.

«Техникум был для меня и для всех комсомольцев не только школой знаний, но и замечательной школой жизни», – напишет потом он в своей книге «Дорога в космос». Здесь неукоснительно соблюдалась традиция выпускать специалистов, способных решать актуальные задачи дальнейшего индустриального развития страны, внедрения в жизнь достижений научно-технического прогресса. В учебных цехах-мастерских выпускались вертикально-сверлильные станки, другое оборудование. Практику учащиеся проходили на лучших предприятиях Саратова, Москвы и Ленинграда.



Студенческие отряды техникума, весь коллектив нередко становились инициаторами общественно-полезных патриотических начинаний. «Превратим Саратов в город высокой культуры и образцового порядка» – за этим стояли обустройство набережной, озеленение Соколовой горы, участие в строительстве ТЭЦ-2, овощных баз и уборке урожая, шефство над трудными подростками, первые студенческие строительные отряды на Балаковском комбинате химволокна и на родине первого космонавта в г. Гагарине.

Не только Ю.А. Гагариным гордится учебное заведение. Тысячи высококвалифицированных специалистов трудились и продолжают работать во всех республиках бывшего Советского Союза. Среди них: начальник конструкторского отдела, автор многих изобретений в области космической техники А.Г. Юрлов, академик Российской академии качества, директор Саратовского Центра стандартизации и метрологии И.В. Якунин, заслуженный машиностроитель РФ, генеральный директор ОАО «Белагромаш-Сервис» В.М. Рязанов. Еже-

годно на встречи выпускников приезжают однокурсники Ю.А. Гагарина: профессор, доктор наук, заведующий кафедрой истории МАИ В.С. Порохня и отличник профтехобразования СССР Т.А. Чугунов, профессор, доктор технических наук, бывший литейщик А.Е. Полозов. Выпускниками техникума являются прославленные мастера спорта И.И. Новиков, В. Максютя, Г.Я. Ефимов. Бывший литейщик Н.Л. Курьяков стал заслуженным работником культуры, а техник-технолог В.И. Мироненко – заслуженным артистом РСФСР, директором Саратовского театра оперетты. Целые инженерно-педагогические коллективы профтехучилищ в Волгограде, Воронеже, Ростове, в Прибалтике и на Северном Кавказе, Сибири комплектовались из выпускников Саратовского техникума, среди которых более 30 заслуженных учителей, отличников профтехобразования.

Сегодня в колледже учатся более 4500 студентов, в составе инженерно-педагогического коллектива – 23 почетных работника профтехобразования, 2 заслуженных учителя и 25 кандидатов наук.

В гагаринское время директором техникума был замечательный организатор и воспитатель С.И. Родионов, проработавший на этом посту почти 20 лет. Его сменил В.П. Ерофеевский, участник Великой Отечественной войны, много внимания уделявший работе студенческих общественных организаций, при нем было построено девятиэтажное общежитие и еще один корпус. Директорами техникума были заслуженный учитель РФ, воспитанник системы трудовых резервов, выпускник СИПТ Ю.В. Тимофеев, А.М. Малахов. Более 20 лет руководил учебным заведением заслуженный учитель РФ, кандидат педагогических наук, председатель Совета директоров ссузов В.А. Зайцев. За это время введен в эксплуатацию новый корпус, отремонтированы старые корпуса, кабинеты оснащены современным оборудованием.

В рамках реализации концепции модернизации российского образования стрелом организации теоретической и практической подготовки выпускников стала инновационная образовательная программа «Интеграция образования и производства как условие обеспечения качества подготовки специалиста с учетом требований рынка». Студенческое конструкторское бюро активно сотрудничает с подразделениями ОАО «СЭЗ имени С. Орджоникидзе», ПАО Ростелеком, АО «Завод металлоконструкций», АО «Второе Саратовское предприятие “Трест № 7”», ООО «Газпром трансгаз Саратов», АО «Нефтемаш-САПКОН», ГБУ СО «СШОР по гребле на байдарках и каноэ», ГБУСО «Спортивная школа олимпийского резерва “Надежда Губернии”».

Много лет колледж одерживает победы в областных, городских соревнованиях по футболу, баскетболу, боксу, легкой атлетике, занимает первое общекомандное место среди ссузов области. Продолжая традиции Саратовского индустриального техникума, студенты с гордостью называют себя индустриками – гагаринцами.

## ***ПЕРВЫЙ, НАРОДНЫЙ***

Народный музей Ю.А. Гагарина при Саратовском профессионально-педагогическом колледже был открыт 5 января 1965 года и стал своеобразным подарком для первого космонавта планеты. Вместе с женой Валентиной Ивановной приезжал тогда Юрий Алексеевич на празднование 20-летия индустриального техникума, в котором он учился в 1951-1955 годах на мастера производственного обучения по литейному делу.

## 60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина

Вначале это был небольшой кабинет немецкого языка, в нем стали проводить встречи и беседы о Гагарине – воспитаннике системы Трудовых резервов, о первых полетах пилотируемых космических кораблей. Со всех концов планеты шли письма с просьбой рассказать, каким был человек, имя которого 12 апреля 1961 года узнал весь мир...

Сегодня музей располагается в двухэтажном здании бывшей столовой индустриального техникума, и все посетители (по 8-10 тысяч в год) поднимаются по лестнице, по которой Юрий Гагарин пробежал 4 года на завтрак, обед и ужин.



В экспозиции музея представлены уникальные экспонаты: написанные рукой Гагарина заявление на имя директора с просьбой зачислить в техникум, автобиография, учетная карточка и экзаменационный лист, отзыв на дипломную работу, характеристика выпускника – отличника учебы и активного комсомольца, отчет о соревнованиях по баскетболу главного судьи, письма Ю.А. Гагарина. В фондах музея хранятся более 10 тысяч фотографий, документов, видео и аудиокассет, дисков, альбомов, рукописных воспоминаний, книг, журналов, картин, макетов и моделей.

Главная экспозиция «От литейщика – до космонавта. Жизнь и подвиг Ю.А. Гагарина» рассказывает о Юрии Алексеевиче – учащемся техникума, курсанте Саратовского аэроклуба, о приезде в Саратов не только самого первого космонавта, но и его матери Анны Тимофеевны вместе с другими членами семьи Гагариных.

За годы существования музей посетили более 375 тысяч саратовцев и гостей города, в том числе из ближнего и дальнего зарубежья (из Казахстана и Прибалтики, Средней Азии и Белоруссии, Франции, Канады, США, Израиля, Японии, Индии, Германии и других стран).

В музее и колледже побывали герои-космонавты: Г.С. Титов, В.В. Горбатко, П.Р. Попович, А.А. Леонов, В.В. Ковалёнок, В.Д. Зудов, Г.М. Стрекалов, С.В. Авдеев, В.П. Савиных, Г.В. Сарафанов, Ю.Г. Шаргин и другие. В 1981 году музей принимал мать Ю.А. Гагарина А.Т. Гагарину вместе с сестрой З.А. Бруевич, братом В.А. Гагариным и т. д. Филатовой – заведующей мемориальным отделом музея в г. Гагарине.



Друзьями музея и колледжа стали ветераны Байконура и других космодромов страны, бывшие инструкторы и курсанты Саратовского аэроклуба; как домой, приходят в музей выпускники и прежде всего те, кто вместе с Ю.А. Гагариным учился в техникуме и аэроклубе. Большой интерес вызывают встречи с ветеранами Великой Отечественной войны, замечательными деятелями науки, организаторами производства, композиторами и артистами, выставки работ саратовских художников. На материалах музея преподаватели колледжа проводят занятия и внеклассные мероприятия. Работники музея и студенты побывали на родине Юрия Гагарина, в Звездном городке, на космодроме Байконур, в Киржаче, участвуют в гагаринских чтениях.

Поздравляя музей с юбилеем, Президент Ассоциации музеев космонавтики России, летчик-космонавт, дважды Герой Советского Союза П.Р. Попович 5 января 2005 года писал: «Открытый сорок лет назад, Ваш музей стал первым музеем в стране, посвященным Ю.А. Гагарину. Экспозиция музея раскрывает величие и простоту первого космонавта Вселенной, влияние на формирование его личности Саратовской земли, показывает его разносторонне одаренным человеком». С 6 мая 1999 года Народный музей Ю.А. Гагарина – член АМКОС.

За активную работу по патриотическому воспитанию молодежи общественному музею Ю.А. Гагарина при Саратовском индустриально-педагогическом техникуме в 1985 году Министерством культуры РСФСР было присвоено почетное звание «Народный музей».

И сегодня музей Ю.А. Гагарина – это не только память о первом космонавте, но и плод коллективных размышлений о замечательном патриоте, о судьбах отечественной космонавтики, о людях великой страны.

### ***ГАГАРИН ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ***



Он родился 9 марта 1934 года в деревне Клушино Гжатского района Смоленской области, а Саратов всегда был для него второй родиной, и саратовцы тоже считали и считают первого космонавта своим.

Семилетним мальчиком оказался Юрий вместе с отцом и матерью, сестрой и братьями в оккупации, которая длилась с октября 1941 по март 1943. Голод, холод, в любой момент могло не стать всей семьи. В школе учился отлично, но только до 6-го класса; чтобы помочь семье и быстрее получить рабочую профессию, поступил в Люберецкое ремесленное училище при заводе сельскохозяйственных машин. И учился, и работал, и свидетельство за 7-й класс получил в вечерней школе рабочей молодежи.

Литейщика пятого разряда, примерного комсомольца, хорошего спортсмена направили

## 60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина

в Саратовский индустриальный техникум, чтобы вырастить из него уже мастера производственного обучения по литейному делу. На встречах в музее те, кто знал Гагарина по техникуму и аэроклубу, всегда подчеркивают, каким трудолюбивым и выносливым был этот литейщик.

Это трудолюбие – прежде всего из семьи, где мать – доярка, отец – «мастер на все руки, и плотник, и каменщик, и пахарь, и столяр», где все трудились от зари и до зари. Старший брат Валентин писал, что, когда Юрий погиб, отец переживал, что, может, не додал ласки своим детям. А они всегда благодарны были Алексею Ивановичу, что научил не бояться никакого труда.

В письме-завещании перед рискованным первым полетом Юрий Алексеевич писал своей 26-летней жене, у которой на руках были две дочери – двух лет и 37 дней от роду: «Если что-то случится... Береги, пожалуйста, наших девочек, люби их, как люблю их я. Вырасти из них, пожалуйста, не белоручек, не маменьких дочек, а настоящих людей, которым ухабы жизни были бы не страшны...».

Особая душевная близость была у Юрия с матерью Анной Тимофеевной. Даже в кабине корабля ему казалось, что мама над ним склонилась. В 1981 году приезжали члены семьи Гагариных в Саратов, и Анна Тимофеевна рассказывала в техникуме, как переживала, когда проводила Юру далеко от дома, в Саратов. А он как будто чувствовал это и писал ей письма каждую неделю: про старинный город, широкую Волгу, Липки зеленые. Она понимала своим материнским сердцем, что дело не только в старинном городе, а в том, что в техникуме у него все складывалось неплохо.

Он не только лицом был похож на Анну Тимофеевну, как сегодня похожи на него дочери, но и мягкостью, дружелюбием, способностью шуткой погасить ссору в комнате студенческого общежития, где жили 15 человек.

Вот мы и пытаемся в музее рассказать, «каким был этот человек на подступах к своему подвигу» (М.Н. Алексеев).

Влияла обстановка требовательности и профессионализма на уроках. Из 32 сданных в техникуме экзаменов Гагарин получил лишь одну «4», остальные – «отлично»! А еще более 10 предметных кружков и секций, доклады в физико-техническом кружке о Лебедеве и Циолковском, капитан баскетбольной команды, занятия в хоре и духовом оркестре... Судить соревнования по баскетболу капитан команды СИТ ездил в Аткарск, зерно на току грузили в Екатериновском районе, деревья сажали на Соколовой горе и Набережной, которая теперь называется в честь Гагарина и Титова Набережной Космонавтов.

Какой нужен интерес к жизни, какая организованность и трудолюбие, способность побороться за свою мечту, чтобы в 1955 году с отличием закончить индустриальный техникум и одновременно аэроклуб ДОСААФ, открывший дорогу в военное летное училище в Оренбурге. Он стал летчиком-истребителем, поехал служить в Северную морскую авиацию. Наверное, не только потому, что в тех условиях быстрее станешь настоящим летчиком, но на Севере и платили побольше. А для Юрия Алексеевича это было важно, туда к нему приехала молодая жена, там родилась первая дочка. И старался всегда помочь родителям.

Член бюро летного подразделения, Юрий организовывал комсомольские субботники на строительстве дома для молодых семей. На севере его приняли в партию.

Именно из летчиков-истребителей, летавших в экстремальных условиях, и набирали потом кандидатов в первый отряд космонавтов. Он сразу же написал рапорт, и началась подготовка. Кто знал в полном объеме, с чем встретится в космосе первый человек, какой запас прочности по здоровью и духу понадобится ему?

Поэтому тренировки, испытания подчас проводились на грани человеческих возможностей. Помогала физическая закалка и сила воли, характер, воспитанные всей жизнью, замечательными наставниками.

В Саратовском аэроклубе – Герои Советского Союза летчики С.И. Сафронов, Г.К. Денисенко, инструктор Д.П. Мартьянов, в техникуме – Дзякович А.Н., Соколов Г.Г., Москвин Н.И., Паршкова М.Я., Акулова А.П., Рузанова Н.В., Карпов Н.Ф.

На 327 километров в неизведанное, преодолев земное притяжение, ушел в космос корабль «Восток» с человеком на борту. Гагарин выполнил задание своей Родины. И приземлился на саратовскую землю.



После полета Юрий Алексеевич, объездивший полсвета, депутат Верховного Совета СССР от Смоленской области, член ЦК ВЛКСМ, Почетный гражданин многих городов мира, Президент общества советско-кубинской дружбы, награжденный высшими наградами различных государств, не позволил сделать из себя звезду. Как во время полета, так и на земной орбите он вкладывал всю душу в задачу освоения космоса, обеспечения обороноспособности страны, разъяснения ее мирной внешней политики. Ю.А. Гагарин помогал готовиться к новым полетам своим товарищам. И вновь – учился, теперь уже в военно-инженерной академии имени Н.С. Жуковского. И сам готовился к полету по лунной программе.

## **60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина**

---

Работают в Москве дочери Елена и Галина, закончили Московский университет внучка Юрия Алексеевича Екатерина и внук Юрий. Есть кратер на обратной стороне Луны, малая планета № 1772, носящие имя Юрия Гагарина, города, учебные заведения, в том числе и наш колледж, улицы и площади, не только в России... Но главное – память в сердцах людей о первом космонавте.

Если мы сумеем эту благодарную память передать детям и внукам – будут вечными такие понятия, как долг перед близкими и Родиной, рабочая гордость и офицерская честь. Он никогда не уставал повторять, что по-настоящему счастливым человек может быть только вместе со своей страной. И еще: «Облетев Землю в корабле-спутнике, я увидел, как прекрасна наша планета. Люди, будем хранить и приумножать эту красоту, а не разрушать ее».

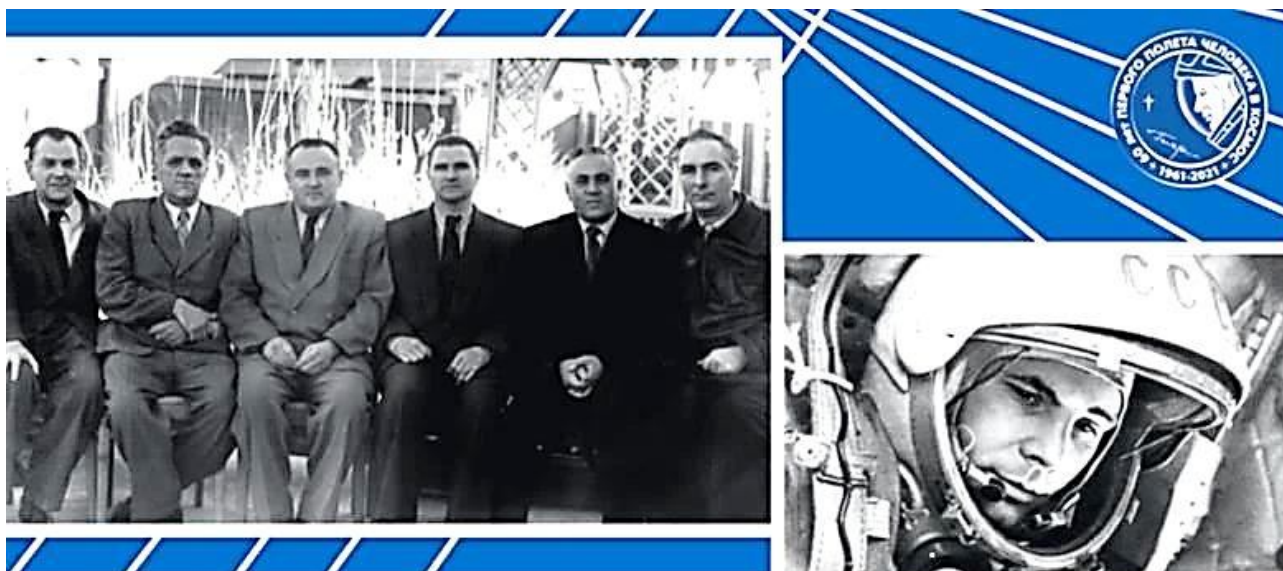
## **П.К. Плотников**

доктор технических наук, профессор кафедры «Приборостроение» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

### **К 60-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ПОЛЕТА Ю.А. ГАГАРИНА В КОСМОС**

Это эпохальное событие отмечала вся наша страна, а затем и весь мир! С восторгом восприняли сообщение Ю. Левитана вначале о запуске, а потом – об успешном приземлении «в точно назначенном месте в точно назначенное время» Ю.А. Гагарина и в нашем, тогда политехническом институте. День был теплый и солнечный, и толпы студентов и преподавателей вышли на улицу, с улыбками обсуждая это событие и устремляя взгляды в небо!

Главная роль в становлении отечественного ракетостроения принадлежит Совету главных конструкторов, созданному по инициативе Сергея Павловича Королёва. Кроме Королёва, в состав совета «первого созыва» вошли: главный конструктор жидкостных ракетных двигателей Валентин Петрович Глушко, главный конструктор стартового, транспортного и заправочного оборудования Владимир Павлович Бармин, главный конструктор автономных систем управления Николай Алексеевич Пилюгин, главный конструктор систем радионавигации и радиоуправления Михаил Сергеевич Рязанский, главный конструктор гироскопических командных приборов Виктор Иванович Кузнецов.



Важную роль сыграли в техническом обеспечении первого полета в космос также саратовские предприятия: ПО «Корпус», Конструкторское бюро промышленной автоматики и другие. От руководителя КБПА (60-е годы XX столетия) П.Д. Митяшина узнали, что они поставили на корабль «Восток» несколько гироскопических приборов, обеспечивших устойчивость полета корабля на старте. Думаю, что ряд других предприятий г. Саратова и области тоже внесли свой вклад в полет Ю.А. Гагарина.

## 60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина

Мы, первые выпускники специальности «Гироскопические приборы и устройства» приборостроительного факультета, проходили преддипломную практику и выполняли дипломные проекты на ПО «Корпус» с 1 июня по 31 декабря 1961 г. У всех нас были актуальные, интересные темы дипломных проектов. В июне на предприятии прошел многочисленный митинг – объявили о награждении орденом В.И. Ленина организации, а кроме того, ее директора Б.В. Бальмонта – за большой вклад в обеспечение полета Ю.А. Гагарина. Мы догадывались, за какой именно вклад, но, конечно, конкретно не знали. Частично об этом узнали из газеты «Комсомольская правда» через 45 лет. Ниже приводится интереснейший фрагмент из этой газеты.



Особое место на стендах музея занимают приборы космического назначения, в разное время произведенные на этом предприятии. С саратовской земли уникальные разработки «ушли» на Марс, Венеру, Луну — туда, куда посылала свою космическую технику наша страна. Наглядно видно движение технического прогресса: если сорок лет назад комплект приборов на систему «Протон» представлял собой внушительный «чемодан» весом в добрые полста килограммов, то уже четверть века спустя он уменьшился раза в четыре. Сегодня же это — сплошная микроэлектроника, которая умещается на ладони руки и выглядит, как произведение ювелирного искусства.

Полет пилотируемого корабля «Восток» 12 апреля 1961 года — это триумф не только всей советской космонавтики в целом, но и саратовского «хрущевского» завода. Можно сказать, что именно благодаря его приборам первый космонавт планеты приземлился на саратовской земле! Дело в

том, что первоначально местом посадки должен был стать Капустин Яр в Волгоградской области. Но во время полета в «час икс» с земли на борт корабля не прошел сигнал, запускающий команду системам на отделение спускаемого аппарата. С замиранием сердца следили за ситуацией в Центре управления полетами — ведь под угрозой не только посадка космического корабля, но и жизнь Юрия Гагарина. И только через десять минут произошло отделение капсулы с космонавтом — благодаря дублирующему устройству, которое находилось на борту «Востока». Прибор этот был разработан и произведен на «Корпусе». За спасение жизни космонавта и обеспечение первого полета человека в космос заводу был вручен орден Ленина. А в музее теперь можно увидеть макет первого пилотируемого космического корабля и даже разглядеть в его иллюминатор знакомую всему миру улыбку первого советского космонавта.

**Создание и совершенствование ракеты – носителя корабля «Восток»,  
а также систем и приборов управления. Запуск «Востока» с Ю.А. Гагариным.**

(Материал из газеты «Луч» № 2 (92), 2021 г.

Газета филиала ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус»)

Напомню, что полет Ю.А. Гагарина открыл дорогу другим космонавтам. Вторым космонавтом был Герман Степанович Титов (1961 г., август), третьим – американский астронавт Джон Гленн (1962 г.). Первой женщиной-космонавтом является Валентина Владимировна Терешкова (1963 г.).

Масштабные работы, развернувшиеся в стране, скоро дали первые результаты. На вооружение поступила баллистическая ракета Р-1; в 1949 году начались регулярные пуски геофизических ракет для исследования верхних слоев земной атмосферы; в 1951 году стартовали медико-биологические исследования на животных, совершавших полеты на ракетах на высоты более 100 километров; в 1955 году появилась боевая ракета Р-5М, способная нести ядерную боеголовку; в 1956 году была испытана первая ракета, стартовавшая с борта подводной лодки, – Р-11РФ.

#### *Р-7 открывает дорогу в космос*

Советские конструкторы продолжали внедрять прогрессивные технические решения в разработку ракетно-космической техники. Важным шагом стало создание надежной автономной системы управления (СУ) для ракет повышенной дальности. Этот процесс возглавил Николай Алексеевич Пилюгин – главный конструктор НИИ-885 и начальник отдела автономных систем управления.

Разработка системы управления для ракеты Р-7 – первой двухступенчатой межконтинентальной баллистической ракеты в мире – вывела отечественную ракетную технику на мировой уровень.

«Р-7 – первая в мире межконтинентальная ракета с необычной конструкцией. Под стать ей и уникальные составляющие – система управления, двигатели, наземное пусковое оборудование. Получился ракетный комплекс с невероятным потенциалом живучести и способности к модернизации. Само открытие космической эры и все первые шаги в космосе сделаны благодаря Р-7», – писал в своих воспоминаниях один из разработчиков Р-7, впоследствии – заместитель главного конструктора НИИ АП Георгий Моисеевич Присс.

Перед коллективом Н.А. Пилюгина стояло множество сложных задач по разработке СУ для ракеты Р-7. Николай Алексеевич предложил ряд новаторских решений. Точность полета ракеты во многом определялась возможностями системы управления. В состав автономной СУ входили автомат угловой стабилизации, система нормальной стабилизации, система боковой стабилизации, система регулирования кажущейся скорости, система одновременного опорожнения баков и синхронизации уровней компонентов и автомат управления дальностью.

Чувствительными элементами автомата угловой стабилизации были гироскопические приборы: гироскопизонт и гироскопикант, системы нормальной и боковой стабилизации и автомата управления дальностью (одноступенные физические маятники), системы регулирования кажущейся скорости (электролитические интеграторы продольных ускорений).

Работа над «семеркой» осложнялась большим количеством регулируемых параметров и источников возмущений. Пилюгину и другим главным конструкторам пришлось решать множество самых разных проблем: упругость, жидкое наполнение, воздействие систем, регулирование скорости РКС, не только управление стабилизацией вокруг центра масс, обеспечивающей устойчивое движение ракет, но и управление движением самого центра масс. Даже простое перечисление заставляет восхищаться талантом и чутьем Пилюгина», – вспоминал член Совета главных конструкторов Виктор Иванович Кузнецов.



## **60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина**

---

Первый успешный запуск Р-7 состоялся 21 августа 1957 года. А 4 октября того же года «семерка» обеспечила вывод на орбиту первого искусственного спутника Земли. Сразу после этого отдел Н.А. Пилюгина занялся подготовкой к выводу на околоземную орбиту корабля с человеком на борту. Больше ничто не препятствовало прорыву человека в космос!

За вклад в разработку Р-7 и запуск первых искусственных спутников Земли Н.А. Пилюгин вместе с другими конструкторами стал лауреатом Ленинской премии.

### **ПОДГОТОВКА ПЕРВОГО ПИЛОТИРУЕМОГО ПОЛЕТА В КОСМОС**

В конце 1959 года в СССР началась активная подготовка к первому пилотируемому полету. Конструкторы определили общую схему космического корабля для полета космонавта. В документации он получил обозначение «Восток-3КА». Корабль должен был состоять из двух отсеков: спускаемого аппарата для возвращения космонавта на Землю и приборно-агрегатного, где размещались служебные системы корабля и тормозная двигательная установка.

Систему управления РН «Восток» также разрабатывали в НИИ-885 под руководством Николая Алексеевича Пилюгина. Она создавалась на базе Р-7. По командам СУ осуществлялась стабилизация 3-й ступени РН «Восток» с помощью сопел, работающих на отработанном газе после турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя. За выключение двигателя 3-й ступени и подачу команды на отделение корабля отвечала система радиоуправления, это происходило при достижении расчетной скорости, соответствующей выведению корабля на заданную орбиту.

Из воспоминаний старшего научного сотрудника ФГУП «НПЦАП имени академика Н.А. Пилюгина» Льва Николаевича Коврижкина, принимавшего участие в пуске КА «Восток-1»: «И вот наступил день, известный теперь всему миру, – 12 апреля 1961 года. В пульту стартового бункера собрались все испытатели. <...> Мое место было за пультом тренировки электролитических интеграторов. За 15 минут до пуска в пульту вошли Королёв и Пилюгин. Начался процесс пуска, описанный во многих книгах. После старта ракеты все бросились к выходу...».

### **МЫ СТАЛИ ПЕРВЫМИ В КОСМОСЕ**

Одновременно с разработкой аппарата и ракеты велась подготовка пилотов космического корабля. В начале 1960-го после строгого отбора 20 летчиков образовали первый отряд советских космонавтов. Кандидатов выбирал сам С.П. Королёв: возраст не должен был превышать 30 лет, вес – 72 кг, а рост – 170 см. Только при таких характеристиках космонавт мог поместиться в первом космическом корабле «Восток». Молодой военный пилот Юрий Алексеевич Гагарин подошел идеально.

12 апреля 1961 года в 9 часов 07 минут после команды Королёва «Подъем!» ракета-носитель «Восток» оторвалась от стартового стола космодрома Байконур. Через мгновение прозвучало знаменитое гагаринское «Поехали!». Полет Юрия Алексеевича Гагарина вокруг Земли длился 108 минут. Космонавт приземлился в Саратовской области.

Новая эра пилотируемой космонавтики началась! С тех пор 12 апреля в России отмечают День космонавтики, а в мире – Международный день полета человека в космос.



## **В.Б. Байбурин**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

### **ВКЛАД УЧЕНЫХ СГТУ В РАЗВИТИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ, ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И ЭЛЕКТРОНИКИ**

Вклад ученых СГТУ в аэрокосмическую технику и технологию достаточно весом и значим. Он состоит из двух равноценных составляющих:

1. Подготовка инженерных и научных кадров для соответствующих отраслей промышленности, включая проектные организации и НИИ РАН.
2. Проведение научных исследований и разработок с последующим внедрением их результатов в промышленность.

Начиная с 1930 г. – года основания, наш вуз – тогда автодорожный институт, активно подключился к решению задач народного хозяйства и, в первую очередь, оборонных задач. В предвоенные и военные годы это были работы по переводу транспорта на твердое топливо, тестированию военной наземной техники, созданию ремонтных баз. Руководили работами директор института Прокофьев И.И., проф. Милашечкин А.А., проф. Бутовский Г.К., проф. Бойницкий В.Л.

После войны началась эра космической техники, ракетной военной и гражданской авиации, электронных систем управления, многофункциональных радаров, систем противоракетной обороны, которая продолжается и сегодня.

На этот вызов времени Саратовский политехнический институт, ректором которого был профессор Андрющенко А.И., ответил созданием новых специальностей, кафедр и факультетов: в частности, энергетического, электронной техники и приборостроения. Возникли кафедры: гироскопических устройств, автоматики и телемеханики, электронных приборов СВЧ, автоматизированных систем управления и многие другие. Это позволило проводить исследования в актуальных и перспективных направлениях, в том числе в интересах обороны страны и аэрокосмической техники.

Исследования специальных, в том числе космических, конструкций, их поведение в различных средах проводились под руководством проф. Петрова В.В., проф. Рассудова В.М.

Важные результаты по созданию систем ориентации, навигации и управления космическими и летательными аппаратами были получены под руководством ученых:

- проф. Александров А.Г. – разработка гироинтегратора повышенной точности с демпфирующим усилителем;
- проф. Андрейченко К.П. – разработка гироскопов с гидродинамическим подвесом;
- проф. Петров С.В. – разработка беспилотных летательных аппаратов, ракет-мишеней и механизмов управления летательных аппаратов (ЛА);
- проф. Плотников П.К. – разработка гироприбора для демпфирования колебаний ИСЗ;

## 60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина

- проф. Подчукаев В.А. – разработка аналитической теории автоматического управления;
  - доцент Саюров В.Д. – зам. главного конструктора по подавлению демпфирующих колебаний космического корабля «Восток»;
  - проф. Алёшкин В.В. – разработка алгоритмического способа компенсации погрешностей инерциальных измерителей модулей космических аппаратов;
  - проф. Садомцев Ю.В., проф. Челноков Ю.Н., проф. Калихман Д.М. – разработка математического и программного обеспечения управления движением космического платформенного комплекса для картографирования планеты «Марс», разработка систем цифровой стабилизации движения прецизионных оснований с чувствительными датчиками;
  - доцент Протасов Б.В. – организация совместных исследований с предприятиями авиационного профиля;
  - проф., член-корреспондент РАН Резчиков А.Ф. – исследование критических ситуаций в авиакосмических летательных аппаратах с учетом состояния операторов, создатель научной школы по управлению сложными системами;
  - проф. Дрогайцев В.С. – разработка систем управления агрегатами летательных аппаратов с элементами интеллектуального управления;
  - проф. Куранов В.Г. – совершенствование слаботочных скользящих контактов для приборов летательных аппаратов;
  - проф. Львов А.А. – разработка алгоритмов доплеровского радиолокатора для ракет, разработка интеллектуальных датчиков давления для авиакосмической промышленности;
  - доцент Никифоров А.А. – освоение серийного производства пилотажных комплексов для вертолетов нового поколения;
  - проф. Глазков В.П. – разработка антиобледенительной системы ЛА;
  - проф. Советов Н.М., проф. Казаков Г.П., проф. Сивяков Б.К. – разработка математических моделей и расчётных программ для ЛБВ СВЧ-диапазона;
  - проф. Фурсаев М.А. – разработка мощных усилительных цепочек для ФАР;
  - проф. Царёв В.А. – разработка однолучевых и многолучевых клистронов;
  - проф. Захаров А.А. – разработка магнитных фокусирующих систем для ЛБВ;
  - проф. Кац А.М., проф. Клинаев Ю.В. – разработка САПР усилителей СВЧ-диапазона;
  - проф. Байбурин В.Б., проф. Ширшин С.И., проф. Терентьев А.А. – разработка математических моделей и расчетных программ проектирования генераторов и усилителей магнетронного типа;
  - проф. Артюхов И.И. – создание источников питания для магнетронных генераторов и усилителей;
  - проф. Каримов Р.Н. – разработка рабочих алгоритмов управления летательными аппаратами на основе корреляционного анализа;
  - проф. Мещанов В.П., проф. Комаров В.В. – устройства фильтрации, согласования, мультиплексирования СВЧ-сигналов для бортовой аппаратуры;
  - проф. Королёв А.В. – разработка высоконадежных подшипников различных типов;
  - проф. Томашевский Ю.Б. – создание систем питания для космической аппаратуры.
- Новаторские разработки по созданию электронной аппаратуры для военной авиации 5-го поколения велись под руководством проф. Семёнова Э.А.

Разработка конструктивно-технологической базы спецприборов нового поколения была выполнена под руководством проф. Чеботаревского Ю.В.

Исследования по обнаружению скрытых летательных аппаратов выполнялись профессорами Альтшулером Ю.Г., Сосуновым В.А. Новые СВЧ-устройства специального назначения создавались профессорами Архангельским Ю.С., Коломейцевым В.А. Акустооптические устройства проектировались под руководством проф. Зюрюкина Ю.А.

Новые технологические процессы вакуумного производства создавались под руководством профессора Конюшкова Г.В.

Твердотельные преобразователи энергии для спецприборов проектировались профессором Михайловой А.М.

Под руководством проф. Мельниковой И.П. создаются эмиссионные составы и катодные системы для ЭВП, применяемые в космической области.

По инициативе руководства СГТУ имени Гагарина Ю.А. при участии военной кафедры в честь вклада ученых СГТУ в авиакосмический потенциал страны впервые в Саратове на территории университета в торжественной обстановке в 2010 году был открыт военно-архитектурный мемориальный комплекс.

В настоящее время университет поддерживает тесные научно-производственные отношения с ведущими предприятиями региона: АО «НПП "Контакт"», АО НПП «Алмаз», АО НПЦ «Алмаз-Фазотрон», ФГУП ПО «Корпус», ЭПО «Сигнал», ОАО «СЭПО», ПАО «СЭЗ им. С. Орджоникидзе», АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» и др.

В коллективах этих предприятий выпускники технического университета занимают ключевые инженерные и руководящие посты.

Таким образом, СГТУ оставляет за собой лидирующие позиции по вкладу в аэрокосмическую отрасль на территории Саратовской области.

**А.А. Никифоров**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение»  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

## **ЗНАЧИМЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЗВИТИИ АВИАЦИОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

История развития приборостроения для авиационной промышленности на саратовской земле берет свое начало с 1941 года после начала Великой Отечественной войны. Московский завод «Авиаприбор» несколькими эшелонами был переброшен в Заволжье в город Энгельс (территория завода «Сигнал»).

Составы с оборудованием и специалистами прибыли 13 июля 1941 г. В кратчайшие сроки размещено и запущено прибывшее оборудование. Первые приборы были изготовлены и поставлены в декабре 1941 г. В номенклатуре выпуска эвакуированного завода были автопилоты, авиагоризонты, высотомеры, указатели скорости, вариометры, мановакуумметры, аэротермометры, манометры, трехстрелочные индикаторы, компасы и тахометры.

На заводе работали талантливые специалисты и ученые. В частности, Лев Иванович Ткачёв, тогда – инженер развернутого в Энгельсе завода, а в дальнейшем, в Московском энергетическом институте, – доктор технических наук, профессор, автор многих научных трудов. В 1972 г. на базе кафедры гиросприборов Саратовского политехнического института по его инициативе проходила научно-техническая конференция под эгидой тридцатилетия решения задачи инерциальной навигации. Выступая с докладом, проф. Л.И. Ткачёв и рассказал о таком событии из жизни его и завода: «...Вечером, осенью 1942 г., немецкие самолеты совершили очередной налет на железнодорожный мост Саратов – Энгельс. Я вышел посмотреть на этот налет. Один из самолетов был взят в перекрестье наших прожекторов. В итоге – был сбит! Это меня так потрясло! Я зашел в комнату и на листах своей научной работы впервые в мире написал уравнения инерциальной навигации, свободной от методических погрешностей...». Данную теорию признали в Европе и Соединенных Штатах Америки только в 1970-е годы. Указанные выше уравнения были опубликованы в академическом журнале «Прикладная математика и механика» в 1949 г., а также в книге [5].

3 декабря 1945 г. приказом Министерства завод, находившийся в Энгельсе, был перенесен на промышленную площадку завода № 167 в г. Саратов.

24 февраля 1947 г. приказом Министерства авиационной промышленности № 69 на саратовской площадке было образовано опытно-конструкторское бюро ОКБ-4 (в дальнейшем было преобразовано в «Конструкторское бюро промышленной автоматики»). Основным направлением работ ОКБ была определена разработка малогабаритных приборов манометрического типа и навигационно-штурманской автоматики.

В августе 1951 произошло окончательное разделение Энгельсского завода «Сигнал» и Саратовского электроприборостроительного завода имени Серго Орджоникидзе (СЭЗ).

Часть завода, выпускавшая мембранные приборы, осталась в Энгельсе – это положило начало Энгельсскому приборостроительному заводу «Сигнал». Сегодня потребителями продукции приборного направления Энгельсского приборостроительного объединения «Сигнал» являются все без исключения авиационные производственные объединения России и стран СНГ. Высокое качество и точность производимых элементов позволили выйти на уровень космических технологий с самого начала освоения данной отрасли.

СЭЗ с 1951 г. начинает осваивать выпуск первых автопилотов АП-45 для самолетов Ил-12, Ил-14, Ли-2. В период с 1951 по 1962 в ОКБ был разработан ряд навигационных гироскопических приборов ЭУП-53, ДА-200, ДУСА, ДУСБ и др., которые были успешно освоены СЭЗ и серийно изготавливаются и сегодня [1].

Министерством авиационной промышленности СССР в середине шестидесятых годов XX века СЭЗ совместно с конструкторским бюро была поставлена задача по разработке и серийному освоению гироскопических датчиков угловых скоростей для стратегических ракет. Благодаря этому созданные приборы нашли применение на многих типах ракет в качестве телеметрических датчиков угловых скоростей. ДУС-Б-2Б, БДГ-6 и другие приборы многие годы входили в комплектацию различных ракет.

Разработанные ОКБ манометрические датчики были впервые применены в системах управления ракет, обеспечивших запуск первого искусственного спутника Земли. СЭЗ в это время освоил выпуск приводов для ракетоносителей – привод рулевых сопел (ПРС) и регулятор кажущейся скорости (РКС) как для беспилотной, так и для пилотируемой космической техники. Саратовские ПРС и РКС применялись при запуске «Востоков» и «Союзов». Их производили на СЭЗе до начала 1990-х годов, то есть почти четверть века заводчане участвовали в освоении космоса.

В 1960-х годах П.Д. Митяшин, талантливый руководитель ОКБ, гордился, что поплавковые гиротактометры с электрической пружиной, изготовленные в объединении, были успешно применены на космическом корабле «Восток» Ю.А. Гагарина (Главный конструктор – академик С.П. Королёв) для демпфирования колебаний на старте.

Шестидесятые и семидесятые годы СЭЗ и ОКБ разрабатывают и успешно осваивают автопилоты АП-122 для самолета-мишени Ла-17, автопилот для самолета МиГ-21 и МиГ-23. В это время на базе ОКБ создается филиал кафедры автоматики и телемеханики Саратовского политехнического института (СПИ). Руководителем филиала кафедры назначается лауреат Государственной премии СССР, почетный авиастроитель Д.В. Саюров. С этого времени начинается тесное сотрудничество политехнического института с ОКБ и СЭЗ. Кафедра гироскопических приборов по заявкам д.т.н. проф. Петрова, нач. ОКБ Н.И. Чернышкина и к.т.н. В.Д. Саюрова в течение более чем 20 лет выполняли ряд важных, внедренных на предприятии разработок по САУ летательных аппаратов, по комплексу НПК-300 и другим приборам и системам.

В частности, кафедра гироскопических приборов проводила НИР по повышению ресурса работы приборов ЭУП-53, точности авиационного прецизионного автомата курса ПАК-5 и др. Руководителем СЭЗ являлся Е.М. Смирнов, от кафедры гироскопических приборов работали Б.В. Протасов, П.К. Плотников, Г.М. Проскураков, А.В. Фузеев и др.

## 60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина

В 1970-1980 гг. были созданы: навигационно-пилотажный комплекс НПК-300 беспилотного тактического ударного самолета «Коршун», пилотажный комплекс ПК-400М БЛА «Дань», САУ-131 БЛА «Крыло», пилотажный комплекс ПК-29М беспилотного самолета Л-29М, ряд САУ ракет-мишеней и др. Все эти разработки выдвигали ОКБ и СЭЗ на передовые места ведущих в отрасли предприятий по созданию систем автоматического управления беспилотных летательных аппаратов.

В 1990-е годы объединение, в которое входили СЭЗ и ОКБ, разделилось на два отдельных предприятия: серийный завод (СЭЗ имени Серго Орджоникидзе) и Конструкторское бюро промышленной автоматики (КБПА).

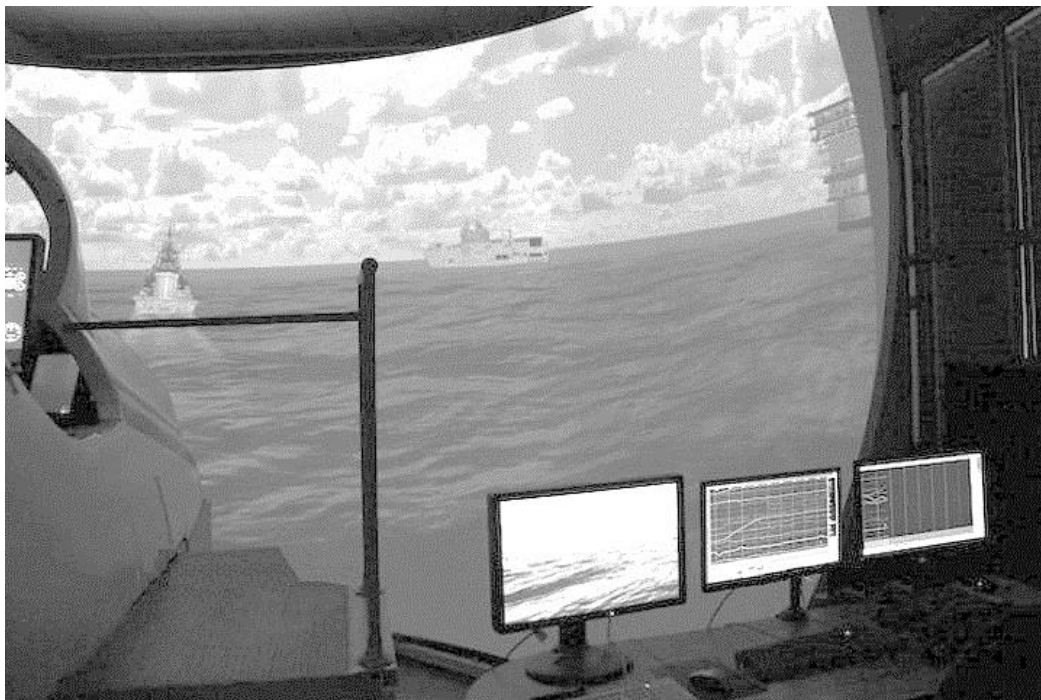
СЭЗ – это инновационное предприятие, которое производит бортовое оборудование для самолетов Ту-204, Ту-214, Ил-96-300, Ил-96-400, Ан-148, спутниковую навигационную систему СНС-2. В настоящее время в структуре СЭЗ создано новое экспериментально-конструкторское бюро, разработки которого (вычислительный интерфейсный модуль ВИМ-3У-3, мезонины, источники питания, привод автоматом тяги ПАТ-96, система управления погрузкой ДСУ-76, САУ-42М) используются в системах управления современных самолетов: МС-21, Ил-112, Ил-114; Ил-76-МД-90А; Ан-124, «Даймонд-42» [1].

КБПА с начала своего создания по сегодняшний день в своих разработках применяли современные аппаратные и технологические решения. Передовое алгоритмическое и программно-математическое обеспечение сделало возможным решение всех оперативно-тактических задач, возлагаемых на летательные аппараты, для которых создавались системы управления и навигации.

С 90-х годов XX века КБПА плотно работает с конструкторскими бюро «Миль» и «Камов». Системы управления и навигации для вертолетов становятся основной темой их разработок. Во всех вертолетах сегодня стоят системы разработанные КБПА. Пилотажные комплексы для вертолетов «Миль»: Ми-14, Ми-24, Ми-26, Ми-28Н, Ми-8, Ми-38, Ми-17, Ми-4, Ми-171А2. Для вертолетов «Камов»: Ка-25, Ка-50, Ка-52, Ка-31, Ка-226, Ка-62, «Ансат» и т. д. [2].

В настоящее время в конструкторском бюро завершены разработки и серийно изготавливаются САУ-32-226М и ПВН-1-04 для вертолетов серии Ка-226Т, ПКВ-М24(А) для модернизированных вертолетов Ми-24 и Ми-28Н «Ночной охотник», ПКВ-26ДЭ для грузового вертолета Ми-26Т2. Созданы новые дублирующие пилотажные комплексы для вертолетов Ми-38, Ка-62, Ми-171А2. Данные системы имеют высокотехнологичную модульную структуру и созданы на базе современного высокоскоростного вычислителя ВУП-У на базе процессорного модуля МВИ-5200 с архитектурой процессоров PowerPC и встроенной операционной системой жесткого реального времени LynxOS-178 [2].

Проверку разработанные в КБПА системы проходят на универсальном исследовательском пилотажном стенде «Березина». Стенд предназначен для исследования и отработки алгоритмов пилотажных комплексов, а также для обеспечения сопровождения этих комплексов в летных испытаниях. Стенд начали создавать в семидесятых годах XX века, а сегодня «Березина» постоянно модернизируется и улучшается в соответствии с ужесточением функциональных требований, предъявляемых к пилотажным комплексам вертолетов.



Отработка полета на универсальном исследовательском пилотажном стенде «Березина»

«Березина» представляет собой комплекс высокоскоростного современного вычислительного оборудования, соединенного с реальными органами управления вертолета [3, 4].

Задачи, которые может решать стенд:

- отработка и исследование алгоритмов устойчивости и управляемости вертолетов;
- отработка отказобезопасности систем управления при пилотировании вертолета пилотом;
- отработка алгоритмов работы пилотажных систем для достижения требуемых летно-технических характеристик;
- исследование алгоритмов управления вертолетом с грузом на внешней подвеске;
- сопровождение летных испытаний с возможностью при необходимости оперативной корректировки алгоритмов управления;
- помощь в создании методик и отработок пилотажных комплексов на стендах наземной отработки.

Подводя итог истории развития авиаприборостроения на саратовской земле, можно сказать, что, несмотря на все возникающие сложности в данной отрасли, саратовские предприятия справляются с поставленными задачами и успешно развиваются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.В. Приближая будущее. Саратов: АртСервис-Волга, 2018. 284 с.
2. Пилотажные комплексы и навигационные системы вертолетов / А.Н. Попов, И.В. Сергушов, Д.П. Тетерин и др.; под ред. М.Ш. Ковадина. М: Инновационное машиностроение, 2017. 368 с.

## **60-летие первого космического полета Ю.А. Гагарина**

---

3. Универсальный вертолетный пилотажный исследовательский стенд «Березина» / А. Попов, М. Кавалдин, А. Саморуков, О. Алексеева, В. Алексеев, О. Фролова // Современные технологии автоматизации. 2016. № 1. С. 52-58.

4. Пилотажный стенд для систем автоматизированного управления вертолетов / О.Т. Алексеева, А.К. Саморуков, О.П. Фролова, А.А. Орлов // Пятый форум Российского Вертолетного общества: сб. докл. Москва, МАИ, 20-21 февраля 2002 г. М., 2002. С. 65-80.

5. Ткачёв Л.И. Системы инерциальной ориентировки. М: Московский энергетический институт, 1973. 215 с.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 681.2:658.62.018.012

**М.Е. Дробынин, Н.А. Ясюк, Е.А. Филина,  
О.Д.М. Аль-Тай, О.А. Торопова**

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АВИОНИКИ

*Аннотация.* В работе описаны различные типы нелинейностей, встречающиеся в пьезорезистивных датчиках давления на основе кремниевых структур. Особое внимание уделено структурной нелинейности. Влияние толщины диафрагмы и положения пьезорезисторов анализируется с учетом анизотропии. Также с точки зрения линейности изучается влияние оксида/нитрида, используемого для изоляции между металлом и диафрагмой. Влияние пьезорезистивной нелинейности и нелинейности мостового формирователя сигнала анализируется с выводом соответствующих математических соотношений. Кроме того, в работе описаны результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают теоретические выводы.

**Ключевые слова:** датчик давления, чувствительность, линейность, пьезорезистивность, пьезорезистивная нелинейность, мост Уитстона

**M.E. Drobynin, N.A. Yasyuk, E.A. Filina,  
O.D.M. Al-Tai, O.A. Toropova**

## NONLINEARITY IN PIEZORESISTIVE MICROELECTROMECHANICAL SENSORS USED IN AVIONICS

*Abstract.* This paper describes the various nonlinearities encountered in the Si-based Piezoresistive pressure sensors. Particular attention is paid to structural nonlinearity. The effect of diaphragm thickness and position of the piezoresistors are analyzed taking anisotropy into account. The effect of the oxide/nitride used for isolation between metal and diaphragm is studied from linearity point of view. The effect of piezoresistive non-linearity and nonlinearity of the bridge signal driver is analyzed with the derivation of the corresponding mathematical relationships. In addition, the paper describes the results of experimental studies that confirm theoretical conclusions.

**Keywords:** pressure sensor, sensitivity, linearity, piezoresistance, piezoresistive non-linearity, Wheatstone bridge

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Датчики давления на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) с точки зрения механики аналогичны традиционным датчикам, за исключением того, что они основаны на кремниевых структурах и очень миниатюрны (их линейные размеры порядка нескольких микрометров) [1-8].

Дополнительные преимущества датчиков давления на основе МЭМС включают удобство серийного производства, высокие эксплуатационные характеристики, малые размеры, низкую стоимость, отсутствие клеевых соединений элементов и простую интеграцию на одном кристалле. Датчики давления имеют широкий спектр применения в различных областях, таких как автомобилестроение, биомедицина, космическое и военное применение. Эти датчики давления доступны в широком рабочем диапазоне от 0,2 до 1000 атм.

В последние годы было проведено много исследований микромашиных пьезорезистивных датчиков давления [1-4, 6-8]. В работах отмечается, что для обеспечения высоких метрологических и эксплуатационных характеристик чувствительность и линейность МЭМС датчиков должны быть улучшены. Чтобы увеличить чувствительность, необходимо толщину диафрагмы датчика делать как можно более малой. В существующих серийно производимых пьезорезистивных датчиках давления широко распространены диафрагмы из кремния толщиной менее 20 мкм [5]. Как правило, тонкие диафрагмы подвержены большому изгибу, когда возникают существенные нелинейные эффекты. Поэтому необходимо оптимизировать толщину мембраны с точки зрения жесткости и прочности.

Очень важной проблемой являются надлежащий выбор пьезорезисторов, то есть их ориентации, формы, местоположения на кристалле, концентрация примесей и т. д. Помимо отмеченных источников нелинейности, есть еще один аддитивный фактор – преобразование малого изменения сопротивления в выходное напряжение с помощью формирователя сигнала на основе мостовой схемы.

В работе рассматриваются типы нелинейностей, возникающих в пьезорезистивных датчиках давления, дается функциональная взаимосвязь между давлением, напряжением, отклонением диафрагмы, изменением сопротивления и выходным напряжением. Кроме того, исследуются пьезорезистивная нелинейность и нелинейность мостовой схемы. Представлены результаты численного моделирования квадратной диафрагмы для оптимального прогиба под действием нагрузки.

### 2. НЕЛИНЕЙНОСТИ В ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКАХ ДАВЛЕНИЯ

Пьезорезистивный датчик давления состоит из диафрагмы с диффузными пьезорезисторами в формирователе сигнала типа моста Уитстона (рис. 1а) или петли переменного тока [9-13] (рис. 1б).

Диафрагма преобразует давление в механическое напряжение, пьезорезисторы преобразуют это напряжение в изменение сопротивления и, наконец, изменение сопротивления преобразуется в выходное напряжение.

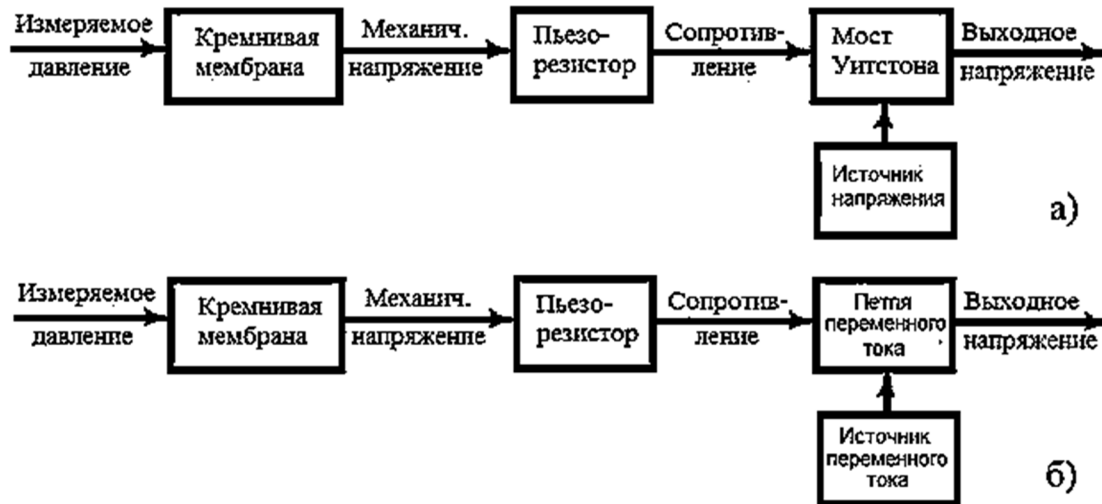


Рис. 1. Принцип пьезорезистивного датчика давления

Эти подсистемы должны быть исследованы и оптимизированы, чтобы реализовать датчик давления с высокой чувствительностью и хорошей линейностью. Нелинейность датчика может быть определена как максимальное отклонение калибровочной кривой от заданной наилучшим образом подобранной прямой линии. Математически общая нелинейность для пьезорезистивного датчика давления может быть выражена как

$$\begin{cases} N = \sqrt{N_{pm}^2 + N_{mr}^2 + N_{rb}^2}; \\ N = \sqrt{N_{pm}^2 + N_{mr}^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где верхнее уравнение относится к мостовой схеме, а нижнее – к петле переменного тока  $N_{pm}$  – нелинейность между измеряемым давлением и вызываемым им отклонением мембраны (структурная нелинейность);  $N_{mr}$  – нелинейность между отклонением мембраны и сопротивлением пьезорезистора на ней (пьезорезистивная нелинейность);  $N_{rb}$  – нелинейность вследствие разницы в чувствительностях к отклонению мембраны у резисторов мостовой схемы Уитстона (нелинейность моста). Нелинейность петли переменного тока практически равна нулю по сравнению с нелинейностью мостовой схемы, что показано в работах [9-13]. Некоторые виды нелинейности, присущие рассматриваемым МЭМС, даны в работе [20].

### 3. СТРУКТУРНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Рассмотрим тонкую кремниевую пластину, подвергнутую приложенному давлению  $p$ , что приводит к ее изгибу. Основное дифференциальное уравнение, описывающее этот процесс, можно записать в виде [14, 15]:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D}, \quad (2)$$

где  $w(x,y)$  – отклонение, которое можно найти, решая (2) с соответствующими граничными условиями;  $D$  – коэффициент жесткости при изгибе при условии постоянной толщины пластины  $h$ . Различные компьютерные программы [16] доступны для решения таких уравнений

с надлежащими граничными условиями. Деформации, вызывающие изгиб на поверхности, могут быть записаны как

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{h}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_{yy} = -\frac{h}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \varepsilon_{xy} = -h \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (3)$$

Используя уравнения (2) и (3), можно найти соответствующие механические напряжения:

$$\sigma_{xx} = \frac{hE}{2(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \quad \sigma_{yy} = \frac{hE}{2(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); \quad \tau_{xy} = hG \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right). \quad (4)$$

Вышеприведенное описание представляет собой лишь краткое изложение общего подхода, используемого для расчета напряжений и изгиба квадратной пластины, закрепленной по краям.

Детальный анализ явления основан на теории малых отклонений. Предполагается, что распределение напряжений является результатом чистого изгиба, то есть нейтральная плоскость диафрагмы не растягивается. Это предположение требует, чтобы прогиб диафрагмы был небольшим по сравнению с его толщиной. Для тонких диафрагм, обычно используемых в датчиках давления, такое предположение неоправданно. В случае тонкой диафрагмы, если прогиб достаточно велик, нейтральная плоскость диафрагмы будет растягиваться, как воздушный шар. Это явление даже получило название «эффект шара» [17]. Здесь необходимо учитывать напряжение, вызванное растяжением нейтральной плоскости.

Факторы, способствующие структурной нелинейности, можно классифицировать следующим образом: 1) геометрическая нелинейность; 2) нелинейность материала; 3) нелинейность контактов.

Геометрическая нелинейность возникает при больших смещениях диафрагмы под действием нагрузки. В этих случаях теория малых отклонений дает неадекватные результаты при исследовании отклонений пластины в широком рабочем диапазоне. Здесь соотношения для смещения мембраны уже не являются линейными:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2; \quad \varepsilon_{xy} = \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \right), \quad (5)$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – смещения в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. В этом случае напряжение в диафрагме состоит из двух составляющих: первая, вызванная изгибом диафрагмы  $\sigma_b$ , и вторая, вызванная растяжением нейтральной плоскости  $\sigma_s$ . Или математически:  $\sigma = \sigma_b + \sigma_s$ .

Поскольку в этом случае напряжение вызвано не только изгибом мембраны, но и ее растяжением, то напряжение изгиба будет меньше по сравнению со значением, рассчитанным по теории малого отклонения в соответствии с выражениями (2)-(5) (рис. 2).

На рис. 2 показаны результаты моделирования погрешности линейности с учетом и без учета влияния больших отклонений для квадратной диафрагмы шириной 1054 мкм и толщиной 10 мкм, используемой для датчика давления 1 атм.

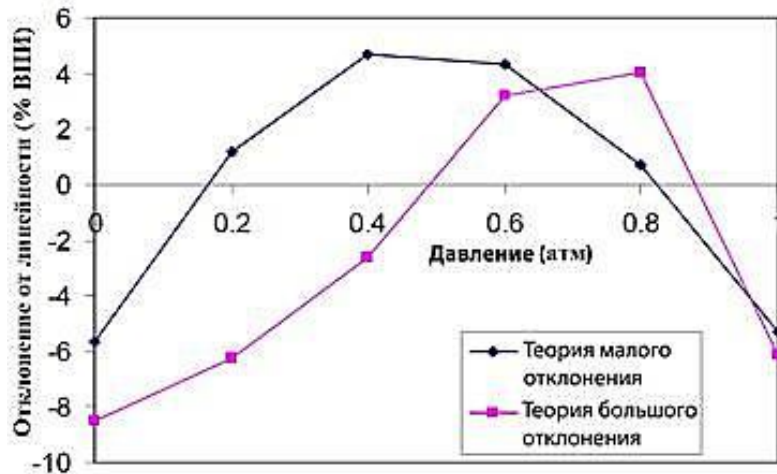


Рис. 2. Ошибка линейности (структурной) с учетом и без учета эффекта большого отклонения: ВПИ – верхний предел измерения

Анализ выполнен с использованием пакета ANSYS. Как видно, эффект больших отклонений в этом случае оказывает значительное влияние. Кривая не является больше симметричной относительно центральной точки. Поэтому мембрана была спроектирована заново с учетом оптимальных размеров для того же диапазона давления. На рис. 3 показаны результаты погрешности линейности с измененной толщиной мембраны, равной 16 мкм.

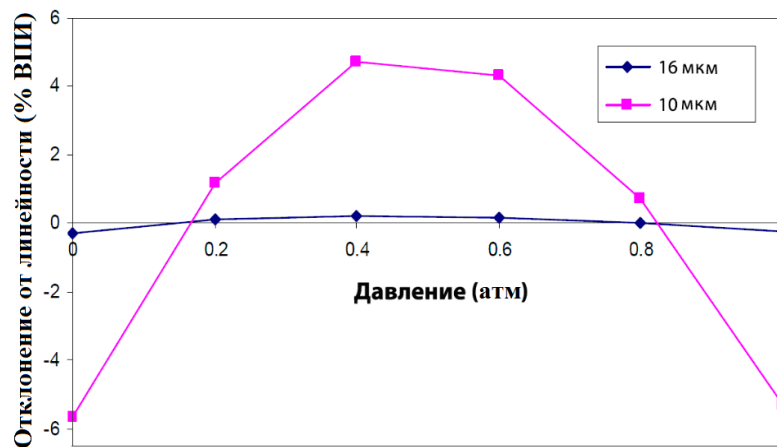


Рис. 3. Линейная (структурная) ошибка для двух диафрагм разной толщины

Нелинейность материала, из которого изготовлена мембрана, в идеале должна быть равна нулю в случае использования монокристаллических кремниевых диафрагм, поскольку отношение напряжение-деформация остается линейным вплоть до точки разрушения. Однако остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления датчика, из-за осаждения частиц на поверхности, имплантации, анизотропного травления и т. д., вносят заметный вклад в нелинейность. Некоторые из этих напряжений могут быть сняты во время самого процесса изготовления. Однако полное снятие напряжения не всегда возможно, так как они не до конца изучены – качественно и количественно. Таким образом, общее напряжение в диафрагме будет:  $\sigma = \sigma_b \pm \sigma_r$ .

Установлено [18], что остаточные напряжения  $\sigma_r$  при растяжении увеличивают жесткость при изгибе (более высокое напряжение приводит к большей жесткости) пластины, в то время как остаточные напряжения при сжатии уменьшают жесткость и могут в конечном итоге привести к изгибу. Этот эффект был исследован путем моделирования диафрагмы с нанесенным на нее слоем оксида (источником сжимающего напряжения). Результаты показаны на рис. 4, из которого видно, что влияние напыленного слоя оксида толщиной 0,15 мкм пренебрежимо мало по сравнению со случаем использования кремниевой диафрагмы без напыления оксида. Кроме того, моделировалась диафрагма с нанесенными на нее слоями оксида толщиной 0,4 мкм и химически осажденного из газовой фазы нитрида (CVD-нитрид) толщиной 0,8 мкм, который вызывает появление растягивающего напряжения [19]. Результаты этого модельного эксперимента показаны на рис. 5. Видно, что структурная нелинейность возросла примерно на 0,02 % от верхнего предела измерения (ВПИ). Совместное влияние оксидного и нитридного слоев на свойства диафрагмы проявляется как в увеличении нелинейности, так и в снижении уровня выходного сигнала по сравнению с использованием только одного оксидного слоя.

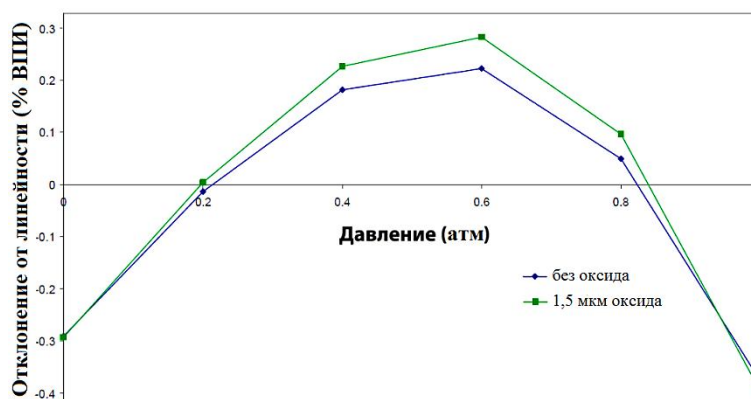


Рис. 4. Структурная нелинейность с оксидом и без него

Контактная нелинейность возникает из-за изменения граничных условий. Поскольку предполагается, что крайняя кромка диафрагмы жестко закреплена, то в случае тонкой диафрагмы эта нелинейность пренебрежимо мала по сравнению с двумя источниками нелинейности, описанными выше.

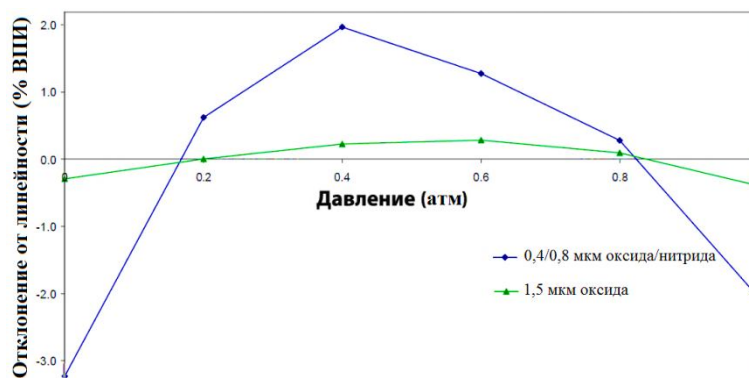


Рис. 5. Структурная нелинейность с комбинацией оксид – нитрид и без нее

#### 4. ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Как правило, пьезорезисторы изготавливаются по диффузионной технологии и включаются во все четыре плеча мостовой схемы [21-23], причем одна пара резисторов в противоположных плечах имеет одну ориентацию (при росте давления сопротивление этой пары, например, увеличивается), а ориентация второй пары делается ортогональной первой (соответственно их сопротивления уменьшаются с ростом давления).

Для диффузного пьезорезистора, подвергаемого параллельным и перпендикулярным составляющим напряжения, изменение сопротивления определяется как [24]

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} = \Pi_l \sigma_l + \Pi_t \sigma_t \quad (6)$$

где  $\Pi_l$  и  $\Pi_t$  – коэффициенты пьезорезистивности в направлениях, параллельном и перпендикулярном длине резистора. Это соотношение предполагает, что уровни механического напряжения относительно малы, и, следовательно, коэффициенты пьезорезистивности кремния не зависят от него. То есть, когда напряжения линейны с приложенным давлением, изменение сопротивления будет пропорционально механическому напряжению. Но на практике наблюдается присутствие некоторой нелинейности. Эта нелинейность обусловлена зависимостью пьезорезистивных коэффициентов от механического напряжения. Однако исследование зависимости коэффициента пьезорезистивности от напряжения довольно сложное, так как имеется много компонентов тензора напряжений, а измерение эффектов более высокого порядка требует очень высокой точности. Величина возникающей нелинейности пропорциональна величине напряжения.

Было исследовано [24, 25], что нелинейные коэффициенты пьезорезистивности до третьего порядка могут играть основную роль в определенных кристаллографических направлениях. Вплоть до первого порядка  $\Pi_{11}$ ,  $\Pi_{12}$  и  $\Pi_{44}$  могут давать  $\Pi_l$  и  $\Pi_t$  для любого произвольного направления в кристалле. Эти три коэффициента также являются функциями концентрации легирования и температуры.

Но для второго порядка еще девять таких пьезорезистивных компонентов необходимы для вычисления  $\Pi_l$  и  $\Pi_t$ . Наблюдение [24, 25] для резисторов р-типа, ориентированных в направлении  $\langle 110 \rangle$  с уровнем легирования  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , показывает (рис. 6) зависимость нелинейности от механического напряжения. Как можно видеть, нелинейность вследствие пьезорезистивного эффекта для продольного резистора является положительной как для растягивающих, так и для сжимающих напряжений изгиба. Однако для поперечного резистора нелинейность отрицательна для сжимающих и положительна для растягивающих напряжений. Установлено, что полиномиальное приближение третьего порядка дает достаточно хорошее совпадение [26].

Исходя из этого, одним из методов, принятых для уменьшения этой нелинейности, является использование только поперечных пьезорезисторов вместо обычно используемых и поперечных, и продольных пьезорезисторов. Эффект пьезорезистивной нелинейности проявляется в установке диффузионным методом подходящих пьезорезисторов на диафрагму МЭМ датчика с использованием четырехплечного моста Уитстона. Как было показано выше, «структурная» нелинейность частично компенсируется нелинейностью, вызванной пьезорезистивным эффектом.

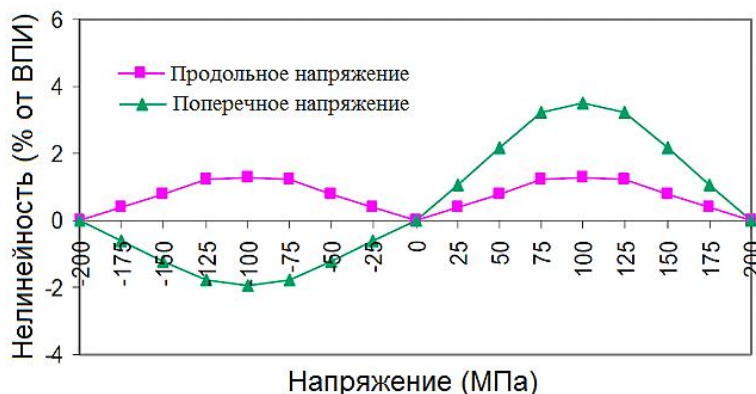


Рис. 6. Нелинейность пьезорезисторов р-типа для напряжения в направлении <110> (уровень легирования:  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ )

На рис. 7 показано, как структурная ошибка линейности изменяется от 0,37 % до 0,23 % от верхнего предела измерения (ВПИ) для 16-миллиметровой диафрагмы с пьезорезисторами.

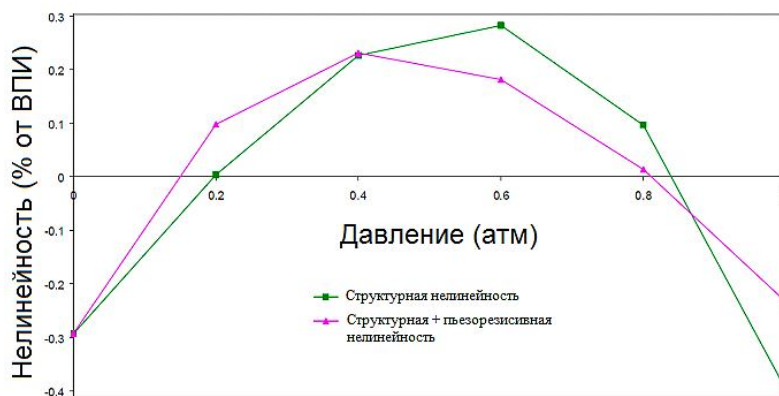


Рис. 7. Структурная и общая нелинейности для датчика давления в диапазоне от 0 до 1 атм

### 5. НЕЛИНЕЙНОСТЬ МОСТОВОЙ СХЕМЫ

Когда к датчику прикладывается внешнее давление, мембрана подвергается механическому напряжению. В результате продольные и поперечные резисторы претерпевают различные изменения в сопротивлениях из-за того, что средние механические напряжения в каждом резисторе различны. Выражение (1) задает изменение сопротивления. Как правило, все четыре резистора соединены в мост Уитстона, напряжение на выходе которого можно рассчитать из следующего соотношения [27]:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{(\Delta R/R)_l - (\Delta R/R)_t}{2 + (\Delta R/R)_l + (\Delta R/R)_t}, \tag{7}$$

где:  $V_o$  и  $V_s$  – напряжения на выходе моста и на его входе соответственно. В идеале, в линейной мостовой схеме выходной сигнал напряжения пропорционален отклонению мембраны и, следовательно, приложенному измеряемому давлению. Но в знаменателе (7) присутствует нелинейность которую можно устранить, выбрав резисторы так, чтобы



$$\left| \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_i \right| = \left| \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_t \right|, \quad (8)$$

т. е. чувствительность у пьезорезисторов должна быть одинаковой. Если вышеуказанное условие (8) выполнено, то выражение для отношения выходного напряжения (7) всегда будет приблизительно равно нулю. Поэтому нелинейность мостовой схемы является неотъемлемым ее свойством. Ее можно понять, рассматривая линейные, но различные изменения сопротивления в зависимости от давления в продольных и поперечных пьезорезисторах. Пусть изменение этих сопротивлений задается выражениями:

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_l = \alpha p; \quad \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_t = -\beta p, \quad (9)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – чувствительности продольных и поперечных пьезорезисторов соответственно. Подставляя (8) в (6) и предполагая, что напряжение смещения моста равно нулю, получим выражение для выходного напряжения  $V_o$ :

$$V_o = \frac{(\alpha + \beta)p}{2 + (\alpha - \beta)p} V_s. \quad (10)$$

Нелинейность, выраженная в процентах от полного диапазона измерения давления, для крайнего положения мембраны диафрагмы при определенном испытательном давлении  $p_i$  может быть задана как

$$N_i = \frac{V_o(p_i) - \frac{V_o(p_{\max})}{p_{\max}} p_i}{V_o(p_{\max})} \cdot \frac{100\%}{p_{\max} - p_{\min}}, \quad (11)$$

где:  $p_{\max}$  и  $p_{\min}$  – максимальное и минимальное измеряемые давления соответственно. Подставляя (9) в (10) и предполагая, что максимальная нелинейность для всего рабочего диапазона достигается при  $p_i = p_{\max}/2$ , то есть половине максимального приложенного давления, нелинейность будет равна

$$N_i = \frac{p_{\max}}{2} \left[ \frac{(\alpha - \beta)}{4 + (\alpha - \beta)p_{\max}} \right] \cdot \frac{100\%}{p_{\max} - p_{\min}}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что с увеличением разности между  $\alpha$  и  $\beta$  погрешность линейности будет увеличиваться. Кроме того, в вышеприведенном уравнении предполагалось, что чувствительность к сопротивлению изменяется линейно в зависимости от давления, но на практике это не так. Таким образом, разница между чувствительностью резисторов может быть еще выше и, следовательно, погрешность выражение (12) дает заниженную оценку реально возникающей нелинейности. Как правило, этот компонент нелинейности имеет наименьший эффект, если расположение пьезорезисторов хорошо оптимизировано. Пьезорезисторы должны быть правильно расположены на диафрагме. Для резисторов р-типа, выровненных по направлению <110> на кремниевой пластине (100) [24-26], пьезорезистивные коэффициенты ( $\Pi_l$  и  $\Pi_t$ ) почти равны по величине, но противоположны по знаку, конфигурация моста позволяет максимизировать чувствительность выходного сигнала.

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования были экспериментально проверены путем тестового испытания макетного образца МЭМ датчика с мостовой схемой. На рис. 8 показаны графики рассчитанной на модели и измеренной экспериментально нелинейности для датчика, работающего в диапазоне от 0 до 1 атм.

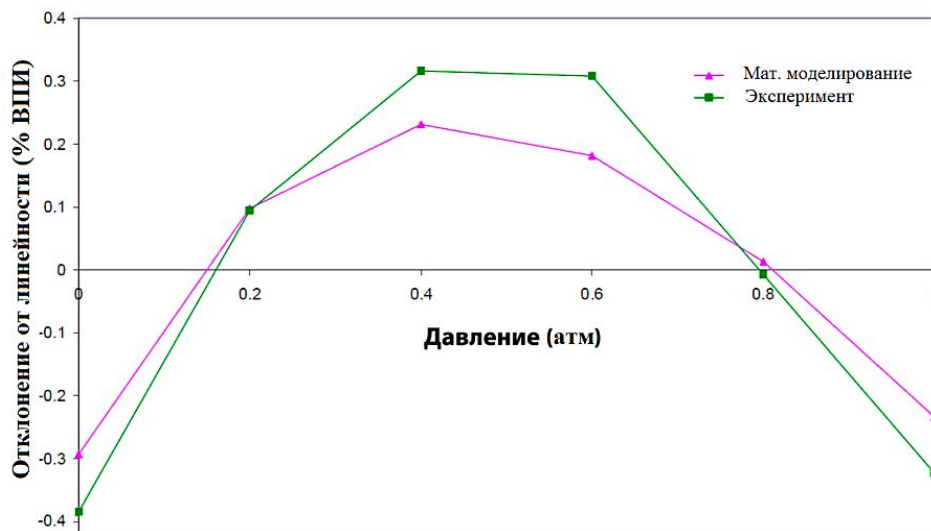


Рис. 8. Нелинейности, полученные теоретически и экспериментально

## ВЫВОДЫ

Линейность и чувствительность – это два рабочих параметра датчика давления, которые учитываются при его разработке и производстве. В этой статье представлен анализ нелинейности МЭМС датчика давления и результаты компьютерного моделирования влияния этой нелинейности. В зависимости от причин нелинейностей предлагаются следующие подходы для их уменьшения/устранения: 1) использование оптимальной толщины диафрагмы; 2) в целях обеспечения изоляции между металлом и диафрагмой не использовать напыления из нитрида (всегда лучше использовать только оксид); 3) геометрическая нелинейность также может быть учтена путем расчета коэффициентов  $\sigma_b$  и  $\sigma_s$  противоположной природы. Если используется стек оксидных нитридов, их толщины должны быть правильно выбраны, чтобы иметь минимальный эффект остаточного напряжения.

Кроме этого, в работе представлен анализ влияния нелинейности пьезорезисторов и мостовой схемы, используемой в качестве формирователя сигнала. Аналитически, а также экспериментально установлено, что использование мостовой схемы неизбежно приводит к возникновению дополнительной нелинейности, что влияет на точность измерения давления, особенно при измерениях в широком диапазоне температур окружающей среды.

Уменьшение нелинейности, связанной с природой пьезорезистивности, возможно, если используемые пьезорезисторы изготавливаются удовлетворяющими соотношению (8). Но в широком диапазоне температур это соотношение не выполняется. Поэтому использование резисторов только с поперечной ориентацией относительно направления  $\langle 110 \rangle$  не достигает желаемого результата.

Нелинейность, присущую мостовой схеме, устранить принципиально невозможно, поэтому в работах [28-31] предлагается заменить формирователь сигнала на петлю переменного тока. В работах [9-11, 31] показано, что у формирователя сигнала на основе петли переменного тока вход и выход связаны чисто линейным соотношением. Использование цифровой обработки сигналов позволяет учесть все нелинейности на стадии градуировки датчика, что существенно повышает точность измерения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clark S.K., Wise K.D. Pressure sensitivity in anisotropically etched thin diaphragm pressure sensors // IEEE Trans. Electron Devices, 1979. Vol. ED-26. № 12. P. 1887-1895.
2. Chau H.L., Wise K.D. Scaling limits in batch fabricated silicon pressure sensors // Sensors & Actuators, 1986. Vol. 10. P. 303-320.
3. Zhadko I.P., Babichev G.G. Silicon pressure transducer with differential sensitive element based on transverse electromotive force // Sensors & Actuators. A Phys., 2001. Vol. 90. P. 89-95.
4. Fuller L.F. Bulk micromachined pressure sensor // Proc. 15<sup>th</sup> Biennial University / Government / Industry Microelectronics Symp., 2003. P. 317-320.
5. Design, fabrication and characterization of an annularly grooved membrane combined with rood beam piezoresistive pressure sensor for low pressure measurements / C. Li, J. Xie, F. Cordovilla, J. Zhou, R., Jagdheesh J.L. Ocaña, J. Radhakrishnan // Sensors & Actuators. A. Phys. 2018. Vol. 279. P. 525-536.
6. Львов А.А., Коновалов Р.С. Малогабаритные датчики давления на основе поликристаллических структур с диэлектрической изоляцией // Датчики и системы. 2015. № 8. С. 29-32.
7. A piezoresistive pressure sensor based on polysilicon thin films with dielectric insulation / V.A. Gridchin, R.S. Konovalov, A.A. L'vov // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2015. Т. 2. С. 191-199.
8. Bao M. Principles of MEMS Devices. Elsevier Publishers, 2005. 334 p.
9. Львов А.А., Пыльский В.А. Линейная петлевая схема точной обработки сигналов с датчиков // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 2 (3). С. 102-112.
10. L'vov A.A., Pylskiy V.A. Improvement of the Current Loop Circuit for AC and DC Applications Based on Digital Signal Processing // Proc. IEEE Instrum. & Meas. Tech. Conf. Sorrento, Italy: IEEE, 2006. P. 1257-1261.
11. L'vov A.A., Gureev V.V. High Accuracy Semiautomatic Calibration of Industrial RTDs // Proc. IEEE IEEE Instrum. & Meas. Tech. Conf. Warsaw, Poland: IEEE, 2007. P. 1196-1201.
12. Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А. Компенсация температурной погрешности интеллектуальных датчиков давления // Надежность и качество: сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза, ПГУ, 2014. Т. 2. С. 57-59.
13. Коновалов Р.С., Львов А.А. Высокотемпературные датчики давления // Надежность и качество: сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза, ПГУ, 2014. Т. 2. С. 48-50.
14. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells: 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1987. 580 p.

15. Elgamel H.E. Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors // *Sensors & Actuators. A Phys.*, 1995. Vol. 50. P. 17-22.

16. The MATLAB Toolbox SciXMiner: User's Manual and Programmer's Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1704.03298> (дата обращения: 09.11.2020).

17. Lin L., Chu H.-C., Lu Y.-W. Simulation program for the sensitivity and linearity of piezoresistive pressure sensors // *J. Microelectromechanical Sensors*, 1999. Vol. 8. № 4. P. 514-522.

18. Senturia S.D. *Microsystem Design*. London: Kluwer Academic Publishers, 2003. 689 p.

19. Hu S.-M. Stress related problems in Silicon technology // *J. Applied Physics*, 1991. Vol. 70 (6). P. R53-R73.

20. Исследование линейности пьезорезистивных микроэлектромеханических датчиков давления: нелинейности пьезорезистивная и мостовой схемы / М.Е. Дробынин, Н.А. Ясюк, Е.А. Филина, О.Д.М. Аль-Таи, М.Р.Х. Хамид // *Надежность и качество: сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза, ПГУ, 2020. Т. 2. С. 336-339.*

21. Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: анализ метода / М.Е. Дробынин, П.А. Львов, А.А. Львов, Н.И. Мельникова // *Надежность и качество: сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2018. Т. 2. С. 85-88.*

22. Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: результаты эксперимента / М.Е. Дробынин, П.А. Львов, А.А. Львов, О.А. Торопова // *Надежность и качество: сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2018. Т. 2. С. 409-413.*

23. A piezoresistive pressure sensor based on polysilicon thin films with dielectric insulation / V.A. Gridchin, R.S. Konovalov, A.A. L'vov, M.Y. Afanasiev, O.G. Danilova // *Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2015. Т. 2. С. 191-199.*

24. Nonlinearity of piezoresistance effects in p-and n-type silicon / K. Matsuda, Y. Kanda, K. Yamamura, K. Suzuki // *Sensors and Actuators. A Phys.* 1990. Vol. 21-23. P. 45-48.

25. Suzuki K., Nahgawa H., Kanda Y. Origin of the linear and nonlinear piezoresistance effect in p-type silicon // *J. Applied Phys.*, 1984. – Part 2. Vol. 23. № 11. P. 871-874.

26. Bao M. *Principles of MEMS Devices*. Elsevier Publishers, 2005. 334 p.

27. Математическая модель температурных эффектов в кремниевом пьезорезистивном датчике давления / М.Е. Дробынин, П.А. Львов, С.П. Ивженко, О.А. Торопова // *Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. VI Междунар. науч. конф. Саратов: ООО СОП «Люди», 2019. С. 384-390.*

28. L'vov A., L'vov P., Konovalov R. Improvement of Piezoresistive Pressure Sensor Accuracy by Means of Current Loop Circuit Using Optimal Digital Signal Processing // *Proc. 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. P. 279-282.*

29. Test Methods and Results of the MEMS Inertia Sensors / E.N. Scripal, R.V. Ermakov, D.E. Gutcevitch, A.A. L'vov, A.A. Sytnik // *Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2018. P. 1000-1003.*

30. Fire Detection and Alarm Sensor for Avionics Based on Current Loop Circuit / A.A. L'vov, V.V. Komarov, S.A. Kuzin, P.A. L'vov // Proc. 2018 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2018. P. 1128-1132.

31. Особенности применения микромеханических инерциальных датчиков при эксплуатации на летательных аппаратах вертолетного типа / Р.В. Ермаков, Д.В. Кондратов, А.А. Львов, Е.Н. Скрипаль // Надежность и качество: сб. тр. Междунар. симп.: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2017. Т. 2. С. 122-124.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дробынин Михаил Евгеньевич** – аспирант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Mikhail E. Drobynin** – Postgraduate, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Ясюк Никита Александрович** – студент кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Nikita A. Yasuk** – Master student, Department of Information and Communication Technologies and Computer Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Филина Екатерина Александровна** – аспирантка кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Ekaterina A. Filina** – Postgraduate, Department of Information and Communication Technologies and Computer Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Аль-Тай Омар Давуд Мохаммед** – аспирант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Omad D.M. Al-Tai** – Postgraduate, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Торопова Ольга Анатольевна** –  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующая кафедрой «Прикладные  
информационные технологии»  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Olga A. Toropova** –  
PhD (Engineering), Associate Professor,  
Head: Department of Applied information  
technologies, Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 22.01.21, принята к опубликованию 25.02.21*

**М.А. Игнатьев, А.А. Игнатьев**

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛА  
КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗНОСА РЕЗЦА  
ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПО ЗАПАСУ  
УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

*Аннотация.* Рассматривается алгоритм для определения момента начала критического износа инструмента на основе оценки запаса устойчивости динамической системы по вибрационным характеристикам и приводятся результаты экспериментов.

*Ключевые слова:* износ резца, вибрация, динамическая система, запас устойчивости, алгоритм распознавания

**M.A. Ignatiev, A.A. Ignatiev**

**ALGORITHMS TO DEFINE THE MAIN GROSS WEAR DURING  
TURNING OPERATIONS BASED ON STABILITY MARGIN  
OF A DYNAMIC SYSTEM**

*Abstract.* An algorithm is considered to determine the moment of critical wear of the instrument based on the assessment of the stability margin of the dynamic system by vibration characteristics and the results of experiments are given.

*Keywords:* cutter wear, vibration, dynamic system, stability margin, recognition algorithm

**ВВЕДЕНИЕ**

На эксплуатационную надежность подшипников, применяемых в авиации, приборостроении, в автомобильном и железнодорожном транспорте, сельскохозяйственной и военной технике существенное влияние оказывает качество токарной обработки деталей, на которое, в свою очередь, влияет состояние режущего инструмента [1-3]. Поздняя смена инструмента приводит к нежелательным последствиям: от появления брака обрабатываемой детали до выхода из строя всего станка. Однако слишком ранняя смена резца ведет к неоптимальному расходу рабочего ресурса инструмента, а следовательно, к дополнительным финансовым затратам.

Практические данные показывают, что порядка 35 % поломок режущего инструмента происходит из-за его износа, а затраты времени на перезаточку или замену резца составляют в среднем 10 % от рабочего времени мехатронных станочных систем [4]. Отсюда следует, что для предотвращения поломок резца и брака изделий, связанного с износом инструмента, необходимо своевременно определить момент начала критического износа резца. Критический (катастрофический) износ – это износ, после достижения которого начинается неконтролируемо быстрое его возрастание. При наступлении критиче-

ского износа резца резко возрастает уровень силовых, температурных и динамических нагрузок [5, 6], а точность обработки приближается к границе поля допуска.

В производственных условиях оператор станка с ЧПУ может определить начало наступления критического износа резца с запаздыванием во времени, что может привести к возникновению брака. Вследствие этого замена инструмента происходит после обработки определенного количества деталей, чтобы избежать снижения качества деталей и поломки резца. Чаще всего это происходит до выработки резцом ресурса, что приводит к снижению эффективности производства из-за неоптимального расхода инструмента и снижению коэффициента готовности. Следовательно, достаточно актуальной является необходимость разработки системы контроля резца при токарной обработке для выявления его катастрофического износа в реальном времени [7, 8].

### АЛГОРИТМИЗАЦИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗНОСА РЕЗЦА

Для контроля инструмента при токарной обработке в условиях реального производства наиболее широко используются косвенные методы, в частности, виброакустические [3, 8]. Они основаны на измерении виброакустических (ВА) колебаний динамической системы (ДС) станка при резании, их последующей программно-математической обработке и формировании критерия замены резца.

Методика распознавания катастрофического износа построена исходя из способа стохастической идентификации динамического качества станков, предложенной в СГТУ имени Гагарина Ю.А. [9]. Суть данного метода заключается в том, что данные о ВА колебаниях резцового блока или шпиндельного узла обрабатываются методами теории автоматического управления с последующим последовательным вычислением автокорреляционной функции, передаточной функции ДС, амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и показателя колебательности. Этот показатель определяет запас устойчивости ДС, являющийся важным показателем ее динамического качества [10].

Если в процессе резания наступает катастрофический износ резца, то запас устойчивости достаточно резко уменьшается, что автоматически выявляется. Данный метод обладает такими преимуществами как простота и дешевизна применения, для реализации не нужно вмешиваться в процесс работы станка и его конструкцию, так как ВА колебания регистрируются устанавливаемым на магнитном основании внешним датчиком, а обрабатываются компьютером. Алгоритм распознавания начальной фазы критического износа резца по показателю колебательности ДС представлен на рис. 1.

Сигнал с вибродатчика проходит фильтрацию для того, чтобы снизить влияние частот колебаний механической системы станка, не связанных с резанием (как правило, это низкие частоты порядка до нескольких сотен герц) [11]. Далее вычисляется автокорреляционная функция (АКФ)  $K(\tau)$ , которая аппроксимируется выражением

$$K(\tau) = A \cdot e^{-\alpha\tau} \cdot (1 + m \cdot \cos(\Omega \cdot \tau) \cdot \cos(\omega_0 \cdot \tau)), \quad (1)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент,  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\omega_0$  – основная частота АКФ,  $\Omega$  – частота огибающей,  $m$  – коэффициент модуляции.

Найденные значения коэффициентов из формулы (1) позволяют по специальной методике [9] получить передаточную функцию ДС токарного станка:



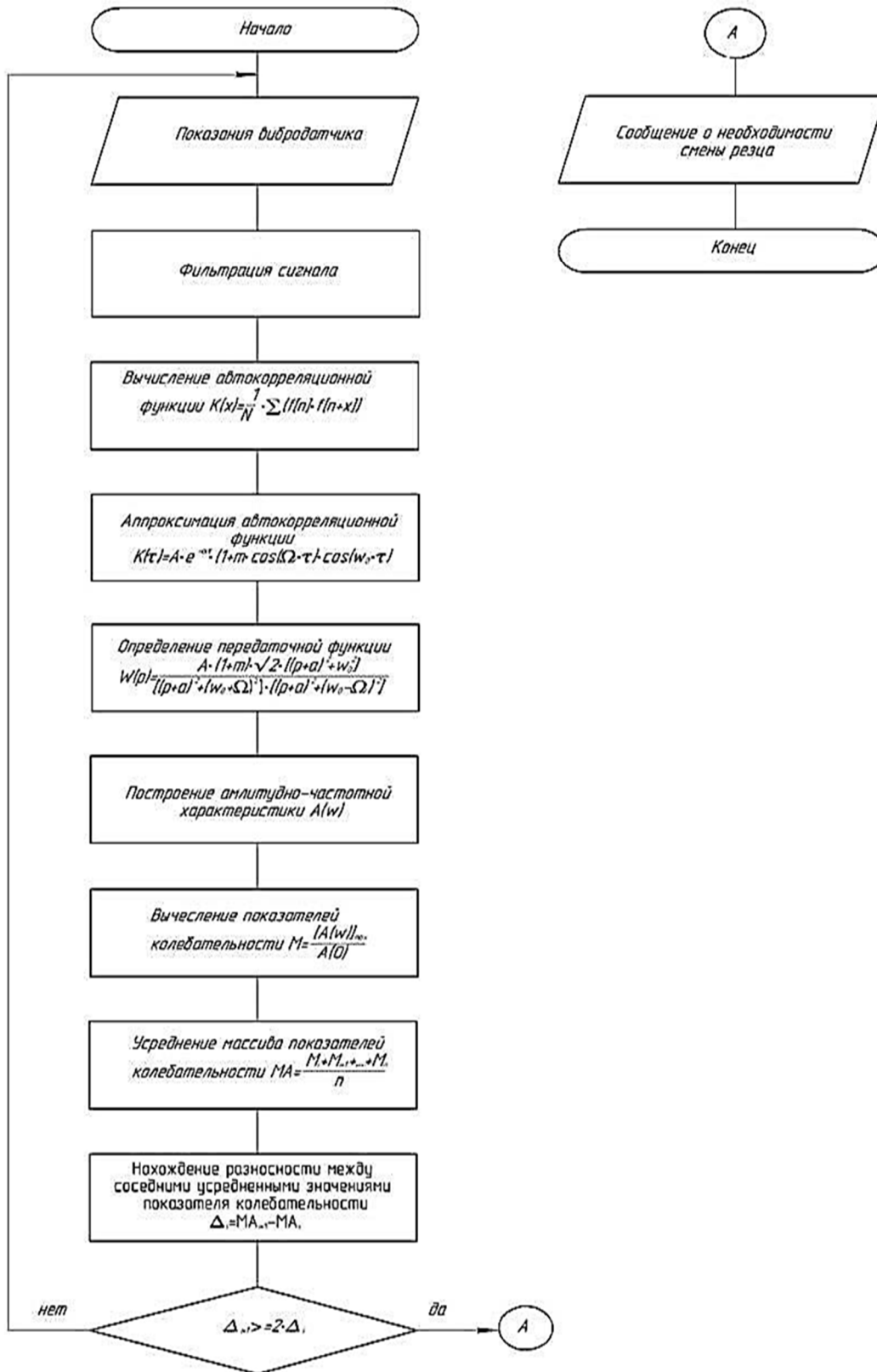


Рис. 1. Алгоритм определения начала критического износа резца по показателю колебательности динамической системы

$$W(p) = \frac{A(1+m) \sqrt{2} [(p+\alpha)^2 + \omega_0^2]}{[(p+\alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2] \cdot [(p+\alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2]} \quad (2)$$

В общем случае ДС станка является нелинейной, однако практика показывает, что АКФ в процессе обработки одной заготовки почти не меняется и ДС может быть рассмотрена как линеаризованная, то есть применение передаточной функции обоснованно.

Далее для оценки запаса устойчивости ДС необходимо вычислить показатель колебательности динамической системы при обработке каждой детали, так как показатель колебательности является мерой запаса устойчивости системы, причем чем выше показатель колебательности, тем меньше запас устойчивости. Показатель колебательности  $M$  определяется из амплитудно-частотной характеристики  $A(\omega)$ , которая строится по передаточной функции [10]

$$M = \frac{[A(\omega)]_{\max}}{A(0)}, \quad (3)$$

где  $[A(\omega)]_{\max}$  – максимальное значение АЧХ,  $A(0)$  – значение АЧХ при  $\omega = 0$ .

Значения показателя колебательности ДС при обработке каждой детали записываются в массив данных. Для дальнейшего определения момента начала критического износа резца необходимо усреднить массив показателей колебательности. Для этого используется метод скользящего среднего, так как он достаточно точен при малом количестве точек сглаживания, но в то же время прост в реализации. Интервал сглаживания примем равный трем.

$$MA = \frac{M_i + M_{i+1} + \dots + M_n}{n}, \quad (4)$$

где  $i = 1 \dots n$ ,  $n$  – количество точек сглаживания.

Следующим шагом является нахождение разности между соседними усредненными значениями показателя колебательности:

$$\Delta = MA_{i+1} - MA_i. \quad (5)$$

Это выполняется для дальнейшего определения степени изменения показателя колебательности, следовательно, и запаса устойчивости системы. Накладывается условие на изменение последующей разности по отношению к предыдущей:

$$\Delta_{i+1} \geq 2 \cdot \Delta_i. \quad (6)$$

Если выражение (6) верно, значит наступил момент начала критического износа резца и необходимы его замена или заточка. Данное соотношение определено эмпирически при исследовании процесса резания и точности обработки колец подшипников на токарных станках.

Процесс обработки значений показателя колебательности можно представить графически в виде диаграмм (рис. 2).

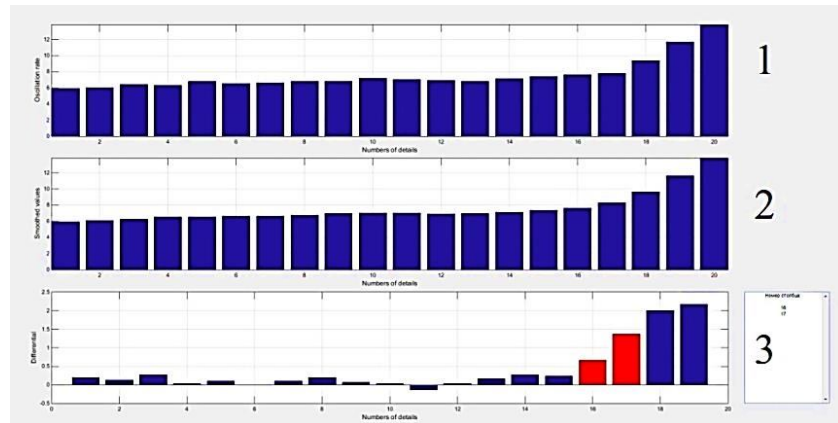


Рис. 2. Процесс обработки значений показателя колебательности: 1 – значения показателей колебательности для последовательно обработанных колец; 2 – сглаженные значения показателей колебательности; 3 – разность между соседними сглаженными значениями

На основе представленного алгоритма на языке С++ было разработано программное обеспечение. На выбор данного языка программирования повлияли такие критерии как скорость компиляции и возможность применения в производственных условиях.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнялись в ОАО «Саратовский подшипниковый завод». Для экспериментальных измерений ВА колебаний на токарном станке с ЧПУ модели ПАБ-350 использовался прибор ВШВ-003М3 с датчиком вибраций ДН-3, ноутбук, в который встроена плата, выполняющая аналогово-цифровые преобразования (рис. 3). Износ резца при точении колец подшипников контролировался косвенным методом по изменению их диаметрального размера, причем резкое изменение размера свидетельствовало о начале катастрофического износа.

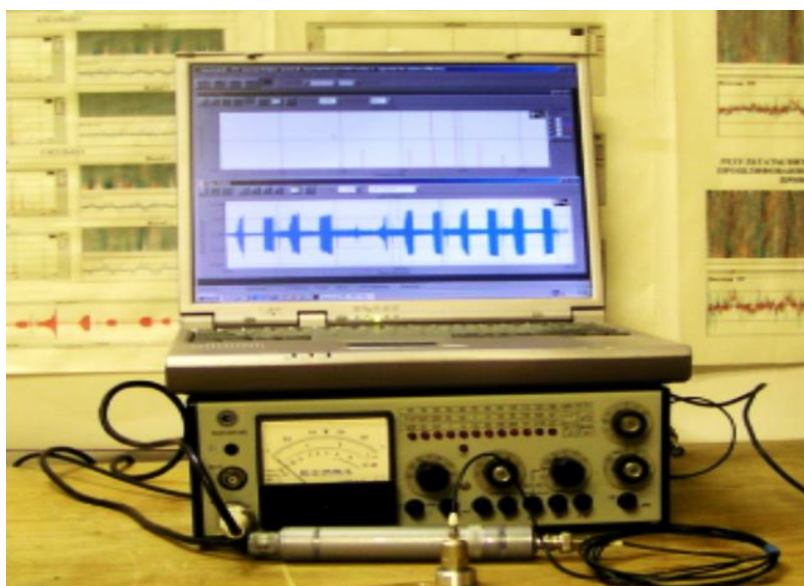


Рис. 3. Аппаратное обеспечение экспериментов

Измерения выполнялись при черновой обработке резцом PSON пластины SNMM 120412 E-OR; 9230 и при чистовой обработке тем же резцом.

После обработки экспериментальных данных ВА измерений разработанным программным обеспечением были получены следующие результаты: критический износ резца наступает при черновой обработке на 17-19 кольцах, а при чистовой – на 43-45 кольцах. Необходимо отметить, на данном предприятии смена резца происходила регламентированно: при черновой обработке – после 15-го кольца, а при чистовой – после 40-го. Следовательно, при экспериментах ресурс инструмента использовался более полно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм определения износа резца при токарной обработке по запасу устойчивости динамической системы и его программная реализация позволяют снизить количество брака, связанного с поздней заменой инструмента при токарной обработке, а также в условиях массового производства значительно уменьшить финансовые затраты, к которым ведет неоптимальный расход рабочего ресурса инструмента при его ранней замене. Данный алгоритм является достаточно точным и позволяет учитывать условия токарной обработки в режиме реального времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
2. Волосов С.С., Гейлер З.Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. М.: Изд-во стандартов, 1989. 264 с.
3. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование остаточной стойкости на станках с ЧПУ // СТИН. 2012. № 2. С. 23-28.
4. Изюмов А.И. Контроль и управление состоянием инструмента многооперационного станка в системе его интеллектуального мониторинга: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2017.
5. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
6. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания: Физические и тепловые процессы в технологических системах. Мн.: Выш. шк., 1990. 512 с.
7. Игнатъев С.А., Казинский Н.А., Игнатъев А.А. Выявление катастрофического износа инструмента при мониторинге токарной обработки // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2017. С. 45-49.
8. Игнатъев М.А., Игнатъев А.А. Контроль износа режущего инструмента при токарной обработке // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2020. С. 26-30.
9. Игнатъев А.А., Коновалов В.В., Игнатъев С.А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов: СГТУ, 2014. 92 с.
10. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

11. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Полуэктова А.М. Условия идентификации динамической системы станка по автокорреляционной функции виброакустических колебаний при резании // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2020. С. 17-22.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Игнатъев Максим Алексеевич** – магистрант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Maxim A. Ignatiev** – Master student, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Игнатъев Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexander A. Ignatiev** – Dr. Si. Tech., Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 15.01.21, принята к опубликованию 28.02.21*

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 621.9.04

**А.Н. Васин, Б.М. Изнаиров, О.П. Решетникова**

## ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Аннотация.* В статье говорится о необходимости повышения надежности систем и узлов для авиационной и космической техники инновационными методами. Одним из направлений, позволяющих существенно повысить надежность машин, является разработка подшипниковых узлов нового класса с использованием полых тел качения. Показано, что применение таких подшипников позволяет не только увеличить работоспособность техники, но и уменьшить взлетную массу машины. Приводится информация о работах, выполняемых сотрудниками кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» в этом направлении.

**Ключевые слова:** надежность, полые шарики, подшипники, контактные напряжения, нагрузочная способность

**A.N. Vasin, B.M. Iznairov, O.P. Reshetnikova**

## SPACE AND AVIATION TECHNOLOGIES IN THE XXI CENTURY

*Abstract.* The article talks about the need to improve the reliability of systems and assemblies for aviation and space technology using innovative methods. One of the directions that can significantly improve the reliability of machines is the development of a new class of bearing assemblies using hollow rolling bodies. It is shown that the use of such bearings allows not only to increase the efficiency of equipment, but also to reduce the take-off weight of the machine. Information is given on the work performed by the staff of the Department of Technology and Control Systems in Mechanical Engineering in this direction.

**Keywords:** reliability, hollow balls, bearings, contact voltages, load capacity

Надежность в авиационной и космической технике играет наиважнейшую роль. Здесь нет места для ошибки, воздушное судно не получится остановить на обочине в случае поломки и заменить или отремонтировать вышедший из строя узел или деталь. Каждая деталь, начиная от якоря турбореактивного двигателя и заканчивая предкрылками самолета, должна

бесперебойно функционировать и отрабатывать расчетный ресурс. В не меньшей, если не в большей степени это касается и космических аппаратов. Особенно большое внимание уделяется подвижным шарнирным и подшипниковым узлам. Подбор подшипников для авиационной промышленности и космической техники – это очень ответственная задача. Так, в авиации применяется огромное количество подшипников самых различных типоразмеров. Они устанавливаются в валах двигателей, редукторах, климатических системах, электрогенераторах, гидравлических и топливных насосах, закрылках, приводах хвостового редуктора, гироскопах, датчиках наклона параболических антенн, шасси, системах управления и др. По некоторым данным, в современных самолетах используются до нескольких сотен различных подшипниковых узлов [1].

Подшипники для авиастроения и космической техники эксплуатируются в специфических условиях, и поэтому к ним предъявляются особые требования.

Так, тяжелые условия эксплуатации такой техники требуют создания подшипников, успешно справляющихся с воздействием как низких, так и высоких температур, с резким и быстрым их перепадом, влиянием коррозионной среды, экстремальными нагрузками, скоростями вращения до 100 000 оборотов в минуту и выше. И при этом необходимо уложиться в размерные параметры конструкции и ее требуемую массу. Последнее играет очень важную роль. Так, стоимость вывода на орбиту одного килограмма груза военной ракеты-носителя РС-18 («Рокот») превысила 15 тысяч долларов за один килограмм. Несколько меньше стоимость килограмма полезной нагрузки, выводимой на ракете «Союз-2». Она варьируется от 4,5 тыс. долларов за килограмм до почти 10 тысяч. Ракета-носитель «Зенит» выводила в космос грузы по цене в 3,5-4 тысячи долларов за один килограмм, и долгое время она считалась лучшей в классе [2]. Таким образом, уменьшение массы воздушного судна позволяет значительно снизить затраты на его запуск и эксплуатацию. Как видно из приведенной информации, Российской космонавтике и авиации требуются принципиально новые технологические решения – эффективные и менее затратные для заказчика. И одним из таких решений является использование облегченных узлов трения качения. В этом направлении не одно десятилетие работает конструкторская и технологическая мысль. Делаются попытки изготовить конструкции узлов качения с шариками из алюминиевых сплавов, различных керамических материалов, керамических шариков с напыленным металлическим покрытием, полых шариков, шариков с отверстиями для облегчения, полых колец подшипников и многое другое.

Наибольшее внимание привлекают работы исследователей в направлении изготовления для подшипников качения качественных полых металлических шариков. Кроме уменьшенной массы, а разница в массах со сплошными может достигать до 200-250 %, такие шарики позволяют обеспечить использующим их узлам качения и целый ряд других преимуществ.

Не отстает в этой сфере и СГТУ имени Гагарина Ю.А. Так, на кафедре «Технология и системы управления в машиностроении» (правопреемница кафедры «Технология машиностроения») уже не одно десятилетие ведутся работы над созданием как новых конструктивных разновидностей заготовок полых тел качения, так и новых технологий их обработки [3]. Сотрудники кафедры имеют немало авторских свидетельств и патентов на устройства и способы для абразивной обработки полых шариков, продолжаются работы над новыми технологиями их изготовления. Получен приоритет по заявке на изобретение полого шарика с нор-

мируемой жесткостью, что позволит при одних и тех же габаритах создавать шарики под различную величину нагрузки подшипникового узла. В настоящее время к работам в этом направлении присоединились исследовательские работы над созданием подшипников качества нового класса.

Как известно, в стандартных конструкциях шарикоподшипников в качестве тел качения используются сплошные шарики. При нагружении рабочими нагрузками эти шарики работают на контактную прочность. При этом (из-за низких допускаемых контактных напряжений) прочностные свойства конструкционных материалов не используются в полной мере. У подшипников с полыми телами качения лимитирующим видом рабочей нагрузки являются не контактные напряжения, а напряжения растяжения-сжатия, а величина этих напряжений, допускаемая конструкционными материалами, значительно выше, чем величина допускаемых контактных напряжений. Нагрузочная способность таких подшипников увеличивается по сравнению с аналогами не за счет повышения прочностных свойств конструкционных материалов, а за счет синергетического эффекта от повышения податливости шариков. Эффект заключается в том, что, в результате их упругой деформации, в процесс восприятия рабочей нагрузки включаются все тела качения, расположенные в направлении вектора силы нагружения, тогда как в подшипниках со сплошными шариками нагрузку воспринимают один-два из них. Кроме того, в случае использования полых шариков возможно конструктивными решениями создавать внутреннюю силовую структуру и обеспечивать рациональную величину их жесткости (податливости) с целью формирования оптимальных эксплуатационных параметров подшипника.

Возможности, предоставляемые использованием в подшипниках полых тел качения, позволяют сформировать новый класс подшипников – «беззазорные». Такие подшипники, в отличие от стандартных со сплошными шариками, позволяют многократно уменьшить величину вибраций, колебаний, шумов, делая их фактически вибростатичными (виброинертными), что, как известно, достигается в стандартных подшипниках только очень высоких классов за счет повышения точности изготовления их элементов и тщательной селекции при сборке. При этом отсутствие зазоров между кольцами подшипника и телами качения позволяет гораздо быстрее и более плавно перераспределять нагрузку между полыми шариками, что уже в момент запуска в работу узла позволяет избежать рывков, стуков, толчков машины или механизма. Кроме того, подшипники с полыми телами качения за счет уменьшения суммарной массы всех тел, имеют гораздо меньшую величину момента трогания и инерционности (времени торможения), что особенно актуально для работы оборудования в старто-стопном режиме с частыми изменениями нагрузки.

Где потенциально можно найти потребителей на подшипники нового класса? В России это, скорее всего, будут предприятия, выпускающие вертолеты и самолеты на заводах в Арсеньеве, Воронеже, Иркутске, Казани, Комсомольске-на-Амуре, Луховицах, Новосибирске, Нижнем Новгороде, Самаре, Смоленске, Таганроге, Ульяновске и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подшипники для авиации – Drive2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/497422634892394725> (дата обращения: 18.01.2021).



2. Какие новые разработки вернут России лидерство в космосе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vz.ru/society/2020/11/3/1068741.html> (дата обращения: 19.01.2021).

3. Определение погрешности наладочного размера при бесцентровом шлифовании шариков с врезной подачей ведущим кругом / О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин (и др.) // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 58-65.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Васин Алексей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexey N. Vasin** – Dr. Si .Tech., Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Изнаиров Борис Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Boris M. Iznairov** – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Решетникова Ольга Павловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Olga P. Reshetnikova** – PhD, Associate Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 15.02.21, принята к опубликованию 04.03.21*

**Г.К. Мулдашева, Н.В. Бекренёв, А.А. Казинский**

## **ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОРРОЗИОННО- И ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВАХ**

***Аннотация.** На основе анализа кинематики ультразвукового резания и термических эффектов в области режущего клина получены зависимости, позволяющие определять с достаточной точностью осевые силы ультразвукового сверления отверстий малого диаметра в высокопрочных труднообрабатываемых материалах и назначать допустимые повышенные осевые подачи по критерию продольной устойчивости сверла. Экспериментально определены рациональные значения амплитуды колебаний инструмента, позволяющие снизить силовые параметры резания на (25-27) %.*

***Ключевые слова:** авиационная и ракетно-космическая техника, труднообрабатываемые материалы, отверстия малого диаметра, ультразвуковое сверление*

**G.K. Muldasheva, N.V. Bekrenev, A.A. Kazinsky**

## **ULTRASONIC CHARACTERISTICS OF DRILLING SMALL DIAMETER HOLES IN HIGH-STRENGTH CORROSION-AND HEAT-RESISTANT ALLOYS**

***Abstract.** Based on the analysis of the kinematics of ultrasonic cutting and thermal effects in cutting wedge dependences allowing to determine with sufficient accuracy the axial power ultrasonic drilling small diameter holes in high-strength composite materials and assign a valid elevated axial feed on the criterion of the longitudinal stability of the drill. The rational values of the tool vibration amplitude were determined experimentally, which allow reducing the cutting force parameters by (25-27) %.*

***Keywords:** aviation and rocket and space technology, hard-to-work materials, small-diameter holes, ultrasonic drilling*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Общей тенденцией развития современного производства наряду с автоматизацией, широким внедрением компьютерной техники и аддитивных технологий является применение новых конструкционных материалов, обладающих разнообразными физико-химическими и механическими свойствами (высокая износостойкость; термостойкость и усталостная прочность; малый вес; способность сохранять свои свойства в различных сре-

дах, в том числе агрессивных; в условиях воздействия излучений; способность определенным образом отражать или напротив, поглощать электромагнитные излучения). В ракетно-космической и авиационной технике, а также ядерной энергетике, приборо- и агрегатостроении широко применяются высокопрочные, коррозионностойкие и жаропрочные сплавы на основе никеля, титана, вольфрама и молибдена. Начиная с середины XX века в авиаракетостроении стали применяться полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря их более высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и возможности формировать структуру и свойства материала практически одновременно с изделием [1-3]. Данная тенденция, согласно аналитическим исследованиям, сохранится и в перспективе [4, 5].

В то же время некоторые ведущие разработчики перспективной ракетно-космической техники, в частности Илон Маск, указывают на преждевременность полной замены высокопрочных сплавов на ПКМ в связи с невысокой термостойкостью и малой усталостной прочностью последних, что особенно важно при создании и эксплуатации многоразовых космических систем. Применение керамических и специальных композиционных плиток в американском Space Shuttle и российском «Буране» не обеспечивало оперативности их применения вследствие необходимости восстановления утерянной при приземлении значительной части покрытия. Немаловажное значение имеет значительно большая стоимость ПКМ в сравнении с нержавеющей стали, используемыми в конструкциях Big Falcon Rocket и Starship, соответственно – 135 долл./кг и 3 долл./кг [6].

Изложенное позволяет предположить, что длительное время как ПКМ, так и высокопрочные и жаростойкие стали, будут широко применяться в авиационной и ракетно-космической технике. Соответственно исследования по созданию высокоэффективных технологий обработки обеих групп материалов сохранят свою актуальность для науки и практики.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современном машино- и приборостроении широко применяются жаропрочные и нержавеющей стали и сплавы с большими значениями предела прочности ( $\sigma_B > 1000 \text{ Н/мм}^2$ ): ВНЖ, 36НХТЮ, ВТ-3, ВТ-5, легированные стали 40Х13, 12Х18Н10Т, 12ХМЮА и др. Типовыми представителями деталей из таких материалов являются элементы плунжерных пар и корпуса насосов топливной и гидроаппаратуры, детали пневмо- и гидро-распределительных устройств, корпуса изделий точной механики, соединительные элементы волоконно-оптических каналов передачи информации (рис. 1), применяемые в авиаракетостроении [7].

Детали, работающие при температурах 700...900°C, изготавливают из сплавов на основе никеля и кобальта (например, турбины реактивных двигателей). Никелевые сплавы преимущественно применяют в деформированном виде. Они содержат более 55 % никеля и минимальное количество углерода (0,06...0,12 %). По жаропрочным свойствам превосходят лучшие жаропрочные стали.

Увеличение жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов достигается упрочнением твердого раствора введением кобальта, молибдена, вольфрама. Основными материалами, которые могут работать при температурах выше 900°C (до 2500°C), являются сплавы на основе тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена, ниобия и других. Температуры плавления основных тугоплавких металлов: вольфрам – 3400°C, тантал – 3000°C, мо-

либден – 2640°C, ниобий – 2415°C, хром – 1900°C. Высокая жаропрочность таких металлов обусловлена большими силами межатомных связей в кристаллической решетке и высокими температурами рекристаллизации [7].

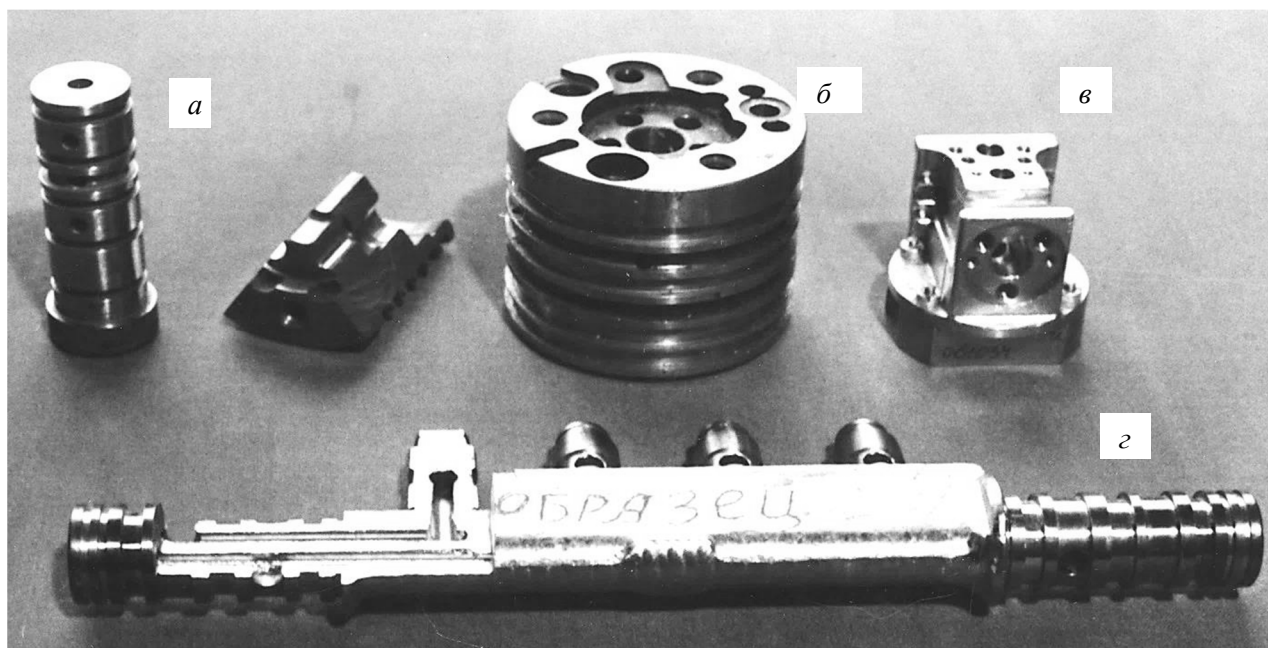


Рис. 1. Детали гидро- и пневмоаппаратуры из высокопрочных сплавов: гильза золотниковой пары (а), корпус аксиально-плунжерного насоса (б), корпус механического гиросприбора (в), разделитель пневмосети (г)

Основным технологическим недостатком описанных выше материалов является плохая обрабатываемость резанием, что вызывает необходимость при расчете режимов применять понижающие коэффициенты. Это, в свою очередь, приводит к повышению машинного времени или к существенному снижению стойкости инструмента и качества обработки.

Высокие упругие свойства вызывают увеличение момента трения, разогрев рабочей зоны и, как следствие, снижение стойкости режущих кромок и всего инструмента. Особенно затруднена обработка отверстий, имеющих диаметр менее 10 мм и длину более 5-10 диаметров.

Начиная с 60-х годов прошлого века, задача обработки высокопрочных конструкционных материалов в ряде стран (СССР, Япония, Германия, ЧССР) решалась путем сообщения режущему инструменту колебаний ультразвуковой частоты. В настоящее время исследования в данной области проводятся и в России. Исследования Л.Д. Розенберга, А.И. Маркова, В.Ф. Казанцева, М.С. Нерубая, Б.А. Аграната, В.Н. Хмелева, О.В. Абрамова, Б.Л. Штрикова, Е.С. Киселева, Нишимура, Дз. Кумабэ, а также одного из авторов данной статьи [8-17] позволили выявить основные закономерности воздействия энергии ультразвуковых колебаний на процессы механической (в том числе, финишной абразивной) обработки материалов, металлизации их поверхности и кристаллизации расплавов.

Выполненные ранее исследования этих и других отечественных и зарубежных ученых касались в основном разработки методов повышения производительности обработки, снижения шероховатости поверхности. При этом вопросы повышения стойкости инструмента для

ультразвуковой обработки, особенно концевой инструмента малого диаметра, рассматривались недостаточно подробно.

Проблемы сверления отверстий малого диаметра связаны в первую очередь с особенностями геометрии мелкогабаритных инструментов. С одной стороны, сверла диаметром 3-4 и менее мм характеризуются малой изгибной прочностью и продольной устойчивостью из-за малой площади поперечного сечения и, как следствие, его момента сопротивления, особенно инструмент для обработки глубоких отверстий с отношением длины к диаметру более 5. С другой стороны, мелкогабаритные сверла имеют относительно большую толщину сердцевины и размер перемычки по сравнению со сверлами больших диаметров. Малые размеры затрудняют подточку перемычки или делают это практически невозможной. Вследствие указанных причин осевая сила при обработке мелкогабаритными сверлами относительно выше, чем при сверлении инструментами больших диаметров. Это вызывает с учетом вышесказанного повышенные деформации сверла в поперечном направлении, изгиб и увод относительно заданной оси. С целью снижения указанного отрицательного эффекта обработку таким инструментом ведут при пониженных осевых подачах, что снижает производительность.

Все отмеченные трудности при сверлении малых отверстий еще более проявляются при обработке высокопрочных жаропрочных и коррозионноустойчивых сталей и сплавов вследствие их особых физико-механических свойств. Высокая прочность приводит к росту осевой силы и момента резания, адгезионная способность к инструментальным материалам – к интенсивному образованию нароста, схватыванию стружки с поверхностью канавок и ее пакетированию, вследствие чего трение по ленточкам дополняется трением между пакетированной стружкой и материалом стенок отверстия. Это дополнительно приводит к росту момента резания. Высокая упругость многих из указанных выше материалов приводит к повышению площади контакта по задней поверхности и росту трения и, в конечном счете, к увеличению износа режущих кромок, их затуплению и далее – катастрофическому износу сверла. Низкая теплопроводность некоторых из указанных материалов приводит в силу отмеченных причин к росту температуры в зоне резания и оттоку тепла в инструмент, что может привести, с одной стороны, к микросварочным процессам в контактной зоне и заклиниванию, с другой – к отпуску и разупрочнению режущих кромок.

В связи с отмеченными особенностями технологических процессов обработки деталей перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники постоянно ведутся научно-исследовательские работы по изучению физики резания данных материалов, оптимизации технологических схем и режимов, а также созданию более совершенного оборудования.

Приоритет в создании теории комбинированной ультразвуковой обработки резанием относительно пластичных, но прочных материалов принадлежит отечественной школе, сформировавшейся под руководством А.И. Маркова [15] (Московский авиационный институт – технический университет). За рубежом комплексные исследования технологических процессов ультразвукового точения, фрезерования, сверления и резьбонарезания, а также других процессов обработки выполнены под руководством Дз. Кумабэ [16] (Токийский университет).

Вышеизложенное с учетом того, что в перспективе в авиакосмической технике, наземном и водном транспорте предполагается применение еще более прочных и жаростой-

ких материалов (двигатели для гиперзвуковых летательных аппаратов), делает актуальным проведение исследований по совершенствованию ультразвуковых процессов и разработку технологий, инструмента и оборудования, обеспечивающих повышение эффективности и качества обработки перспективных высокопрочных материалов.

Цель данной работы состояла в обосновании и разработке технологических процессов и специального оснащения, обеспечивающих повышение эффективности и качества ультразвуковой обработки отверстий малого диаметра в высокопрочных жаростойких и нержавеющих сталях и сплавах за счет рационального выбора амплитудно-частотных характеристик колебаний инструмента с учетом сохранения его продольной устойчивости.

Нами предлагается на основе обоснованного А.И. Марковым механизма уменьшения сил резания вследствие термического действия ультразвука [15] следующая методика расчетного определения осевых нагрузок на колеблющийся с ультразвуковой частотой концевой инструмент с целью последующего использования для назначения рациональных режимов обработки и оценки точности процесса с учетом продольной устойчивости инструмента.

Рассмотрим зависимость осевой силы от внешних факторов на примере сверления. На сверло (рис. 2) в процессе резания при сообщении ему продольных ультразвуковых колебаний будут действовать постоянная осевая сила  $P_{oc} = C_P \cdot d \cdot S^{0,7}$  и переменная динамическая сила  $P_d = 16,6 \cdot A_{np}^{0,56}$  [15], где  $C_P$  – коэффициент силы резания,  $d$  – диаметр сверла,  $S$  – продольная подача,  $A_{np}$  – амплитуда продольных колебаний. При этом вследствие синусоидального характера колебаний в первом полупериоде динамическая составляющая, изменяясь от нуля до максимума и затем – до нуля, будет увеличивать нагрузку на сверло, во втором полупериоде, действуя в противоположном направлении, – уменьшать.

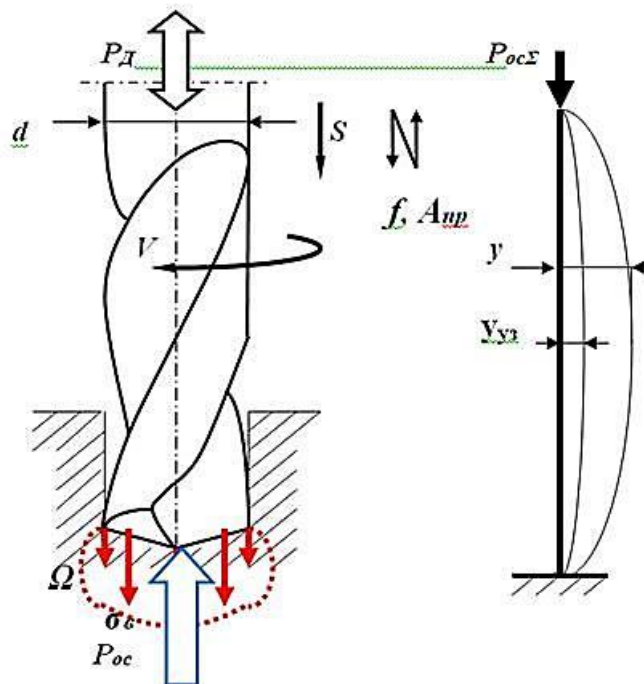


Рис. 2. Схема сил, действующих на сверло и потеря сверлом продольной устойчивости сверлом при обычной и ультразвуковой обработке

Для дальнейших выводов введем коэффициент термической эффективности ультразвука, равный  $\Delta_f = \sigma_{\epsilon\Omega} / \sigma_{\epsilon}$ . В этом выражении  $\sigma_{\epsilon}$  и  $\sigma_{\epsilon\Omega}$  – соответственно пределы прочности обрабатываемого материала при комнатной температуре и при температуре, вызванной ультразвуковым воздействием. Известны температурные зависимости физико-механических свойств материалов от температуры их нагрева, т. е.  $\sigma_{\epsilon\Omega} = F(\Omega)$  [17]. А.И. Марковым теоретически определена и экспериментально подтверждена зависимость мгновенной температуры в окрестности внедренного в материал индентора от интенсивности ультразвукового воздействия, определяемого амплитудой колебаний инструмента [15]. С учетом изложенного снижение предела прочности под режущими кромками инструмента, очевидно, будет пропорционально амплитуде ультразвуковых колебаний и приведет к облегчению стружкоотделения, уменьшению трения и, как следствие, снижению осевой силы, действующей на инструмент.

Таким образом, с учетом изложенного осевая сила сверления отверстий с сообщением инструменту ультразвуковых колебаний после принятия некоторых допущений и упрощений может быть определена по следующей зависимости:

$$P_{ОСЗ} = \sqrt{0,5 \left[ (C_P d S^{0,7} + 16,6 A_{np}^{0,56})^2 + (C_P d S^{0,7} - 16,6 A_{np}^{0,56})^2 \right]} \Delta_f . \quad (1)$$

Данная зависимость справедлива для случая, когда осевая сила резания превышает по величине динамическую силу. При работе с малыми подачами и применении ультразвука большой интенсивности возможно, что  $V_{пер} > V_{под}$ , т. е. во втором полупериоде колебаний происходит отрыв режущего клина от поверхности материала и осевая сила отсутствует. В этом случае суммарная осевая сила резания может определяться следующим образом:

$$P_{ОСЗ} = 0,707 (C_P d S^{0,7} + 16,6 A_{np}^{0,56}) \sqrt{\Delta_f} . \quad (2)$$

Предложенная методика оценки влияния ультразвука на силовые параметры сверления была проверена на примере обработки сплава ВТ3-1 ГОСТ 26492-85 с характеристиками:  $\sigma_{\epsilon} = 1180$  МПа,  $\lambda = 8,01$  Вт/м · град,  $C = 0,5$  Дж/кг · град. Температурная зависимость предела прочности сплава ВТ3-1 [18] достаточно точно аппроксимируется формулой  $\sigma_{\epsilon} = 37800 \Omega^{-0,8}$ . Расчетные режимы обработки были приняты согласно рекомендациям для сверления титановых сплавов: скорость резания  $V = 50$  м/мин, подача  $S = 0,005-0,08$  мм/об. В расчетах приняли сообщение сверлам диаметрами 2, 5 и 10 мм колебаний с частотой 22 кГц и амплитудами 2,5, 5,0 и 10,0 мкм.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Следует отметить эффект возрастания осевой силы при воздействии ультразвука малых и средних амплитуд на сверла малого диаметра при обработке с небольшими подачами (рис. 3а). Это может быть связано с тем, что при данных условиях динамическая составляющая осевой силы существенно превышает постоянную составляющую и вносит основной вклад в общую нагрузку на сверло. Этим может объясняться иногда наблюдаемый эффект снижения точности обработки и уменьшения стойкости концевой инструмента при воздействии ультразвука. В целом полученные расчетные данные хорошо согласуются с результатами экспериментов по ультразвуковому сверлению [10, 11], что свидетельствует о достаточной адекватности предложенной методики расчета осевой силы при ультразвуковом сверлении и полученных зависимостей.

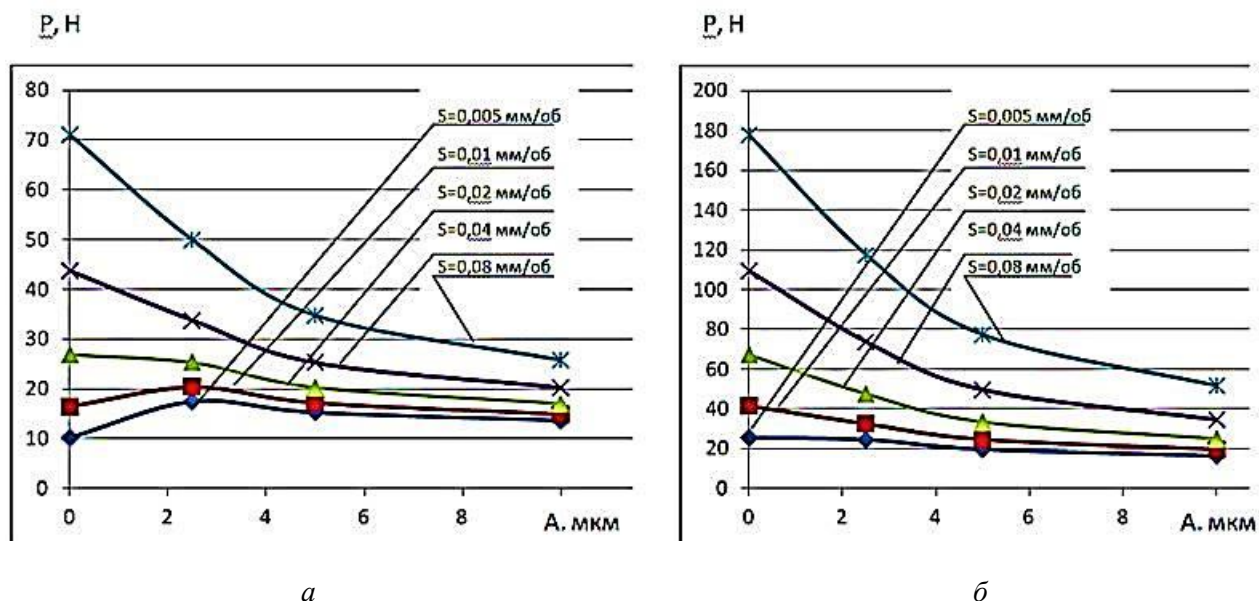


Рис. 3. Влияние осевой подачи инструмента  $S$  и амплитуды ультразвуковых колебаний  $A$  на осевую силу сверления отверстий диаметром 2,5 мм ( $a$ ) и 5 мм ( $b$ )

На основе выражений (1) и (2), исходя из очевидного соотношения

$$P_{OC\Sigma} \leq P_K, \quad (3)$$

где  $P_{OC\Sigma}$  – суммарная осевая сила при сверлении;  $P_K$  – критическая сила, определяющая продольную устойчивость сверла, получено выражение для максимально допустимой осевой подачи при ультразвуковом сверлении:

$$S = \frac{(388,8\sigma_B E^2 J^2 - 275,56A^{1,12} \sigma_{B\Omega} l^4)^{0,714}}{C_P^{1,43} d^{1,43} l^{2,86} \sigma_{B\Omega}^{0,714}}, \quad (4)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала сверла;  $J$  – момент инерции сечения сверла;  $l$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр сверла.

Сравнительные расчеты для случая обработки сплава ВТ3-1 спиральными сверлами диаметром 2,5, 5 и 10 мм показали возможность увеличения максимальной осевой подачи на (30-50) % при сообщении сверлу ультразвуковых колебаний. При этом из (4) следует вследствие сложной зависимости  $S$  от  $d$ ,  $l$  и  $A$ , что для каждого диаметра сверла существует предельная амплитуда колебаний, при превышении которой наблюдается потеря сверлом продольной устойчивости и требуется уменьшение значения осевой подачи. Этот факт может служить еще одним критерием назначения рациональных режимов ультразвукового сверления.

Проведены экспериментальные исследования силовых характеристик ультразвукового сверления отверстий малого диаметра в конструкционных материалах, обладающих повышенной вязкостью, с использованием компьютерного лабораторного комплекса с тензометрическими датчиками усилий и программным обеспечением LabView (ИП «Майоров», г. Орел).

Сверло закреплялось при этом в пьезокерамическом электромеханическом преобразователе, установленном на корпусе тензометрического датчика установки, цилиндрический



образец закреплялся в патроне настольного сверлильного станка 2Н106П. Стабильная осевая подача осуществлялась при помощи тарированного груза, закрепленного на рукоятке. Скрин-шот с экрана монитора установки представлен на рис. 4.

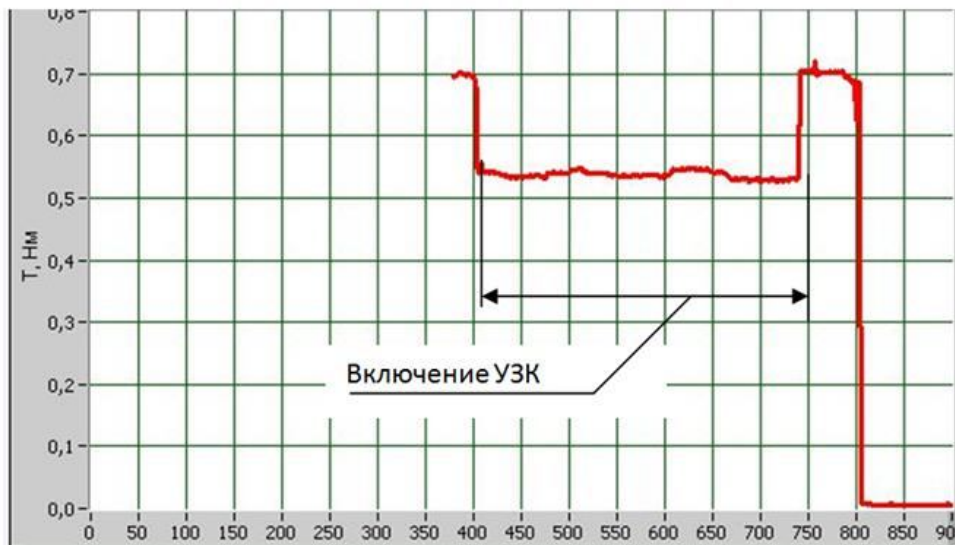


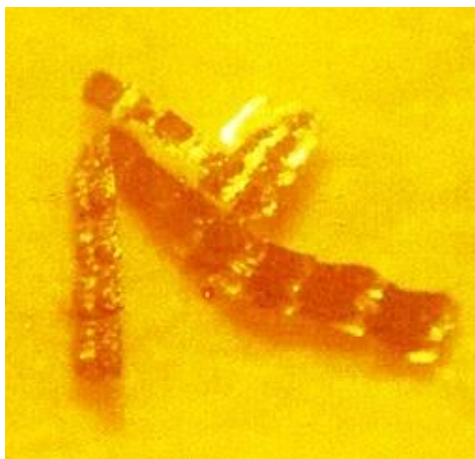
Рис. 4. Снижение момента резания сплава ВТ3-1 при сообщении инструменту ультразвуковых колебаний

Анализ результатов экспериментов позволил установить значимое влияние амплитуды ультразвуковых колебаний сверла малого диаметра (2,5 мм) на момент резания. Снижение указанного параметра составило при амплитуде 2, 5, 8, 10 и 15 мкм соответственно (8-10) %, (12-15) %, (15-18) %, (25-27) % и (38-40) %. В последнем случае зафиксировано ускоренное затупление режущих кромок, а на текущем графике изменения силы проявились периодические колебания ее значения в пределах 6-7 %, очевидно, вызванные сгенерированными автоколебательными процессами в системе. В принятых условиях эксперимента очевидно, что для сверла диаметром 2,5 мм рациональным значением амплитуды колебаний является 10 мкм.

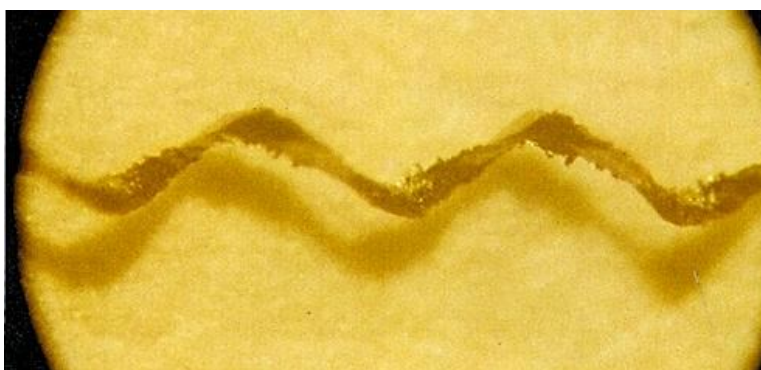
Были проведены эксперименты с переточенными сверлами (задний угол составлял 20°, 30°, 40°, 50°). Установлено, что увеличение заднего угла  $\alpha$  сверла вызывает снижение момента резания, при этом наилучшие результаты обеспечиваются при  $\alpha = 50^\circ$ . Снижение момента резания составило соответственно для сплавов Д16Т и Л62 45 % и 74 %, для сталей 12Х18Н10Т и 45-73 % и 70 %. Однако при этом наблюдалось выкрашивание кромок, особенно при обработке стали 12Х18Н10Т. На основании изложенного может быть рекомендована величина  $\alpha = 40^\circ$ .

Исследование формы стружек, образующихся при сверлении сверлами малых диаметров, выявило следующее.

При обычном сверлении труднообрабатываемых сплавов образуется сегментная стружка, спакетированная в канавках инструмента (рис. 5а), что увеличивает вероятность затирания и роста как температуры, так и момента резания. При ультразвуковом сверлении с рациональной амплитудой и подачей, определенными по (1) и (4), образуется спиральная сливная стружка (рис. 5б), легко эвакуируемая по канавкам инструмента.



*a*



*б*

Рис. 5. Форма стружки при обычном (*a*) и ультразвуковом (*б*) сверлении

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение температуры под вершиной режущего инструмента, совершающего ультразвуковые колебания, приводит к снижению предела прочности обрабатываемого материала, достаточному для уменьшения силы резания от 13 % до 3,5 раз в зависимости от условий обработки.

При использовании сверл малых (менее 5 мм) диаметров эффект ультразвука проявляется на больших продольных подачах. При малых подачах наблюдаются рост сил резания и потеря сверлом продольной устойчивости. По этой же причине увеличение амплитуд колебаний для сверл указанных диаметров более 2,5-3 мкм нецелесообразно. Для сверл больших диаметров существует однозначная зависимость повышения эффективности снижения сил резания с увеличением амплитуды колебаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.
2. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.

3. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers / S. Brinkmann et al.; ed. Hanser. 2006. 920 p.
4. Мировой рынок углеродного волокна [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-uglerodnogo-volokna>. (дата обращения: 26.02.2021 г.).
5. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.
6. Elon Musk. Why I'm Building the Starship out of Stainless Steel // Popular Mechanics. Jan, 2019.
7. Высокочечные коррозионностойкие стали в современной авиации / науч. ред. А.Г. Братухин. М.: Изд-во МАИ, 2006. 656 с.
8. Приходько В.М. Технологическое применение ультразвука в транспортном машиностроении. М.: Техполиграфцентр, 2007. 112 с.
9. Киселёв Е.С., Благовский О.В. Использование возможностей комбинированной ультразвуковой обработки для достижения заданных параметров качества поверхностного слоя деталей из титановых сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 1. С. 37-40.
10. Киселёв Е.С., Малышев В.И., Ковальногов В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин: монография / под ред. Л.В. Худобина. Тольятти, 2014.
11. Киселёв Е.С. Повышение эффективности механической обработки путем использования энергии маломощных модулированных ультразвуковых колебаний // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 6 (24), С. 3-13.
12. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines // Dynamics, Control and Applications. Springer, 2007. 330 p.
13. Асташев В.К., Разинкин А.В. Моделирование термомеханических процессов при ультразвуковом резании методом конечных элементов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 68-74.
14. Сидякин Ю.И., Агапов С.И., Салтан С.П. Основные показатели преимущества резания с использованием ультразвука // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. № 9 (47). С. 42-44.
15. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1968. 367 с.
16. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
17. Бекренёв Н.В., Протасова Н.В., Петровский А.П. Обоснование метода повышения эффективности ультразвуковой обработки конструкционных материалов на основе установления корреляции амплитудно-частотных параметров процесса и фрактальной размерности их структуры // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 3 (41). С. 23-27.
18. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.: под ред. Г.П. Фетисова. 6 изд., доп. М.: Высш. шк., 2008. 877 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Мулдашева Гузель Канаткалиевна** – соискатель кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Guzel C. Muldasheva** – PhD Candidate, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin Saratov State Technical University

**Бекренёв Николай Валерьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Nikolay V. Bekrenev** – Ph. D., Professor, Department Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin Saratov State Technical University

**Казинский Алексей Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, директор Института машиностроения, материаловедения, заведующий кафедрой «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Alexey A. Kazinskiy** – PhD, Associate Professor, Director: Institute of Mechanical Engineering, and Materials Science, Head: Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 20.01.21, принята к опубликованию 24.02.21*

**Т.Г. Насад, И.П. Насад, К.Т. Шеров**

## **ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Аннотация.* В статье представлено обоснование формирования качества поверхности деталей из труднообрабатываемых материалов. Рассмотрено влияние теплового фактора на формирование микрогеометрических характеристик при обработке труднообрабатываемых материалов, что позволяет управлять за счет регулировки технологических параметров качеством поверхности.

*Ключевые слова:* формообразование, труднообрабатываемые материалы, технические характеристики, качество поверхности, микрогеометрия, структура, тепловые процессы

**T.G. Nasad, I.P. Nasad, K.T. Sherov**

## **FORMING QUALITY CHARACTERISTICS OF A WORKPIECE SURFACE BY MEANS OF THERMAL EFFECTS**

*Abstract.* The article presents the substantiation of surface quality formation of parts from hard-to-process materials. Influence of thermal factor on formation of microgeometric characteristics during processing of hard-to-process materials is considered, which allows controlling quality of surface due to adjustment of technological parameters.

*Keywords:* shaping, hard-to-process materials, technical characteristics, surface quality, microgeometry, structure, thermal processes

### **ВВЕДЕНИЕ**

Эксплуатационная надежность машин и механизмов, изготавливаемых в машино- и приборостроении, в основном зависит от метода обработки и, соответственно, достигаемого качества поверхностей изготавливаемых деталей [1-6]. При выборе метода обработки следует учитывать наиболее значимые факторы, к которым относятся:

- тепловое воздействие;
- энергосиловые параметры;
- вибрации элементов технологической системы;
- схема формообразования и пр.

Традиционные методы обработки обычно сопровождаются вибрациями составляющих узлов станка, вызванными процессами трения отдельных элементов технологической системы из-за некачественного технического обслуживания и несвоевременного ремонта,

что негативно сказывается на формировании качества поверхности. Снижение уровня колебаний элементов станочной системы может быть достигнуто подналадкой автоматизированного комплекса и определением оптимальных режимов резания для конкретных групп материалов «инструмент-деталь».

Существенную роль играет и теплофизика процесса, так как температуры, возникающие в зоне резания, вносят свой вклад в формообразование поверхности, вызывая структурные изменения в поверхностном слое, снижение или повышение микронеровностей, образование растягивающих остаточных напряжений.

К наиболее значимым характеристикам нагрева относят: уровень максимальных температур нагрева; скорость нагрева и охлаждения; длительность пребывания поверхности в условиях высоких температур.

Контроль качества изготавливаемых машин и приборов позволяет оценить макро- и микрогеометрические характеристики, структуру и микротвердость изучаемого объекта. Сравнительный анализ оценки процесса формообразования и показателей качества поверхности, позволяет сформулировать наиболее эффективные принципы управления.

Известно, что большинство труднообрабатываемых материалов отличаются низкой обрабатываемостью по сравнению с конструкционными сталями и сплавами. Обрабатываемость резанием является технологической характеристикой материала, которая определяется комплексом его физико-механических свойств. Помимо химического состава, имеет значение вид термической обработки и ее режимы, которые определяют структуру поверхностного слоя. Часто резание труднообрабатываемых материалов характеризуется крайне малой пластической деформацией при стружкообразовании. Механическая работа затрачивается в основном на упругие деформации и трение заготовки о переднюю поверхность режущего инструмента. Нарост при обработке данной группы материалов, как правило, отсутствует, поэтому износ инструмента протекает достаточно интенсивно. Из-за высоких значений механических характеристик обрабатываемого материала возникают большие силы резания, при этом значения радиальной составляющей  $P_y$  превышают значения силы  $P_z$  в 2 и более раз. Учитывая все особенности формообразования труднообрабатываемых материалов, наиболее целесообразно их обрабатывать с использованием гибридных технологий.

### ИССЛЕДОВАНИЯ

Гибридные технологии в основном реализуются на гибридном оборудовании либо с использованием специальных методов.

Методы классифицируют:

- по виду энергии (механическая, электрическая, химическая, тепловая);
- способу подвода энергии (в зону резания, в заготовку на некотором расстоянии от зоны резания);
- виду физико-механического воздействия (пластическая деформация, плавление, испарение, анодное растворение, эрозионное разрушение);
- схемы формообразования (кинематическая схема обработки).

К основным процессам, протекающим последовательно или параллельно в зоне резания и оказывающим влияние на упрочнение (разупрочнение) поверхности при резании металлов, относят следующие:

- 1) слияние отдельных кристаллических решеток металла в маленькие блоки, состоящие из набора ячеек, дезориентированных друг относительно друга;
- 2) смещение амплитуды колебаний основных плоскостей решетки в сторону образования новой кристаллической решетки;
- 3) перемещение целых частей кристаллической решетки параллельно движению задней поверхности инструмента;
- 4) деформация ячеек или полный сдвиг всей решетки с изгибом ее плоскостей;
- 5) ориентирование кристаллов в определенном направлении на обратной поверхности детали.

Увеличение микротвердости (упрочнение) зависит от количества энергии, поглощаемой металлом при его пластической деформации.

Скрытая энергия  $E$ , накопленная при деформировании металла и работа  $A$  связаны между собой соотношением

$$\frac{dE}{dt} = \left( \frac{dE}{dA} \right) \left( \frac{dA}{dt} \right) + \left( \frac{dE}{dT} \right) \left( \frac{dT}{dt} \right).$$

Скорость выравнивания кристаллической решетки при резании металлов определяется выражением  $\frac{dE}{dT}$  и является функцией температуры рекристаллизации  $T$ . Если деформация кристаллов протекает при температуре выше температуры рекристаллизации, то величина  $\frac{dE}{dT}$  становится настолько значительной, что процессы протекают мгновенно и материал не успевает упрочниться.

Как правило, на величину шероховатости при гибридной обработке оказывают влияние такие основные факторы как геометрия рабочей части лезвия режущего инструмента и кинематика его рабочего движения; вынужденные колебания режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности; упругие и пластические деформации обрабатываемого материала в зоне контакта с режущим лезвием; микрогеометрия рабочей части режущего инструмента; адгезионные процессы в зоне контакта обрабатываемой детали и задней поверхности инструмента и его износ.

Первые четыре фактора вызывают образование систематической составляющей, которая имеет математическую интерпретацию. Пятый фактор вызывает образование случайной составляющей и определяет дисперсию параметров шероховатости, которую сложно описать математически. Полученная величина является результатом сложения всех перечисленных факторов и описывается выражением

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 = \sum_{i=1}^5 h_i$$

где  $h_1$  – составляющая высоты профиля, определяемая геометрией рабочей части инструмента;  $h_2$  – составляющая, обусловленная колебаниями режущего инструмента;  $h_3$  – составляющая высоты профиля, обусловленная пластическим отеснением материала заготовки;  $h_4$  – составляющая высоты профиля, формируемая под влиянием микрогеометрии режущего ин-

струмента;  $h_5$  – составляющая высоты профиля, формируемая под действием случайных факторов.

Методика расчетов составляющей  $h_1$  (высота профиля шероховатости, определяемая геометрией рабочей части инструмента и кинематикой движения элементов ТС) состоит в определении по формулам в зависимости от схемы обработки и определенных условий. Для точения, растачивания, торцевого фрезерования составляющая  $h_1$  определяется выражением

$$h_1 = \frac{r(1 - \cos\varphi)}{\cos\gamma} + \frac{tg\varphi tg\varphi_1 [S - r(\sin\varphi + \sin\varphi_1) - 2tg\varphi(\cos\varphi_1 - \cos\varphi)]}{\cos\gamma(tg\varphi + tg\varphi_1)},$$

где  $\varphi, \varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане;  $S$  – подача (мм/об при растачивании или мм/зуб при торцевом фрезеровании);  $r$  – радиус при вершине резца;  $\gamma$  – передний угол.

Составляющую высоты профиля шероховатости  $h_2$ , обусловленную колебаниями режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности, рассчитывают по формуле

$$h_2 = \frac{C_y S^y V^z [HB_{\max}^n t^x - HB_{\min} (t - R_{z\max})^z]}{HB_{cp}^n j_{mc} (1 - (\frac{\lambda}{\omega})^2 + T_n^2 \lambda^2)},$$

где  $t$  – глубина резания;  $V$  – скорость резания;  $\lambda$  – частота вынужденных колебаний ТС;  $\omega$  – собственная частота колебаний;  $T$  – постоянная времени демпфирования;  $C_y, y, x, z, n$  – коэффициенты и показатели степени в расчетной формуле для силы резания  $P_y$ ;  $j_{tc}$  – жесткость технологической системы.

Составляющую высоты профиля  $h_3$ , обусловленную пластическим оттеснением материала заготовки в зоне контакта с лезвием инструмента, рекомендуется определять по формуле

$$h_3 = \frac{0,5\rho(1 - \frac{2\tau_a}{\sigma_T})tg\varphi tg\varphi_1}{tg\varphi + tg\varphi_1},$$

где  $\rho$  – радиус скругления режущей кромки;  $\tau_a$  – прочность обрабатываемого материала на сдвиг;  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала.

Радиус скругления режущей кромки является величиной переменной, так как меняет свое значение в течение времени работы резца. Проведенные исследования показали, что радиус скругления режущей кромки  $\rho$  зависит от конкретных условий обработки и определяется механическими свойствами обрабатываемого материала и материала режущего инструмента. Для некоторых материалов среднее значение  $\rho$  приведено в табл. 1.

Таблица 1

Среднее значение  $\rho$  для различных материалов детали и инструмента

Обрабатываемый материал	сталь 45	сталь 40X13	сталь 20ХН3А	сталь 12Х18Н10Т
Материал РИ	T15K6	T15K6	T15K6	BK8
Значение $\rho$ , мкм	35	30	25	40



Сопротивление пластическому сдвигу  $\tau_a$  зависит от вида обрабатываемого материала и температуры в зоне резания. Экспериментально получено выражение, позволяющее определять значения  $\tau_a$ , которое имеет вид

$$\tau_a = \frac{500}{9,81(\exp(a(\frac{T+273}{100+b})+c))},$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 

Обрабатываемый материал	сталь 40X13	сталь 20XН3А	сталь 12X18Н10Т
Материал РИ	T15K6	T15K6	BK8
$a$	0,525	0,495	-0,699
$b$	-6,586	-5,986	-7,222
$c$	1,147	0,968	1,528

По итогам обработки профилограммы исследуемого процесса получена экспериментально-аналитическая модель шероховатости поверхности в зависимости от режимов резания и температуры подогрева снимаемого припуска.

Зависимость имеет вид

$$R_z = C_1 V^{-\alpha} S^{\beta} a_1^{\gamma} \Theta^{\lambda}.$$

Значения коэффициентов и показателей степени для различных материалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Обрабатываемый материал	$C_1$	$\beta$	$\gamma$	$\lambda$	$\alpha$
Сталь 40X13	0,97	0,46	0,23	0,16	0,28
Сталь 20XН3А	0,88	0,38	0,21	0,16	0,31
Сталь X18Н10Т	1,13	0,43	0,23	0,13	0,33

Экспериментально-аналитический метод определения шероховатости на основе профилограммы позволяет произвести гармонический анализ шероховатой поверхности и определить наиболее значимые частотные составляющие, которые формируются в процессе резания и наиболее вероятный источник их возникновения.

## ВЫВОДЫ

При воздействии высоких температур в процессе обработки шероховатость поверхности существенно снижается за счет повышения пластичности материалов, что дает возможность более точно копировать профиль режущего инструмента и исключить образование пластических заусенцев.

Исследования шероховатости после термического воздействия показали, что профиль характеризуется значительным удельным весом периодической составляющей, что позволяет причислить процесс гибридной обработки к управляемым. Таким образом, возможно улучшение показателей качества поверхности за счет регулирования режимов резания.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Управление качеством поверхности деталей машиностроения / Т.Г. Насад, А.Н. Васин, А.А. Казинский и др. // СТИН. 2018. Вып. № 7. С. 30-32.
2. Surface-layer quality after high-speed turning of hard material / I.E. Kiryushin, D.E. Kiryushin, S.B. Venig at al. // Russian Engineering Research. 2014. Т. 34. № 6. С. 423-424.
3. Benefits of high-speed milling / I.E. Kiryushin, D.E. Kiryushin, T.G. Nasad, S.B. Venig // Russian Engineering Research. 2012. Т. 32. № 1. С. 48-49.
4. Nasad T.G., Kochetkov A.V. Highly efficient methods of machining titanium for oil-gas drilling equipment // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Т. 52. № 3. С. 227-230.
5. Насад Т.Г. Износ лезвийного инструмента при высокоскоростной обработке с дополнительным тепловым воздействием // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2005. № 1 (6). С. 80-84.
6. Насад Т.Г., Шеров К.Т., Насад И.П. Теплофизические аспекты гибридных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 47-52.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Насад Татьяна Геннадиевна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Насад Ирина Павловна** – аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Шеров Карибек Тагаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Карагандинского государственного технического университета (Казахстан)

**Tatyana G. Nasad** – Dr.Sc. Tech., Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Irina P. Nasad** – postgraduate, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Karibek T. Sherov** – Dr.Sc. Tech., Professor, head: Department of Mechanical Engineering Technology, Karaganda State Technical University (Kazakhstan)

*Статья поступила в редакцию 21.01.21, принята к опубликованию 24.02.21*

**О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров,  
А.С. Топенева, А.Ф. Колесников**

## **СХЕМА БАЗИРОВАНИЯ ВАЛОВ И ЕЕ ПОГРЕШНОСТЬ ПРИ БЕСЦЕНТРОВОМ ШЛИФОВАНИИ С ВРЕЗНОЙ ПОДАЧЕЙ**

*Аннотация.* В статье показано, что при бесцентровом шлифовании валов возникает погрешность базирования по операционному размеру – диаметру вала. Определена погрешность наладочного размера при обработке цилиндрических деталей на бесцентрово-шлифовальных станках с врезной подачей шлифовальным кругом. Приведены результаты исследования приведенных математических зависимостей.

*Ключевые слова:* бесцентровое шлифование, вал, цилиндрическая поверхность, базирование, погрешность базирования, точность формы

**O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov,  
A.S. Topeneva, A.F. Kolesnikov**

## **A SCHEME FOR SHAFT LOCATING AND ERRORS UNDER CENTRELESS GRINDING WITH THE INFEEED**

*Abstract.* The article demonstrates that in the case of centerless grinding of shafts, there is an error of basing on the operational size – the diameter of the shaft. The error of the adjustment size is determined when processing cylindrical parts on centerless grinding machines with a mortise feed with a grinding wheel. The results of the study of the above mathematical dependencies are presented.

*Keywords:* centerless grinding, shaft, cylindrical surface, basing, basing error, shape accuracy

### **ВВЕДЕНИЕ**

Производство деталей высокой точности – задача сложная и трудоемкая, требующая особого подхода, особенно при серийном типе производства.

Одним из методов, позволяющих достичь высокой точности диаметральных размеров вала, является бесцентровое шлифование [1]. Наружным бесцентровым шлифованием производят обработку гладких и ступенчатых валов, наружных поверхностей деталей типа втулок и дисков, поверхностей сферических деталей [2]. Наладка бесцентрово-шлифовальных станков, на первый взгляд, не представляется сложной задачей. В условиях массового производства деталей применяется метод наладки станков с применением пробных партий [3]. Однако в условиях серийного производства этот метод экономически не целесообразен и зачастую применяться не может из-за ограниченного размера партии деталей, поступающих на обработку. Поэтому научные исследования, позволяющие теоретически обосновать целесообраз-

ную конфигурацию рабочей зоны и рациональные значения наладочных параметров при бесцентровом шлифовании деталей, являются актуальной задачей.

Схема базирования заготовок при их обработке бесцентровым шлифованием следующая: заготовки базируются по обрабатываемой поверхности. Затем в процессе обработки технологическая база постоянно обновляется, т. к. именно эта поверхность подвергается обработке.

При формировании операционного размера (требуемого диаметра) измерительной базой является центр заготовки. При этом технологическая и измерительная базы принципиально не могут быть совмещены. Более того, центр заготовки в процессе обработки на бесцентрово-шлифовальном станке постоянно смещается. Все это неизбежно приводит к возникновению погрешности операционного размера – диаметра детали [4].

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ НАЛАДОЧНОГО РАЗМЕРА ПРИ ОТРАБОТКЕ ВАЛОВ НА БЕСЦЕНТРОВО-ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ

В работе [5] определена погрешность базирования сферических деталей (шариков подшипников). Однако данная теория также может быть применена к деталям цилиндрической формы.

При обработке деталей цилиндрической формы, как и для сферических деталей, наладочным размером при бесцентровом шлифовании с врезной подачей шлифовального круга является не диаметр, а величина хорды  $C - C_1$  (см. рис. 1), соединяющей точки контакта обрабатываемой поверхности с поверхностями ведущего и шлифовального кругов. По окончании обработки эта хорда занимает положение  $C' - C'_1$ . Поэтому фактически выполняемым размером будет не диаметр сферы, а именно величина этой хорды [5].

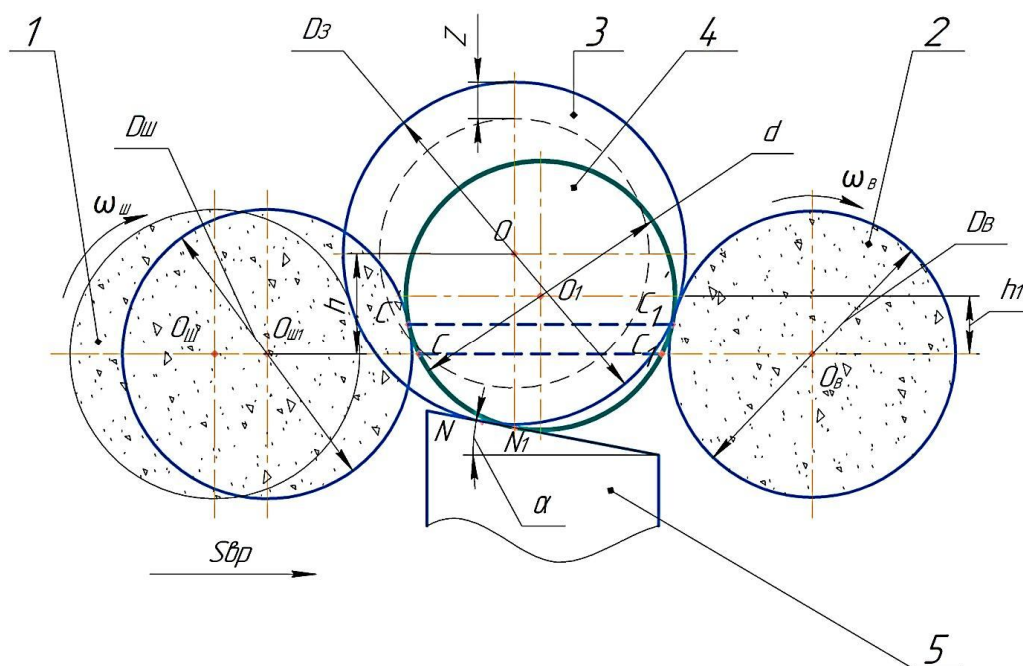


Рис. 1. Схема врезного бесцентрового шлифования цилиндрических деталей с врезной подачей шлифовального круга (1 – шлифовальный круг; 2 – ведущий круг; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – обработанная деталь; 5 – опорный нож)

В начальный момент обработки ось цилиндрической заготовки располагается выше, чем ось центров шлифовального и ведущего кругов на величину  $h$ . Примем, что образующие ведущего и шлифовального кругов имеют прямолинейную форму и параллельны друг другу. Измерительная база наладочного размера  $C - C_1$  смещается при съеме припуска на величину  $OO_1$ .

Центр заготовки при врезной подаче шлифовальным кругом дополнительно сместится в направлении ведущего круга в точку  $O_1$  (рис. 2).

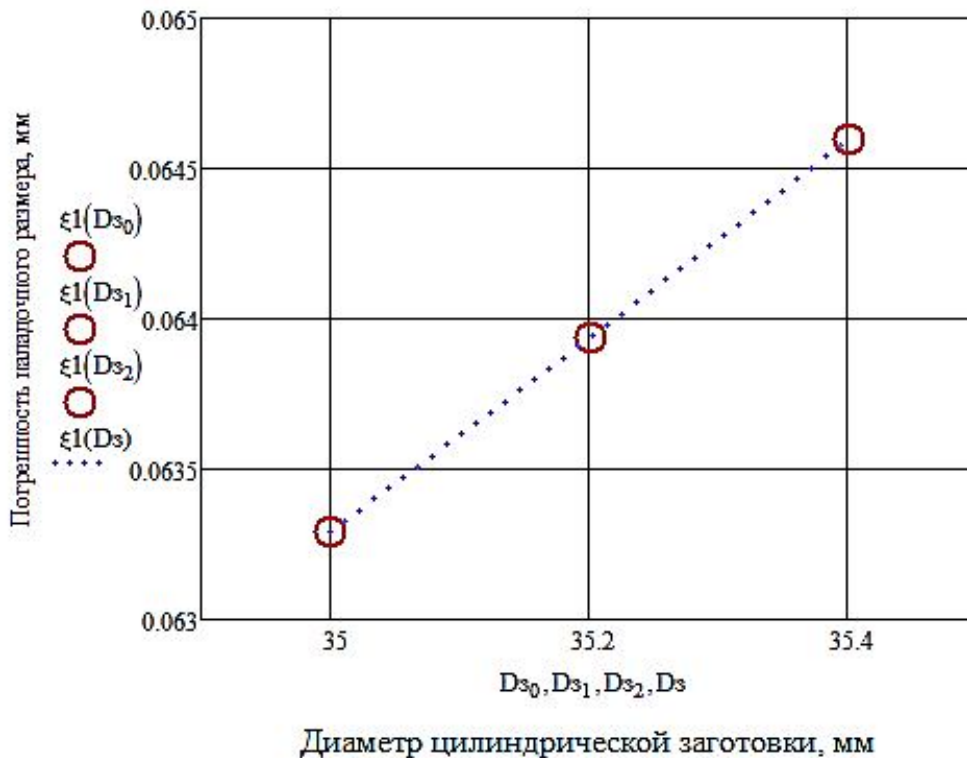


Рис. 2. Зависимость погрешности операционного размера при изменении диаметра заготовки вала

Данное обстоятельство приводит к возникновению погрешности операционного размера, которая представляет собой величину проекции смещения измерительной базы (центра кругового сечения) на направление наладочного размера  $C' - C'_1$ :

При обработке по схеме, изображенной на рис. 2, а именно при врезной подаче шлифовальным кругом, величина этой погрешности, определенная для сферических деталей в работе [5], будет справедлива и для деталей цилиндрической формы. Погрешность будет равна

$$\xi = 2 \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} - h_1^2} \cdot \frac{1}{(d + D_B)^2} - 2 \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} - h^2} \cdot \frac{D_3^2}{(D_3 + D_B)^2}, \quad (1)$$

где  $D_3$  и  $d$  – диаметр заготовки и диаметр готового вала соответственно;

$D_B$  – диаметр ведущего круга;

$h$  – величина превышения центра обрабатываемого вала над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов в начальный момент обработки;

$\alpha$  – угол скоса опорного ножа;

$h_1$  – величина превышения центра обработанного вала над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов после окончания обработки:

$$h_1 = \left( h - \frac{D_3 - d}{2} \right) \cdot (1 + \sin(\alpha)). \quad (2)$$

Определим погрешность операционного размера при обработке заготовки диаметром  $D_3 = 35$  мм до диаметра  $d = 34,5$  мм. Пусть  $D_B = 300$  мм,  $h = 10$  мм;  $\alpha = 30^\circ$ . Тогда расчет по формулам (1), (2) дает результат:  $\xi = 0,06329$  мм. Таким образом, погрешность наладочного размера весьма значительна и должна быть учтена при настройке бесцентрово-шлифовального станка.

Приведем график (рис. 2), показывающий изменение погрешности базирования в зависимости от диаметра заготовки вала при схеме обработки, приведенной выше.

Как видно из графика, при увеличении диаметра заготовки погрешность наладочного размера увеличивается.

Установим зависимость, показывающую изменение погрешности наладочного размера от диаметра ведущего круга (рис. 3).

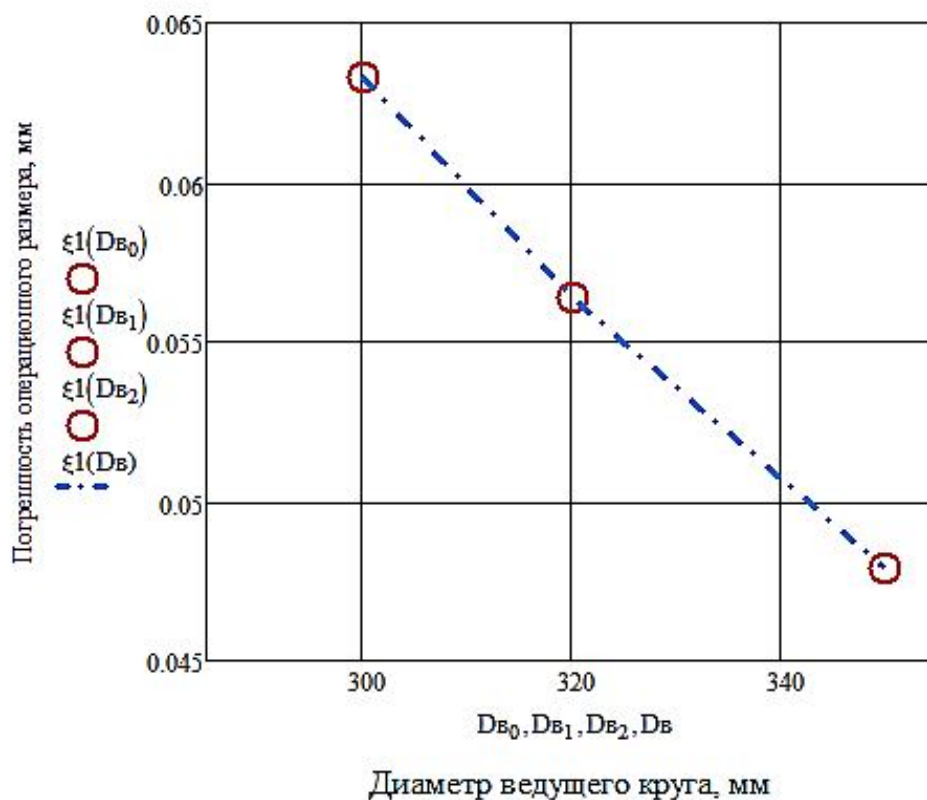


Рис. 3. Зависимость погрешности операционного размера при изменении диаметра ведущего круга

Как видно из графика, при увеличении диаметра ведущего круга погрешность наладочного размера уменьшается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены условия возникновения погрешности базирования, возникающей в процессе бесцентрового шлифования цилиндрических деталей типа валов при врезной подаче шлифовального круга.

Для уменьшения величины погрешности базирования необходимо совершенствовать схему бесцентрового шлифования деталей и принимать рациональные значения диаметра ведущего круга и величины превышения оси заготовки над плоскостью расположения осей ведущего и шлифовального кругов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров О.В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке: монография. Саратов: СГТУ, 2006. 152 с.
2. Слонимский В.И. Теория и практика бесцентрового шлифования. М.: Машгиз, 1952. 286 с.
3. Прохоров А.Ф., Константинов К.Н., Волков Л.П. Наладка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков. М.: Машиностроение, 1976. 192 с.
4. Байор Б.Н. Погрешность обработки, обусловленная несовпадением технологической и измерительной баз // СТИН. 2001. № 2. С. 25-26.
5. Определение рациональных параметров рабочей зоны при бесцентровом шлифовании / О.П. Решетникова [и др.] // Научные технологии в машиностроении. 2020. № (107). С. 23-28.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Решетникова Ольга Павловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Olga P. Reshetnikova** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Изнаиров Борис Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Boris M. Iznairov** – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Control Systems Technology in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

## **Машиностроение и машиноведение**

---

**Топенева Альбина Серкалиевна** – магистрант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Albina S. Topeneva** – Master Student, Department of Control Systems and Technologies in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Колесников Александр Владимирович** – инженер ООО «Сфера-Авиа», г. Саратов

**Alexander V. Kolesnikov** – Engineer at ООО Sphere-Avia, Saratov

*Статья поступила в редакцию 01.02.21, принята к опубликованию 01.03.21*



# МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

УДК 621.77

**И.С. Головков, С.К. Сперанский,  
В.И. Проскуряков, Н.А. Вавилина**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МИКРОТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ С НАЛИЧИЕМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫХОДНЫХ ВЕЛИЧИН**

*Аннотация.* В статье показаны возможности системы MATLAB для статистической обработки экспериментальных данных на примере исследования механических свойств конструкционных материалов после упрочняющей обработки лазерным импульсным воздействием.

*Ключевые слова:* математическая статистика, коэффициенты регрессии, ковариация, корреляция, микротвердость, лазерные импульсы, интерфейсные компоненты

**I.S. Golovkov, S.K. Speransky, V.I. Proskuryakov, N.A. Vavilina**

## **DETERMINATION OF THE MICROHARDNESS DEPENDENCE THE SURFACE IS AFFECTED BY THE PULSE VOLTAGE DURING LASER HARDENING TREATMENT WITH THE PRESENCE OF ERRORS IN THE OUTPUT VALUES**

*Abstract.* The article shows the possibilities of the MATLAB system for statistical processing of experimental data on the example of studying the mechanical properties of structural materials after strengthening treatment by laser pulse action.

*Keywords:* mathematical statistics, regression coefficients, covariance, correlation, microhardness, laser pulses, interface components

### **ВВЕДЕНИЕ**

Научные исследования выполняются для получения самой разнообразной новой информации и преследуют различные цели. Одной из них является установление соотношений между различными количественными или качественными признаками и выраже-

ние этих связей в виде математических уравнений, полученных опытным путем, из экспериментальных данных.

Выбор общего вида подходящей зависимости в каждом конкретном случае индивидуален. Для установления формы связи прибегают к графическому методу. По экспериментальным данным в системе декартовых координат строят эмпирическую зависимость. По ее виду подбирают наиболее близкую теоретическую зависимость, уравнение которой известно. Это уравнение и принимается в качестве эмпирической формулы, определяющей соотношение между изучаемыми величинами. Выбрав, таким образом, наиболее подходящий вид формулы, определяют ее параметры.

Цель настоящей работы – применить возможности современных программных средств для определения и графического отображения статистических параметров результатов наблюдения, а также приложения их к конкретной инженерной практике. Например, зная технологические режимы, при которых получены теоретические зависимости, можно получать детали с прогнозируемыми механическими свойствами.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим совокупность статистических данных, описывающих зависимость микротвердости стальной подложки от напряжения импульсов при лазерной обработке поверхности (рис. 1).

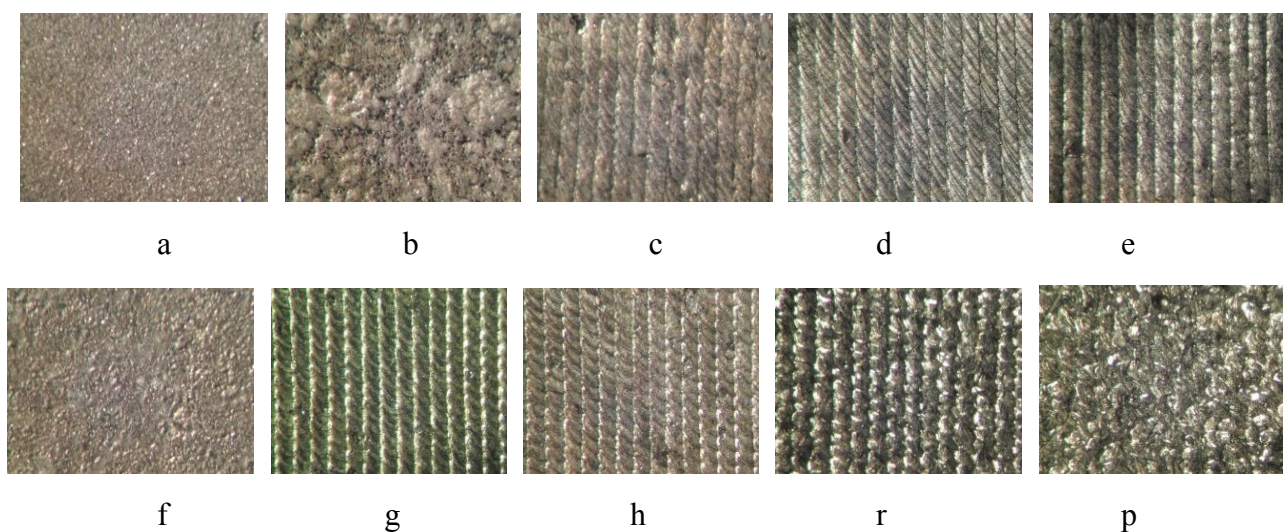


Рис. 1. Опытные стальные (12X18H10T) образцы после лазерной импульсной обработки поверхности при различных значениях напряжения импульсов: а-е – диаметр фокусного пятна 1 мм, а – 250 В; б – 300 В; с – 350 В; d – 400 В; e – 450 В; f – р – диаметр фокусного пятна 0,5 мм, f – 250 В; g – 300 В; h– 350 В; r – 400 В; p – 450 В

Исследования проводили на образцах нержавеющей хромоникелевой стали 12X18H10T [1-5]. В качестве легирующего материала использовался порошок диоксида титана с кристаллической решеткой анатаза дисперсностью  $\leq 25$  нм, который смешивался

с графитовой пастой для получения легирующей обмазки. Обмазка наносилась на поверхность образцов равномерно распределенным слоем толщиной 150-250 мкм. Обработку поверхности проводили при напряжении импульсов 250, 300, 350 и 400 В и длительности  $\tau$  импульсного воздействия 1 мс. Луч фокусировался в пятно диаметром 0,5 и 1 мм. Сканирование поверхности осуществлялось при частоте следования импульсов 10 Гц и коэффициенте перекрытия 0,25.

В результате измерения микротвердости модифицированной поверхности были получены данные, свидетельствующие о сильном влиянии величины напряжения лазерных импульсов на эффект упрочнения стальных образцов (табл.).

Результаты измерения микротвердости поверхности стали 12Х18Н10Т после лазерной модификации (таблица).

Режимы лазерной обработки		Микротвердость при нагрузке на индентор 1,96 Н, ГПа
d, мм	U, В	
0,5	250	2,41 ± 0,2
	300	3,65 ± 0,2
	350	6,31 ± 0,2
	400	5,04 ± 0,2
1,0	250	2,56 ± 0,2
	300	3,27 ± 0,2
	350	5,01 ± 0,2
	400	4,06 ± 0,2

Эти данные можно представить на графике, где каждой точке обработанного слоя соответствует экспериментально найденное значение микротвердости исследуемого образца от напряжения импульсов и фокуса пятна обработки.

Наибольшее распространение в практике математического моделирования получили полиномиальные аппроксимирующие функции различных степеней.

Если корреляционная связь линейна, то

$$y_i = b_0 + b_1 x_i,$$

где  $b_0, b_1$  – коэффициенты регрессии.

Построенная прямая регрессии должна наилучшим образом описывать эмпирические данные, т. е. коэффициенты должны быть такими, чтобы случайные отклонения были минимальны. Так как эта сумма зависит от коэффициентов, то можно записать

$$F(b_0, b_1) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_i - b_0)^2.$$

Наиболее распространенным методом нахождения коэффициентов уравнения регрессии является метод наименьших квадратов (МНК). В соответствии с этим методом коэффициенты выбираются так, чтобы сумма квадратов отклонений была минимальной.

Для минимизации функции приравняем к нулю ее первые производные, поскольку необходимым условием существования минимума данной функции двух переменных является равенство нулю ее частных производных по неизвестным параметрам:

$$\frac{\partial F(b_0, b_1)}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_i - b_0) x_i = 0;$$

$$\frac{\partial F(b_0, b_1)}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x_i - b_0) = 0.$$

После преобразования получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i; \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \end{cases}$$

Полученная система нормальных алгебраических уравнений в регрессионном анализе обычно решается по правилу (методу) Крамера.

В качестве числовой характеристики степени точности статистических зависимостей между случайными величинами принято использовать коэффициент корреляции  $r$ , который принято рассчитывать по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{K_{xy}}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}},$$

где в числителе стоит корреляционный момент или коэффициент ковариации, а в знаменателе среднеквадратические отклонения отдельных измерений  $x_i, y_i$  от среднеарифметических значений по результатам всех измерений.

При аппроксимации результатов измерений полиномами более высоких степеней применим подобный способ.

В практике статистической обработки экспериментальных данных считают, что при  $r < 0,3$  корреляционная связь между  $x$  и  $y$  слабая, при  $0,3 < r < 0,7$  – средняя и при  $r > 0,7$  – сильная. Этот коэффициент представляет собой относительную количественную характеристику разброса случайной величины  $y$  от соответствующих ординат осредненного графика. Если  $r < 0,5$ , то не целесообразно использовать линейную функцию, а можно попробовать найти квадратичную функцию, коэффициенты которой также находят методом наименьших квадратов:

$$\bar{y}_i = b_0 + b_1 x_i^2.$$

При анализе результатов эксперимента возникает необходимость отображения на экране одновременно всех параметров, что ускорит принятие правильного решения по полученным данным. Была разработана прикладная программа в системе MATLAB, которая позволяет комплексно решить эту задачу [6-8].

Система MATLAB позволяет создавать оконные приложения, в которых широко представлены средства управления отображением графических объектов. На стадии программирования принудительно задаются параметры окна, поля графика и все интерфейсные компоненты. Предварительно дизайн окна предполагаемого приложения создается на бумаге в пикселях, а затем программно переносится на экран компьютера. Оконные приложения включают несколько окон, одновременно расположенных на экране. Для ввода и вывода данных оконные приложения предлагают редактируемые поля ввода и вывода символьной информации, а выделяемые прямоугольные области для отображения графической информации. В оконных приложениях используется большой набор типовых компонентов, обеспечивающих диалоговое взаимодействие с пользователем – кнопки, списки, индикаторы состояния различных процессов, рамки и т. д. Каждый интерфейсный элемент обладает заданным набором свойств, определяющих внешний вид и поведение компонента на стадии выполнения программы. В системе MATLAB предусмотрен динамический способ организации интерфейса с пользователем. Он заключается в том, что на стадии выполнения программы создаются те или иные графические объекты и их свойствам присваиваются соответствующие значения (рис. 2).

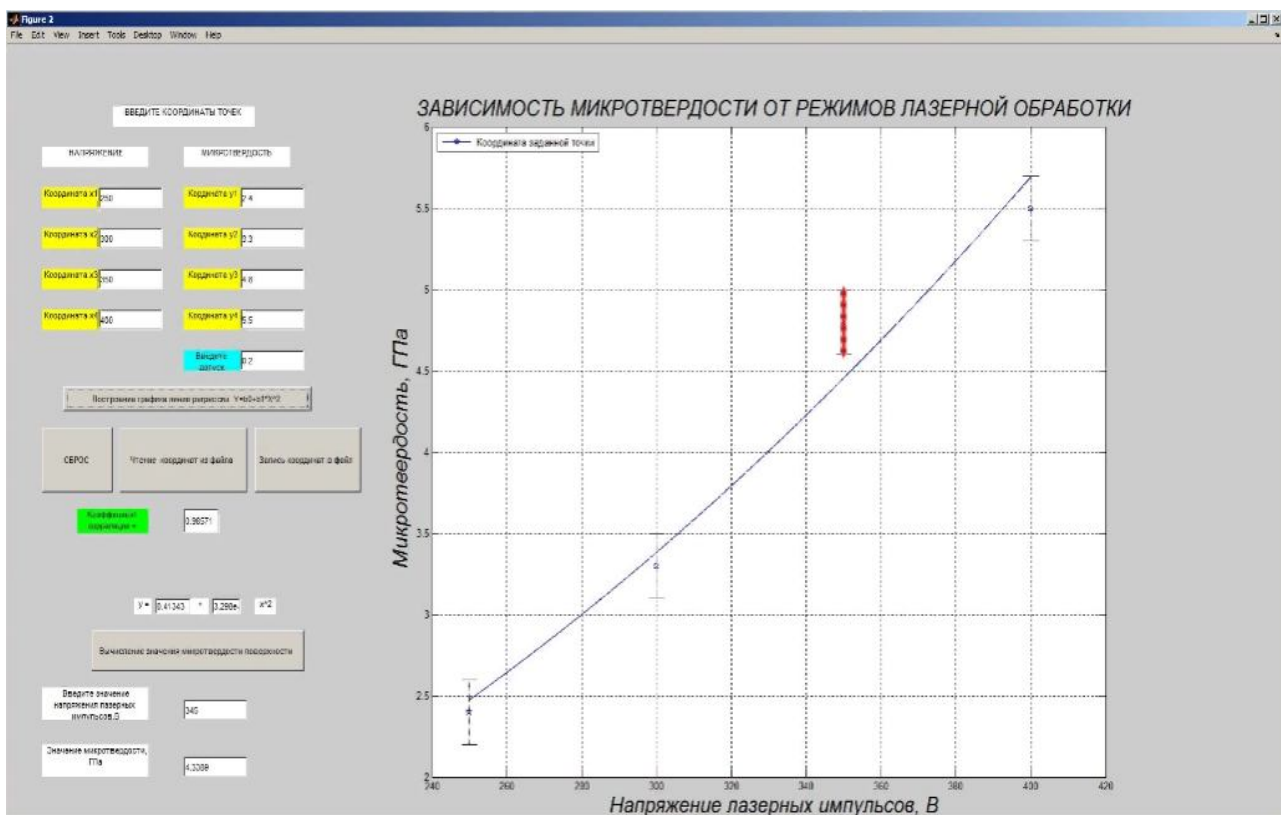


Рис. 2. Разработанный интерфейс для комплексного отображения статистических параметров микротвердости поверхности обработанных конструкционных материалов

Объекты класса «кнопка» снабжаются соответствующей надписью, располагаемой на ней. После ввода значений входных данных в редактируемых полях ввода и щелчка по соответствующе кнопке возникает событие, для обработки которого автоматически вызывается функция. При этом выполняется считывание содержимого текстовых окон и преобразование извлеченных строк в числовой формат. Находятся коэффициенты линии регрессии ( $b_0$ ,  $b_1$ ) с выводом их на экран, строится график линии регрессии.

Одновременно с этим находится коэффициент корреляции. Посредством интерфейса программы для построения зависимости микротвердости обработанного материала от напряжения лазерных импульсов заносятся значения погрешностей выходных величин, которые зависят от различных факторов (инструментальные, технологические, систематические погрешности).

Одним из возможных вариантов использования данной программы, помимо вычисления коэффициентов корреляции, является определение режимов обработки при которых возникают дефекты [9-13].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный интерфейс позволяет одновременно комплексно отображать статистические параметры результатов эксперимента и повысить эффективность определения механических свойств различных конструкционных материалов после лазерной упрочняющей обработки поверхности.

Разработанный интерфейс можно использовать для прогнозирования механических свойств материалов, модифицированных при различных режимах лазерной импульсной обработки.

*Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре – «Аспиранты»), проект № 19-33-90101.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов И.В., Проскуряков В.И. Лазерная модификация поверхности нержавеющей хромоникелевой стали 12Х18Н10Т в слое смеси графитовой пасты и нанодисперсного порошка анатаза // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 79-84.

2. Влияние состава обмазочного слоя на характеристики поверхности стали 12Х18Н10Т после лазерного импульсного легирования / В.И. Проскуряков, И.В. Родионов, Е.Л. Сурменко, Т.Н. Соколова // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4 (25). С. 101-106.

3. Proskuryakov V., Rodionov I., Borodina S. The effect of graphite coating on the composition, structure and microhardness of the surface of structural chromiumnickel steel during laser pulse processing // Journal of Physics: Conference Series (7<sup>th</sup> International School and 90

Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2020»). IOP Publishing, 2020. Vol. 1695. pp. 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012069.

4. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Исследование влияния состава легирующей обмазки на изменение структуры и микротвердости нержавеющей стали 12Х18Н10Т // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. 2021. № 2 (249). С. 88-92.

5. Проскуряков В.И., Родионов И.В. Лазерное импульсное легирование коррозионно-стойкой хромоникелевой стали 12Х18Н10Т с использованием графитовой пасты // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 5 (185). С. 224-228.

6. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 216 с.

7. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб. пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 288 с.

8. Губатенко В.П., Гуров В.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. Саратов: ООО Издательство «Научная книга», 2007. 236 с.

9. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 376 с.

10. Иванов В.Н. Математические модели и методы в расчетах на ЭВМ: лекции для студентов института механизации сельского хозяйства. Саратов: Саратов. с.-х. ин-т им. Н.И. Вавилова, 1991. 128 с.

11. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: пер. с англ. М.: Мир, 1985. 272 с.

12. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 752 с.

13. Плохотников К.Э. Вычислительные методы. Теория и практика в среде MATLAB: курс лекций: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 496 с.

14. Нитцце К. Испытания металлов: пер. с нем. М.: Металлургия», 1967. 366 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Головков Иван Сергеевич** –  
бакалавр  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Ivan S. Golovkov** –  
Bachelor  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

**Проскуряков Виталий Игоревич** –  
аспирант Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Vitaly I. Proskuryakov** –  
Postgraduate  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

**Сперанский Сергей Константинович** –  
кандидат технических наук, доцент  
Саратовского государственного техническо-  
го университета имени Гагарина Ю.А.

**Sergey K. Speransky** –  
PhD (Tech.), Associate Professor,  
Yuri Gagarin State Technical  
University of Saratov

**Вавилина Надежда Александровна** –  
ассистент Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Nadezhda A. Vavilina** –  
Assistant Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 29.01.21, принята к опубликованию 01.03.21*



**И.В. Злобина, Н.В. Бекренёв**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА  
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ  
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПУТЕМ СВЧ МОДИФИЦИРОВАНИЯ**

*Аннотация.* На примере сверления отверстий малого диаметра в отвержденном углепластике показано, что кратковременное воздействие СВЧ электромагнитного поля, предшествующее механической размерной обработке, способствует существенному повышению качества поверхности, выражающемуся в уменьшении поверхностных и кромочных дефектов. При этом на (10-33) % в зависимости от плотности потока СВЧ энергии при модифицировании сокращается время сверления, что позволяет соответственно повысить производительность обработки или время до переточки инструмента.

*Ключевые слова:* изделия из полимерных композиционных материалов, отвержденный углепластик, кромочные и поверхностные дефекты, сверление, СВЧ электромагнитное поле

**I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev**

**IMPROVING PRODUCTIVITY AND QUALITY  
OF MACHINING PRODUCTS FROM POLYMER COMPOSITES  
USING MICROWAVE MODIFICATION**

*Abstract.* Using the example of drilling small-diameter holes in cured carbon fiber, it is shown that short-term exposure to the microwave electromagnetic field, preceding mechanical dimensional processing, contributes to a significant improvement in surface quality, which is expressed in a reduction in surface and edge defects. At the same time, the drilling time is reduced by (10-33) %, depending on the density of the microwave energy flow during modification, which allows to increase the processing productivity or the time to re-flow the tool accordingly.

*Keywords:* products made of polymer composite materials, cured carbon fiber, edge and surface defects, drilling, microwave electromagnetic field

### ВВЕДЕНИЕ

В современных летательных аппаратах различного назначения, включая авиационную и ракетно-космическую технику, широко применяются в несущих конструкциях и обшивке, а также как средства баллистической защиты, полимерные композиционные материалы (ПКМ) на терморепактивной и термопластичной матрице, армированные тканями на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон.

Как свидетельствуют материалы аналитических обзоров, эта тенденция сохранится в ближайшей и отдаленной перспективе [1, 2]. Повышенный интерес разработчиков перспективных транспортных систем к ПКМ определяется рядом их существенных преимуществ перед металлами и сплавами: высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, возможность конструирования и изготовления материала одновременно с изделием, что позволяет создавать так называемые «интеллектуальные» материалы путем встраивания в структуру датчиков и активных элементов, и др. [3-6].

В технологических процессах изготовления изделий из композиционных материалов значительное место занимают финишные операции размерной и отделочной обработки: кромочная, образование отверстий, крепежных и стыковочных пазов и базовых точных поверхностей, разделение, выполняющиеся методами резания лезвийным и абразивным инструментом.

При сборке элементов из ПКМ значительное место занимают традиционные механические соединения типа заклепочных при помощи соответствующих металлических креплений [7]. Типовые конструкции из ПКМ с механически образованными поверхностями представлены на рис. 1.

Неоднородность структуры как пултрузионных, так и отвержденных формованных угле- и стеклопластиков [5, 6], состоящих из относительно мягкой и вязкой матрицы и высокотвердых нитевидных армирующих структур, отличающихся повышенными абразивными свойствами, приводит к крайне неравномерному процессу удаления стружки при обработке данных материалов резанием и быстрому затуплению и износу инструмента. Это вызывает увеличение сил резания и преимущественное разрушение матрицы. Армирующие структуры, освобожденные от связующего, «распушиваются» и выдавливаются на периферию зоны обработки, нарушая качество поверхности и точность ее формы. Указанный результат обработки вызывает необходимость повторного связывания отделившихся от монолита волокон компаундами с последующей их ручной зачисткой, что увеличивает трудоемкость и снижает качество изготовления изделий [8-13]. Производители режущего инструмента, в частности фирма Sandvick, рекомендуют для повышения качества обработки углепластиков использовать инструменты особой геометрии со специальным покрытием, высококачественные твердые сплавы, адаптивное управление режимами и циклом обработки с использованием интеллектуальных систем управления оборудованием.

В современных условиях, когда к России применяются санкционные действия, а также в интересах снижения технологической зависимости и импортозамещения актуально изыскание альтернативных путей повышения качества обработки армированных композиционных материалов, не требующих сложного и дорогостоящего зарубежного оборудования, инструмента и закупки лицензий на технологии.

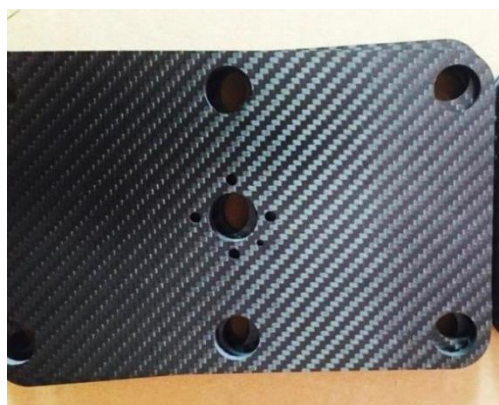


Рис. 1. Типичные изделия из углепластика с механически образованными поверхностями

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Один из подходов к улучшению качества обработки композиционных материалов может заключаться в модифицировании структуры окончательно сформированных изделий в СВЧ электромагнитном поле. Материалы ряда исследований авторов данной статьи [14, 15] свидетельствуют о повышении прочности подвергнутых СВЧ обработке армированных углеродными волокнами образцов на 14-25 %. Анализ возможного механизма повышения прочности с учетом исследования микроструктуры материалов [16] показывает, что СВЧ воздействие способствует формированию новых многочисленных участков контакта элементов матрицы и волокон, а также повышению прочности материала матрицы. Это может способствовать затруднению отделения волокон от матрицы при механической обработке, сближению механики разрушения матрицы и волокон и в конечном итоге – к уменьшению дефектов обработанной поверхности (разориентирования, или «распушивания» и др.).

Целью исследований явилось определение возможности использования СВЧ обработки отвержденного углепластика для улучшения его обрабатываемости и снижения дефектов поверхности.

## Металлургия и материаловедение

---

Проведены экспериментальные исследования сверления отверстий в углепластике производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга. Использовали образцы размерами 70×30×5 мм. СВЧ обработку осуществляли на экспериментальном оборудовании (рис. 2), созданном на базе установки «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.). Плотность потока энергии устанавливали равной  $(10-12) \cdot 10^4$ ,  $(17-18) \cdot 10^4$  и  $(40-50) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>, время воздействия – 2 минуты.



*a*



*б*

Рис. 2. Экспериментальная установка на базе СВЧ излучателя «Жук-2-02»  
Общий вид (а), образец, закрепленный на столе (б)

Сверление образцов проводили на настольном сверлильном станке 2Н106П сверлами  $\varnothing 5,0$  с углом при вершине  $2\varphi = 90^\circ$  и стандартной заточкой по углам  $\gamma$  и  $\alpha$ . Число оборотов сверла  $n = 350$  об/мин; осевая сила подачи  $P_{oc} = 20$  Н обеспечивалась гравитационным способом при помощи тарированного груза.

С целью исключения влияния затупления кромок сверла на показатели обработки различных образцов сверление проводили с чередованием: одно отверстие в контрольном образце, одно – в опытном. Дополнительно фиксировали время сверления на проход инструмента.

Рассматривали кромки на входе и выходе отверстия при малом ( $\times 7$ ) и большом ( $\times 40$ ) увеличении при помощи оптического микроскопа МБС и цифрового микроскопа Bresser LCD MICRO 5MP.

При этом образец поворачивали, фотографируя последовательно различные сектора отверстия до прохождения полного оборота. Входную кромку рассматривали в отраженном свете, выходную – в проходящем с одного установка, чтобы не нарушить соответствие обработанных участков отверстия.

Изучали форму стружки, образовавшейся при сверлении контрольного и обработанных образцов углепластика. Оценивали размеры фрагментов стружки и их форму. Анализ кромок отверстий при увеличении  $\times 7$ , полученных при обработке контрольных и модифицированных образцов, показал следующее.

На выходе инструмента при сверлении контрольного образца образуется значительный (высотой до 1 мм) выступ из выдернутых сверлом волокон, в отверстии присутствуют закрывающие его просвет сохранившие целостность волокна.

Для опытного образца характерно уменьшение высоты выступа более чем в 2 раза и практически чистое отверстие с гладкими стенками. При указанном увеличении не удается выявить отличий во внешнем виде и состоянии кромок, обработанных при различной плотности потока энергии.

При увеличении  $\times 40$  отличия кромок становятся заметны (рис. 3).

У контрольного образца кромка по всей окружности отверстия крайне неоднородная по внешнему виду: наряду с относительно ровной поверхностью наблюдаются значительные по длине конгломераты волокон, отдельные волокна и разрушенные агломераты матрицы (рис. 3а). Кромки отверстий, просверленных в образцах, подвергнутых предварительному воздействию СВЧ электромагнитного поля с плотностью потока энергии  $(10-12) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> – ровные на большем протяжении, конгломераты волокон короче в 2-3 раза, однако отмечаются регулярно.

Отмечаются отдельные волокна (рис. 3б). Наименьшие дефекты имеют кромки отверстий, просверленных в образцах после обработки с плотностью потока энергии  $(17-18) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> (рис. 3в). Кромки чистые, лишены остаточных конгломератов волокон на всем протяжении, также не отмечаются длинные отдельные волокна. Заметны короткие (в 5-6 раз меньшей длины по сравнению с контрольными) волокна и отдельные каверны вырывов матрицы (второе снизу фото на рис. 3в). Кромки отверстий, просверленных после обработки углепластика с плотностью потока энергии  $(40-50) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>, имеют сходный вид, однако отличаются значительным количеством вырывов и местных повреждений матрицы в виде объемных потерь материала (рис. 3г).



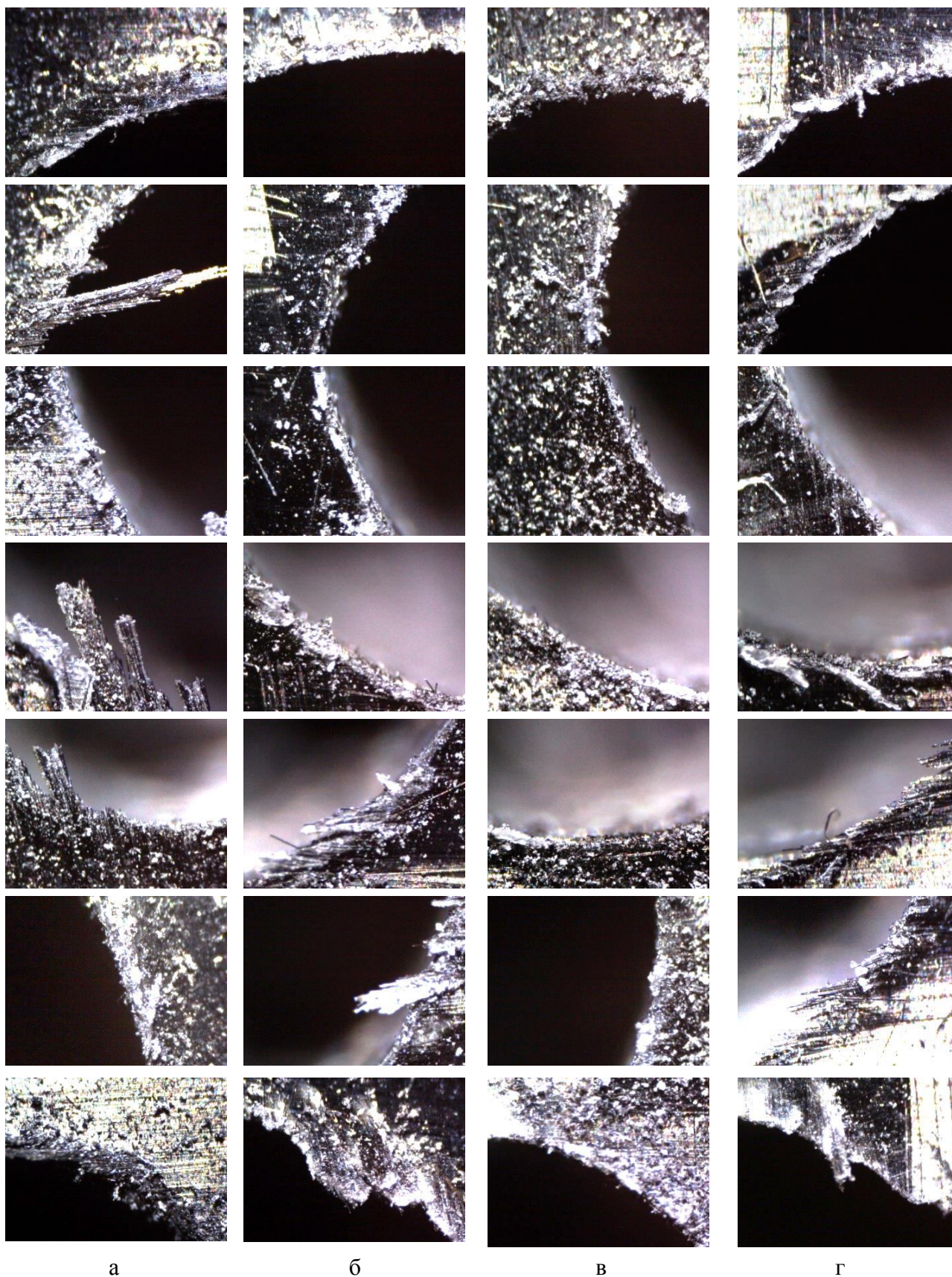


Рис. 3. Входная кромка отверстия, просверленного в образце углепластика: контрольном (а), обработанном с ППЭ  $(10-12) \times 10^4$  (б),  $(17-18) \times 10^4$  (в),  $(40-50) \times 10^4$  (г) мкВт/см<sup>2</sup>

На рис. 4 представлена стружка, образовавшаяся после сверления контрольных и обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов с различной плотностью потока энергии.

Видно, что во всех случаях стружка представляет собой бесформенные частицы матрицы различного размера. При этом в стружке контрольного образца практически не удается выделить фрагменты углеродных волокон, а сама стружка образована крупными (от 1 до 1,5 мм) частицами вытянутой формы.

Стружка сверления образцов после воздействия СВЧ электромагнитного поля с ППЭ  $(40-50) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> – мелкодисперсная с размерами частиц менее 0,5 мм. В частицах присутствуют в виде вкраплений в большом количестве короткие фрагменты волокон. Частицы стружки сверления образцов после воздействия СВЧ электромагнитного поля с ППЭ  $(17-18) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> имеют средние размеры (0,5-0,8 мм), в них присутствуют фрагменты срезанных волокон. Стружка сверления образцов после воздействия СВЧ электромагнитного поля с ППЭ  $(10-12) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> имеет размеры, мало отличающиеся от частиц стружки сверления контрольного образца (0,9-1,2 мм), однако в частицах присутствуют фрагменты углеродных волокон. Частично в объеме стружки отмечаются отдельные срезанные и сломанные волокна.

Одним из объяснений такого эффекта может быть повышение прочности механических и физических связей волокон и матрицы, увеличение областей контактного взаимодействия и выявленного нами [14-16] уменьшения размеров пор и надмолекулярных образований (кристаллических фрагментов) структуры матрицы, что приводит к повышению монолитности модифицированного ПКМ в отличие от контрольных образцов, представляющих собой крайне неравнопрочные образования в виде упругих твердых волокон, связанных структурой матрицы с дефектным межфазным слоем (МФС). Результатом СВЧ воздействия является также повышение прочности самой матрицы, что выравнивает процесс резания по объему материала, в том числе стабилизирует силы резания и процесс стружкообразования, и обеспечивает срезание волокон без их выдергивания из объема материала и, как следствие, повышение качества обработанной поверхности. С увеличением плотности потока СВЧ энергии указанные явления усиливаются, что способствует получению чистых кромок (рис. 3в).

При больших значениях ППЭ, вызывающих чрезмерный нагрев матрицы и ее, как минимум, частичное расстекловывание происходит стягивание матрицы и волокон в МФС вследствие возросшей возможности звеньев больших молекул к конформационным поворотам по причине релаксации внутренних термических напряжений, возникших при формировании ПКМ.

После доотверждения новая структура приобретает повышенную твердость. В результате наряду с относительно равномерным процессом резания матрицы и волокон начинается выкрашивание кристаллической фазы радиальными и тангенциальными силами, вызывающими сдвиговые напряжения. Так образуются каверны и лунки, нарушающие форму кромок и морфологию поверхности отверстия (рис. 3г).

Выкрашивание элементов кристаллической фазы формирует мелкодисперсную стружку скола. По мере снижения ППЭ данный эффект уменьшается, более дефектная аморфная матрица отделяется более крупными пластически деформированными фрагментами, что зафиксировано на рис. 4.



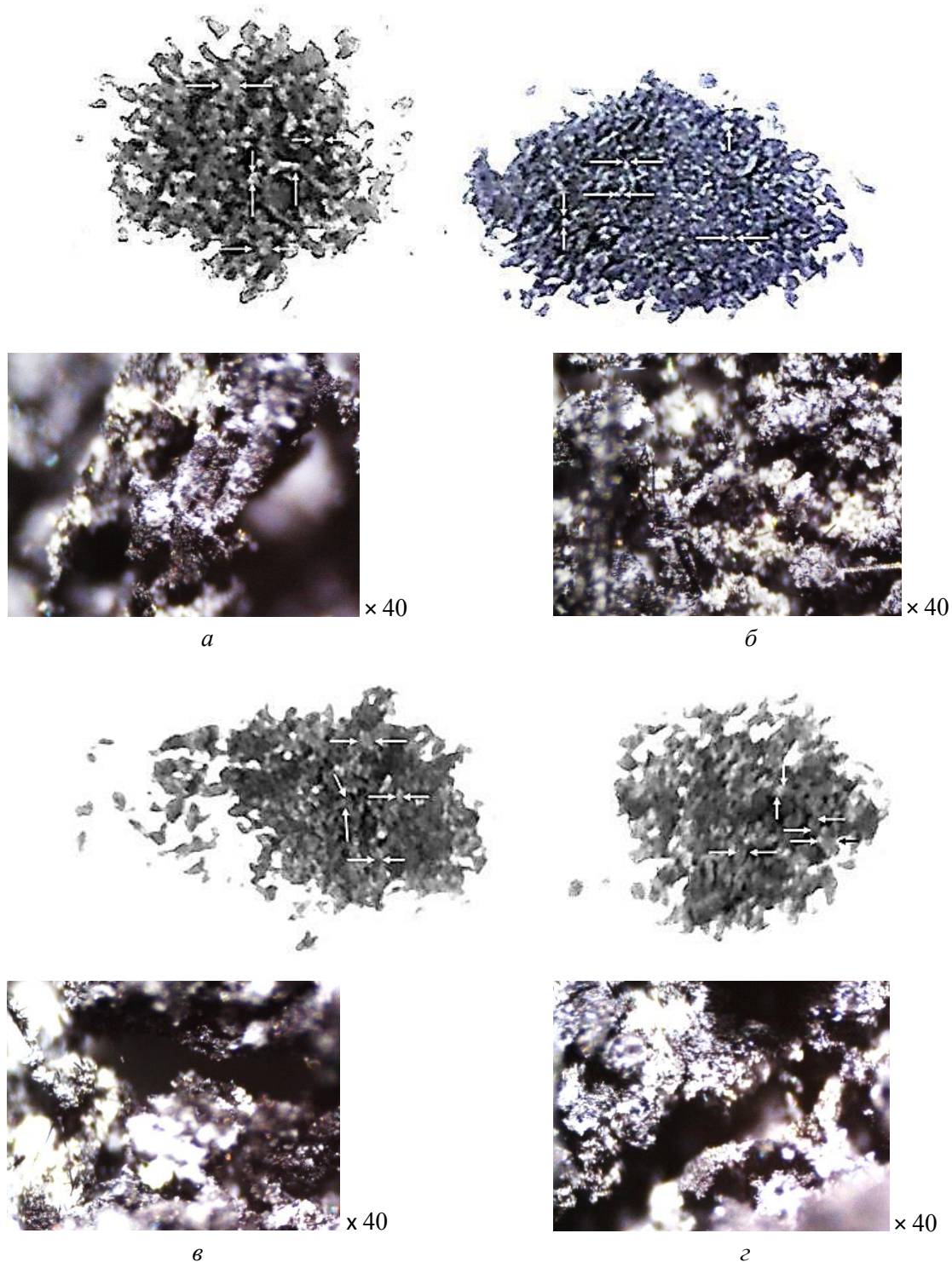


Рис. 4. Стружка, образовавшаяся при сверлении углепластика: контрольный образец (а); обработанный в СВЧ электромагнитном поле с плотностью потока энергии  $(40-50) \cdot 10^4$  (б),  $(17-18) \cdot 10^4$  (в),  $(10-12) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> (г)

Изменение механических свойств и структуры матрицы, а также прочности контактного взаимодействия в области «матрица – волокно» оказывает влияние не только на качество обработанной поверхности углепластика, но и на процесс резания, что проявляется в изменении времени сверления (рис. 5).



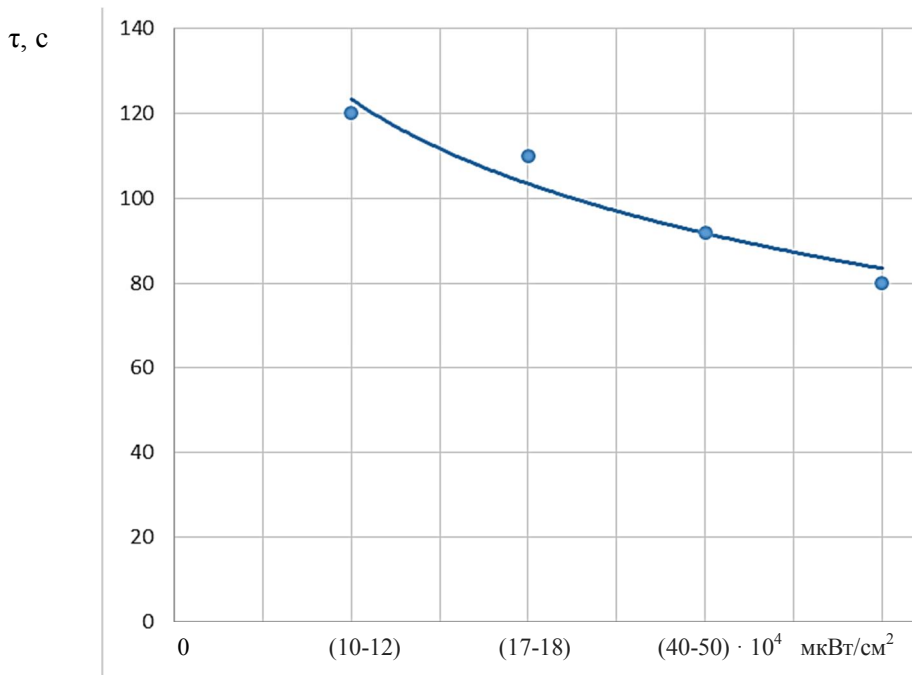


Рис. 5. Время сверления отверстия  $\varnothing 5$  на глубину 5,0 мм в зависимости от плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля

Зависимость времени сверления от плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля при предшествующей обработке с точностью 0,93 аппроксимируется логарифмической функцией:

$$\tau = -28,75 \ln(P) + 123,34, \quad (1)$$

где  $P$  – плотность потока энергии.

В контрольных образцах матрица имеет высокую вязкость, при сверлении вследствие этого повышается трение по задней поверхности сверла, что приводит к росту температуры в области контакта с инструментом и размягчению матрицы. Это, с одной стороны, уменьшает осевую силу сверления, с другой – увеличивает момент резания вследствие залипания вязкой стружки в канавках инструмента. В результате затрудняется ее эвакуация и начинает действовать сила трения по ленточкам. Суммарное действие увеличенного момента резания, осевой силы сверления и силы трения приводит к замедлению продвижения сверла по мере его заглубления в материал. При воздействии СВЧ электромагнитного поля, как отмечено выше, происходит уплотнение структуры, что приводит к увеличению осевой силы. В то же время повышение плотности матрицы уменьшает залипание агломератов в канавках сверла, а срезаемые фрагменты углеродных волокон, обладающих минимальным коэффициентом трения по стали, уменьшают момент и силу трения по ленточкам. Движение сверла облегчается, и обработка происходит за меньшее время. В образцах, обработанных при больших значениях ППЭ, образуется мелкодисперсная стружка, которая легко эвакуируется, продвигаясь по канавкам, большое количество мелких фрагментов углеродных волокон существенно снижает трение. Это приводит к максимальному сокращению времени сверления. В то же время повышение плотности матрицы затрудняет срезание стружек, что в конечном итоге замедляет процесс снижения времени сверления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, модифицирование отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле позволяет не только повысить механические характеристики изделий из них, но и улучшить обрабатываемость резанием за счет сближения технологических характеристик матрицы и наполнителя и повышения однородности структуры матрицы, что способствует существенному снижению кромоочных дефектов и, как следствие, – уменьшению трудоемкости доделочных операций и повышению качества изделий. Это происходит при увеличении поверхности контакта «матрица-волокно» и увеличении количества надмолекулярных образований, снижении их размеров и сближении.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о снижении времени сверления опытных образцов углепластика на (10-33) %, что позволяет повысить производительность обработки или сократить число переточек инструмента.

Введение в технологический процесс изготовления изделий из ПКМ операции СВЧ модифицирования перед механической обработкой может обеспечить повышение эффективности и качества конструктивных элементов перспективных образцов авиационной и ракетно-космической техники из углепластика и других групп ПКМ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-uglerodnogo-voлокna>.
2. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.
3. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г.М. Гуняев, В.В. Кривонос, А.Ф. Румянцев и др. [Электронный ресурс] // Конверсия и машиностроение. 2004. № 4. Режим доступа: [www: viam.ru/public](http://www.viam.ru/public).
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.
5. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
6. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers / S. Brinkmann et al.; ed. Hanser. 2006. 920 p.
7. Комаров Г.В. Свойства ПКМ, влияющие на их способность соединяться // Полимерные материалы. 2010. № 2-3. С. 18-27.
8. Мешкас А., Макаров В., Ширинкин В. Пути решения проблем механической обработки композиционных материалов на машиностроительном предприятии // Станкоинструмент. 2016. № 3. С. 55-59.
9. Злобина И.В., Бекренёв Н.В. Исследование влияния ультразвуковой пропитки на физико-механические характеристики армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 72-78.
10. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого, В.А. Колесник и др.; под общ. ред. проф. В.А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2013. 272 с.

11. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов [Электронный ресурс] // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2012. № 4. С. 1-22, 77-30569/361759, № 04 апрель 2012 г. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru> 14.
12. Зубарев Ю.М., Приемышев А.В., Заостровский А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 5. С. 30-33.
13. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 296 с.
14. Злобина И.В., Бекренёв Н.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.
15. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Impact load influence on hardened polymer composite materials with metal elements built in the structure after microwave electromagnetic field treatment // Journal of Physics: Conference Series, 2019-12-10.
16. Злобина И.В., Бодягина К.С., Бекренёв Н.В. Компьютерное моделирование структурных изменений в отвержденных полимерных композиционных материалах под действием СВЧ электромагнитного поля // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1 (22). С. 64-73.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Злобина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Irina V. Zlobina** – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Бекренёв Николай Валерьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Nikolay V. Bekrenev** – Dr.Sc. Tech., Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

*Статья поступила в редакцию 15.01.21, принята к опубликованию 17.02.21*

**А.Е. Исаев, Д.З. Сафoshкин, И.Н. Михайлов,  
И.Д. Кособудский, Н.М. Ушаков**

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕЗОПОРИСТОГО  
ОКСИДА КРЕМНИЯ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА  
МЕТОДОМ «ОБРАТНОЙ» ЭМУЛЬСИИ**

*Аннотация.* Цель настоящей работы состоит в получении нанокomпозитных материалов на основе *d*-металла (серебра) и оптически прозрачной инертной пористой матрице диоксида кремния. Синтезированные новые наноматериалы могут найти широкое применение в различных областях науки и техники, поскольку, как это показано в настоящей работе, свойствами наночастиц и материалов на их основе можно управлять посредством изменения различных параметров, таких как средний размер частиц, их концентрация и распределение в матрице.

*Ключевые слова:* поверхностно-активное вещество; плазмонный резонанс; критическая концентрация мицеллообразования; композиционный материал

**A.E. Isaev, D.Z. Safoschkin, I.N. Mikhailov,  
I.D. Kosobudskiy, N.M. Ushakov**

**MODIFICATION OF MESOPOROUS SILICON OXIDE  
BY SILVER NANOPARTICLES USING THE «INVERSE»  
EMULSION METHODOLOGY**

*Abstract.* The aim of this work is to obtain nanocomposite materials based on *d*-metal (silver) and optically transparent inert porous silicon dioxide matrix. The synthesized new nanomaterials can find wide application in various fields of science and technology, since, as shown in this work, the properties of nanoparticles and materials based on them can be controlled by changing various parameters, such as the average particle size, their concentration and distribution in the matrix.

*Keywords:* surfactant; PR-plasmon resonance; CCM-critical concentration micelle formation

**ВВЕДЕНИЕ**

В последние десятилетия возрос интерес к нанообъектам самой различной природы. Это связано с тем, что частицы таких размеров обладают уникальными свойствами, отличающими их от соответствующей блок-фазы [1, 2]. Синтез и свойства коллоидных частиц, покрытых оксидами, в частности диоксидом кремния SiO<sub>2</sub>, привлекают внимание

многих исследователей в связи с созданием новых, структурированных на наноуровне материалов [1-5].

Наличие  $\text{SiO}_2$ -оболочек позволяет конструировать сложные многослойные структуры как за счет модифицирования оксидной оболочки, так и путем вторичного покрытия, что значительно расширяет возможности их практического применения [6, 7]. Наряду с этим варьирование проницаемости  $\text{SiO}_2$ -оболочек [8] может оказаться весьма полезным при разработке «контейнеров» для металлических наночастиц с целью повышения их устойчивости при [9, 11, 22].

Эти обстоятельства обуславливают актуальность получения композиционных наноматериалов, содержащих наночастицы серебра, поверхность которых модифицирована оксидами [14].

Среди большого разнообразия современных наноматериалов особое место занимают металлические наночастицы с плазмонным резонансом (ПР), который обусловлен коллективным поведением электронов проводимости на определенных частотах, определяемых природой частицы.

Длина волны ПР металлических наночастиц и соотношение между их сечениями поглощения и рассеяния зависят от размера, формы, материала и структуры частиц. Именно этим определяются технологические возможности управления оптическими свойствами плазмонных частиц для конкретных приложений. Несмотря на то, что НЧ серебра обладают превосходными оптическими свойствами и уникальной способностью усиления сигнала во флуоресцентной спектроскопии и спектроскопии КР по сравнению с частицами золота, железа [10-13], последние в научных и прикладных целях используются гораздо шире благодаря их химической инертности и простоте получения [13]. Тем не менее наноструктуры на основе Ag вызывают большой интерес, поскольку серебро обладает существенно большим (по сравнению с золотом) сечением резонансного поглощения и ярко выраженными бактерицидными свойствами [5]. Серебро более реакционноспособно, чем золото, поэтому первоочередной задачей является разработка методов получения и эффективной стабилизации НЧ с узким распределением по размерам [14]. Известная проблема совмещения методики синтеза и подходящего модификатора поверхности НЧ серебра, на наш взгляд, не является непреодолимым препятствием на пути получения стабильных материалов и их дальнейшего использования.

Среди жидкофазных методов получения различных НЧ большой интерес вызывает синтез в растворах обратных мицелл (ОМ), которые представляют собой термодинамически стабильные дисперсии наноразмерных капель воды (пулов), стабилизированных поверхностно-активным веществом (ПАВ) в неполярном растворителе.

Мицеллярные оболочки обеспечивают стабилизацию НЧ, защищая их от агрегации. Водный пул мицеллы, размером которого можно легко управлять, служит естественным ограничителем размера НЧ. Большинство исследований в этой области относятся к синтезу наночастиц сферической формы. Вместе с тем большой научный и практический интерес представляет получение ассиметричных частиц (нити, диски, эллипсоиды) и точный контроль за их формой. Большой интерес представляет синтез нанокompозитов, состоящих из частиц одного материала (размер частиц 50-100 нм), покрытых тонким слоем другого материала.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения синтеза использовались химические реактивы, приведенные в таблице.

Реактивы, использованные при синтезе композиционных материалов Ag@SiO<sub>2</sub>

Материалы	Марка	ГОСТ, ТУ, CAS
Triton X-100(SIGMA)		CAS 9002-93-1
Циклогексан (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> )	чда	ТУ 2631-029-44493179-99 с изм. 1,2
Бутанол (C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH)	чда	Гост 6006-78 с изм. 1,2
ТЭОС (C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub> Si)	ос.ч	ТУ 2637-059-44493179-04
Серебро азотнокислое (AgNO <sub>3</sub> )	чда	ГОСТ 1277-75
Гидрат гидразина (N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O)	чда	ГОСТ 19503-88
Аммиак водный (NH <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O)	чда	ГОСТ 3760-79

Все реактивы марок «ос.ч» и «чда» использовались без предварительной очистки.

Для выявления особенностей взаимодействия металлических частиц и матрицы диоксида кремния был проведен анализ инфракрасных спектров порошков Ag@SiO<sub>2</sub>, полученных из синтезированного в микроэмульсиях золя диоксида кремния на ИК-Фурье спектрофотометре ФТ-801. Образцы также прошли термическую обработку при T = 500 ± 5°C. После этого были изготовлены таблетки из оптически прозрачной матрицы KBr с добавлением 3-5 % по массе частиц исследуемых образцов.

Определение размеров частиц осуществляли при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Исследование осуществлялись на автоэмиссионном сканирующем растровом микроскопе MIRA II LMU. Перед исследованием на СЭМ полученные частицы были нанесены на алюминиевую фольгу и прошли термическую обработку при T = 500 ± 5°C.

Просвечивающая электронная микроскопия проводилась с помощью с помощью просвечивающего микроскопа «JEM – 100B» фирмы «JEOL».

*Определение критической концентрации мицеллообразования поверхностно-активных веществ (ПАВ) по величине светорассеяния (мутности).* В растворах коллоидных ПАВ при очень низких концентрациях, соответствующих критической концентрации мицеллообразования (ККМ), образуются сферические мицеллы, которые содержат от 20 до 100 молекул и характеризуются узким распределением частиц по размерам. При увеличении концентрации ПАВ происходит переход мицеллы из одной формы в другую (цилиндрическую, дискообразную и т. д.) при соответствующей критической концентрации ККМ2, ККМ3 и т. д.

Данные светорассеяния используют для определения мицеллярной массы, чисел агрегации мицелл и их формы. При концентрации, соответствующей ККМ, на графиках зависимостей наблюдается излом, обусловленный образованием сферических мицелл. Предварительно экспериментально было определено, что ККМ для данной системы равно 20 % масс. TX – 100.

В качестве ПАВ использовали трет-октилфениловый эфир полиэтиленгликоля – Triton X-100 (ТХ-100) со средней длиной оксиэтильной цепи, равной 10 (Ferak); в качестве со-ПАВ использовали *n*-бутиловый спирт. Неполярной («масляной») фазой служил циклогексан. Частицы диоксида кремния синтезировали путем гидролиза тетраэтоксисилана (ТЭОС) в присутствии катализатора (аммиака) в обратной микроэмульсии в следующей последовательности (рис. 1а):

1) Приготавливали обратную микроэмульсию.

а) ПАВ (Triton X-100) растворяли в циклогексане в течение  $1 \pm 0,5$  мин в закрытом контейнере при помощи магнитной мешалки.

б) со-ПАВ (бутанол) добавляли в смесь ПАВ и циклогексана, приготовленную по п. 1, а. Смесь перемешивали в течение  $1 \pm 0,5$  мин.

2) Полученную микроэмульсию (п. 1, б) разделяли на две равных части по объему.

3) В первую половину объема микроэмульсии добавляли:

а) Водный раствор аммиака ( $\omega = 30\%$ ). Смесь перемешивали в течение  $1 \pm 0,5$  мин.

б) Дистиллированную воду. Смесь перемешивается в течение  $5 \pm 0,5$  мин.

4) Во вторую половину объема микроэмульсии добавляли ТЭОС, после чего полученную смесь перемешивали в течение  $5 \pm 0,5$  мин.

5) Мицеллярный раствор, полученный в 3 п., добавляли в мицеллярный раствор, синтезированный в 4 п., при непрерывном перемешивании.

6) Микроэмульсию (п. 5) перемешивали в течение  $60 \pm 5$  мин.

7) Микроэмульсию выдерживали в течение  $24 \pm 1$  часов для более полного протекания реакций синтеза диоксида кремния (рис. 1а).

Реакция гидролиза происходит посредством нуклеофильной атаки атома кислорода, содержащегося в воде, на атом кремния молекулы ТЭОС, что было доказано в [17], используя меченый атом  $^{18}\text{O}$  в молекуле воды:



При последующих реакциях конденсации происходит формирование силоксановых связей ( $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ), а также молекул этанола и воды. Однако в большинстве случаев реакции конденсации начинаются до завершения гидролиза [18]. Существует устойчивая тенденция: в присутствии кислотного катализатора при низких значениях молярного соотношения  $\text{H}_2\text{O}/\text{Si}$  ( $r$ ) образуются фрактальные структуры  $\text{SiO}_2$ , в то время как при использовании щелочного катализатора при больших значениях  $r$  образуются коллоидные частицы преимущественно сферической или близкой к ней формы [18]. Аммиак позволяет значительно ускорить процесс получения  $\text{SiO}_2$  сферической или близкой к ней формы [18, 19]. Поэтому в работе, для синтеза диоксида кремния данной структуры в качестве щелочного катализатора использовался раствор  $\text{NH}_4(\text{OH})$ .

Для синтеза наночастиц с Ag-ядром в качестве ПАВ использовали трет-октилфениловый эфир полиэтиленгликоля – Triton X-100 (ТХ-100) со средней длиной оксиэтильной цепи, равной 10 (Ferak); в качестве со-ПАВ использовали *n*-бутиловый спирт. Неполярной («масляной») фазой служил циклогексан. Частицы с Ag-ядром и  $\text{SiO}_2$ -оболочкой синтезируются в обратной микроэмульсии в следующей последовательности (рис. 1б):

- 1) Приготавливали обратную микроэмульсию.
    - а) ПАВ (Triton X-100) растворяли в циклогексане в течение  $1 \pm 0,5$  мин в закрытом контейнере при помощи магнитной мешалки.
    - б) со-ПАВ (бутанол) добавляли в смесь ПАВ и циклогексана, приготовленную по п. 1, а. Смесь перемешивали в течение  $1 \pm 0,5$  мин.
  - 2) В полученную микроэмульсию (п. 1, б) добавляли:
    - а) водный раствор  $\text{AgNO}_3$  (0,001N). Смесь перемешивали в течение  $1 \pm 0,5$  мин.
    - б) водный раствор аммиака ( $\omega = 30\%$ ), после чего смесь перемешивали в течение  $1 \pm 0,5$  мин.
    - в) водный раствор  $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (0,005 %). Смесь перемешивали в течение  $60 \pm 5$  мин.
  - 3) После образования коллоидного раствора серебра в микроэмульсию добавляли ТЭОС, после чего смесь перемешивали в течение  $60 \pm 5$  мин.
- Микроэмульсию выдерживали в течение  $24 \pm 1$  часов для более полного протекания реакций синтеза наночастиц Ag с оболочкой диоксида кремния (рис. 1б).

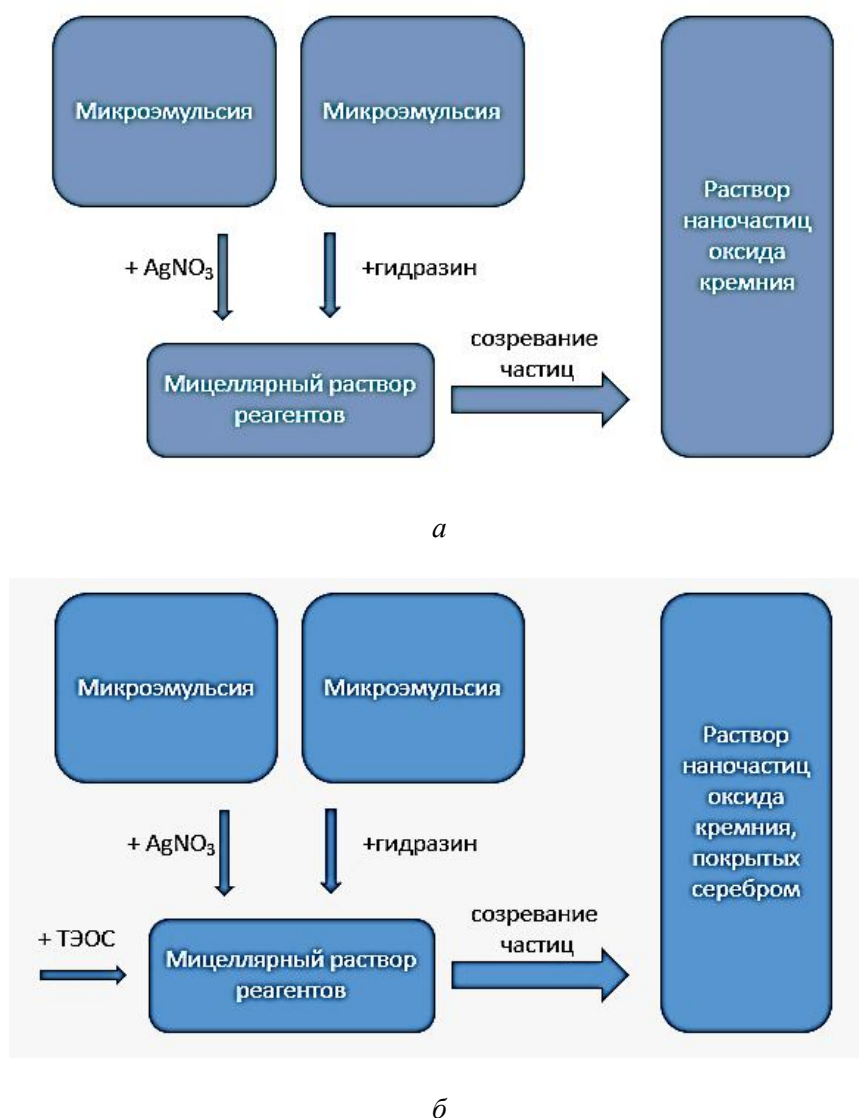
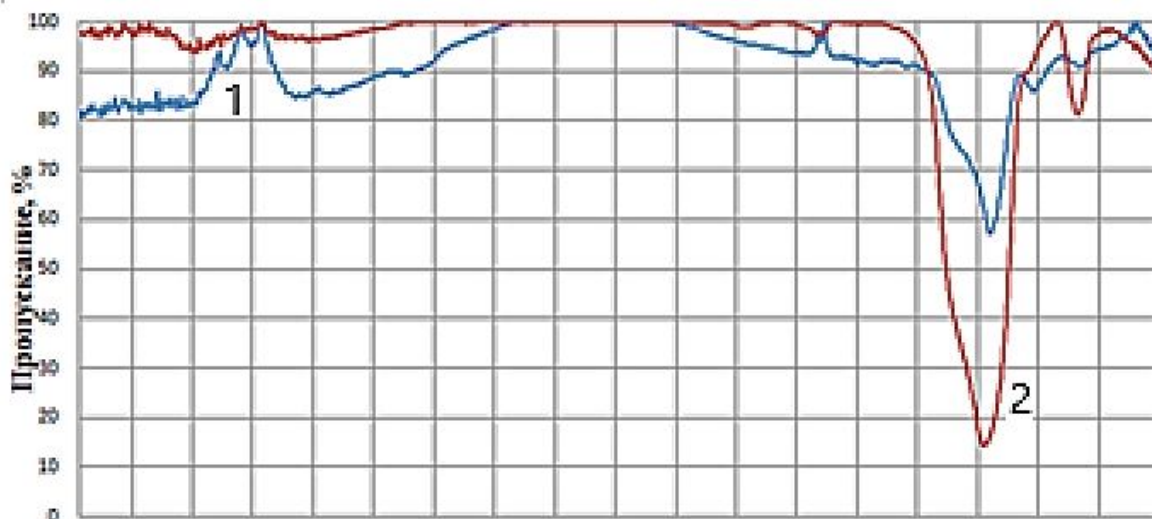
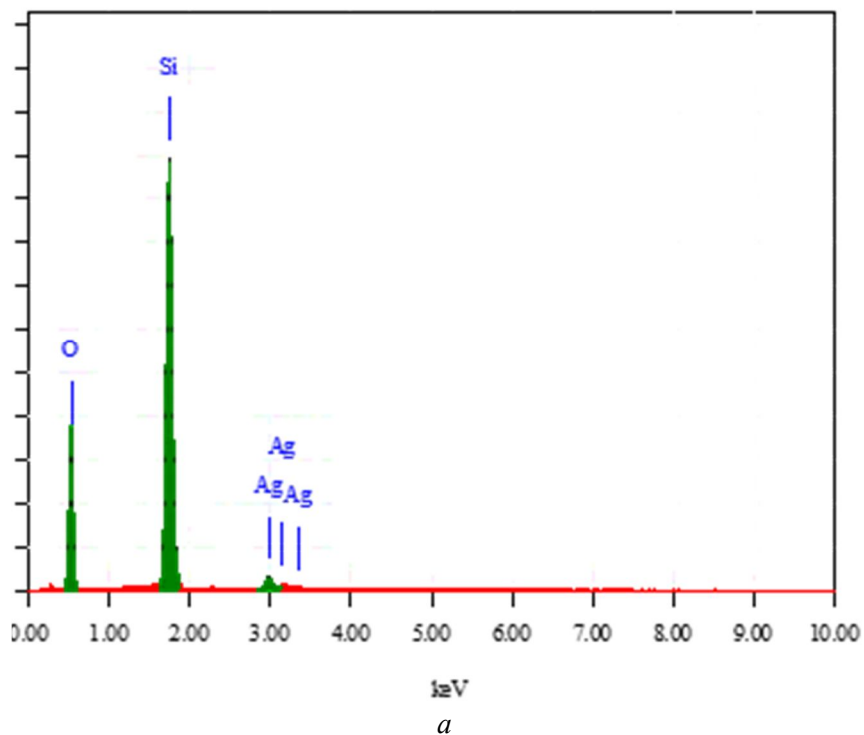


Рис. 1. Схема синтеза наночастиц: а –  $\text{SiO}_2$ , б –  $\text{SiO}_2@Ag$



Для подтверждения химического состава образца было проведено исследование с помощью сканирующего электронного микроскопа с микроанализом на приборе Jeol JED – 2300 Analysis Station (рис. 2а). Характер изменения связей в матрице диоксида кремния был исследован с помощью ИК-Фурье спектрофотометре ФТ-801. Результаты анализа представлены на рис. 2б.



б

Рис. 2. Результаты анализа:

- а – результаты микроанализа образца Ag@SiO<sub>2</sub>, концентрация Ag 5 % мас,  
б – ИК-Фурье спектры частиц Ag@SiO<sub>2</sub>, без термообработки (1)  
и выдержанного в печи в течение 15 ± 5 мин при температуре 500 ± 5°C (2)

На ИК-Фурье спектрах частиц  $\text{Ag@SiO}_2$  (рис. 2б), вне зависимости от их температурной обработки присутствуют полосы поглощения, характерные для аморфного диоксида кремния. Полосы поглощения при  $1095 \text{ см}^{-1}$  соответствуют асимметричным валентным колебаниям связей Si-O-Si.

Полосы поглощения при  $805 \text{ см}^{-1}$  связаны с симметричными валентными колебаниями связей Si-O-Si. Но в результате термообработки образца при  $T = 500 \pm 5^\circ\text{C}$  полоса поглощения ( $955 \text{ см}^{-1}$ ) не наблюдалась на соответствующем ИК-Фурье спектре, что, вероятно, свидетельствует об испарении молекул этилового спирта и частичном дегидроксилировании частиц диоксида кремния [18]. Рассмотренные полосы поглощения более интенсивны для частиц диоксида кремния, выдержанных в печи в течение  $15 \pm 5$  мин при температуре  $500 \pm 5^\circ\text{C}$ .

На микрофотографии, полученной методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 3), видны темные сферические объекты со средним размером около 50 нм – наночастицы серебра. Наночастицы расположены хаотически.

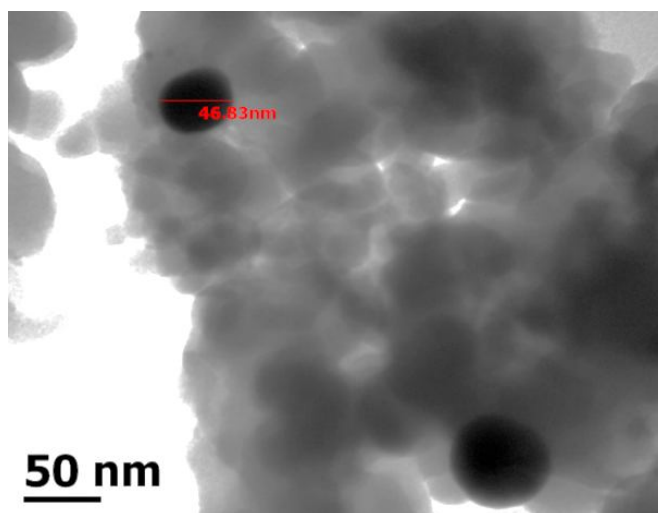


Рис. 3. Просвечивающая электронная микроскопия образца  $\text{Ag@SiO}_2$

Можно сделать вывод, что нами были получены сферические наночастицы  $\text{SiO}_2$  с узким распределением частиц по размерам. Кроме того, видно, что в результате термообработки при  $500 \pm 5^\circ\text{C}$  происходит агрегация сферических наночастиц. Внедрение наночастиц серебра практически не оказывает влияния на распределение частиц композита по размерам, оставаясь практически неизменным – около 200 нм.

Определение размеров частиц осуществляли при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Исследование осуществлялись на автоэмиссионном сканирующем растровом микроскопе MIRA II LMU.

Перед исследованием на СЭМ часть образцов прошла термическую обработку при  $T = 500 \pm 5^\circ\text{C}$ . Результаты представлены на рис. 4.

Введение в диэлектрическую матрицу наночастиц металла приводит уменьшению электрического сопротивления композита. Нами было измерено электрическое сопротивление полученных образцов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ag@SiO}_2$ .

Электрическое сопротивление диоксида кремния, модифицированного серебром, уменьшилось в 8 раз по сравнению с немодифицированным диоксидом кремния ( $R_{\text{SiO}_2} = 1,34 \cdot 10^8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ;  $R_{\text{Ag@SiO}_2} = 1,68 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ), что свидетельствует об образовании электропроводящего композита.

В статье [21] показано, что электрическое сопротивление нанокomпозиционных материалов, содержащих наночастицы d-металлов в полимерных матрицах, уменьшается на несколько порядков. Композит имеет электрические свойства, близкие к свойствам полупроводника.

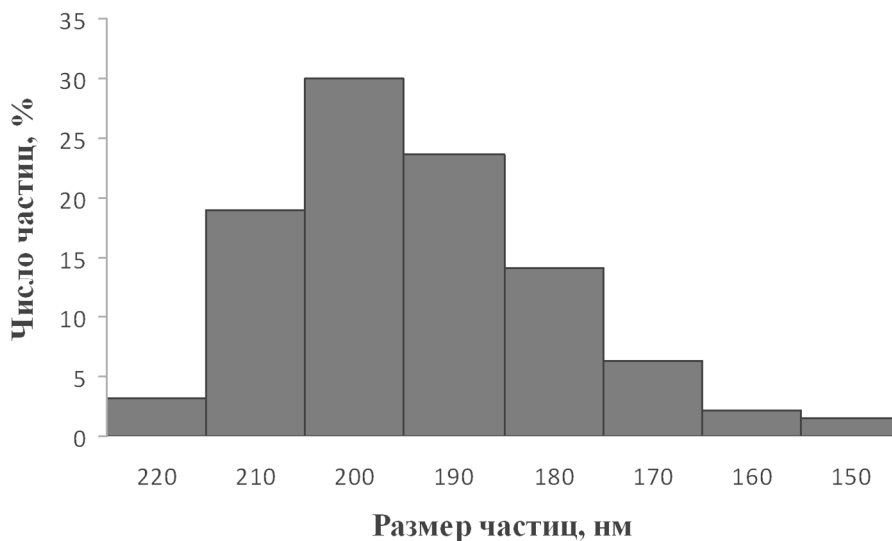


Рис. 4. Распределение частиц  $\text{SiO}_2$  по размерам

Таким образом, можно говорить, что внедрение наночастиц серебра в структуру оксида кремния не приводит к образованию непрерывных цепей проводящего материала. Т. е. наночастицы серебра находятся внутри наночастиц  $\text{SiO}_2$ , а механизм электропроводности, скорее всего, «прыжковый» [22].

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны методы и условия синтеза наночастиц металла (серебра) в оптически прозрачной инертной пористой матрице диоксида кремния.
2. Установлен размер и состав синтезированных наночастиц с  $\text{Ag@SiO}_2$ -оболочкой в синтезированных образцах. Средний размер частиц, определенный по микроснимкам ПЭМ, составлял 190-210 нм, размер наночастиц серебра – около 50 нм.
3. Электрическое сопротивление композиционного материала уменьшилось практически на порядок до  $R_{\text{Ag@SiO}_2} = 1,68 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии: пер. с англ. / под ред. К.Л. Миттела. М.: Мир, 1980. 597 с.

2. Петрянов-Соколов И.В. Коллоидная химия и научно-технический прогресс. М.: Наука. 1988. 180 с.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии: Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Альянс. 2004. 463 с.
4. Микроэмульсии: Структура и динамика / Ж. Биэ и др.; пер. с англ. под ред. С. Фриберга и П. Ботореля. М.: Мир, 1990. 320 с.
5. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 199 с.
6. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 672 с.
7. Помогайло А.Д. Гибридные полимер-неорганические нанокompозиты // Успехи химии. 2000. Т. 69. № 1. С. 60-89.
8. Wang Y., Herron N. Nanometer-sized semiconductor clusters: materials synthesis, quantum size effects, and photophysical properties // The Journal of Physical Chemistry. 1991. – Т. 95. № 2. С. 525-532.
9. Burda C.; Chen X.; Narayanan R.; El-Sayed M.A. // Chem. Rev. 2005 105. 1025.
10. Taton T.A., Mirkin C.A. and Letsinger R.L., «Scanometric DNA Array Detection with Nanoparticle Probes» Science. 2000. 289. P. 1757.
11. Высокоэффективные просветляющие наноструктурные оптические покрытия для солнечных элементов / О.Н. Гадамский, К.К. Алтунин, Н.М. Ушаков, И.Д. Кособудский, В.Я. Подвигалкин, Д.М. Кульбацкий // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 7. С. 83-89.
12. Синтез и свойства железосодержащих наночастиц, локализованных на поверхности оксида кремния / Юрков Г.Ю., Кособудский И.Д., Волков А.Н., Овченков Е.А., Кокшаров Ю.А., Попков О.В. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 3 (46). С. 114-121.
13. Jin R. et al. Controlling anisotropic nanoparticle growth through plasmon excitation // Nature. 2003. Т. 425. № 6957. С. 487-490.
14. Синтез биметаллических наночастиц золота-серебра с иницированием зародышеобразования in situ / М.В. Горбачевский и др. // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 1. С. 141-144.
15. Вертелов Г.К., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. Применение наночастиц в электрохимическом анализе биологических объектов // Журнал аналитической химии. 2007. Т. 62. № 9. С. 903-915.
16. Khimich N.N. Synthesis of silica gels and organic-inorganic hybrids on their base // Glass Physics and Chemistry. 2004. Т. 30. № 5. С. 430-442.
17. Reverse microemulsion-mediated synthesis of SiO<sub>2</sub>-coated ZnO composite nanoparticles: Multiple cores with tunable shell thickness / Wang J., Tsuzuki T., Sun L., Wang X. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2010. 2. 4. P. 957-960.
18. Brinker C.J., Scherer G.W. Sol-Gel Science the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. San Diego: Academic Press Inc., 1990. 908 p.

19. Получение стабильного ультрадисперсного коллоида в микроэмульсиях вода/масло / В.А. Надточенко, В.Ф. Разумов, М.В. Алфимов // Известия АН СССР. Сер. Химия. 1989. № 2. С. 478-479.
20. FTIR, TEM and NMR Investigations of Stöber Silica Nanoparticles / A. Beganskienė [et al.] // Materials Science (Medžiagotyra). 2004. V. 10. № 4. P. 287-290.
21. Влияние диэлектрической оболочки на спектральное положение плазмонного резонанса наночастицы серебра в фотохромном стекле / Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, В.А. Цехомский, К.Е. Лазарева // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107. № 5. С. 745-747.
22. Новые композиционные наноматериалы с управляемыми свойствами для радиотехники и электроники / Н.М. Ушаков, И.Д. Кособудский, Г.Ю. Юрков, С.П. Губин, К.В. Запис, В.И., Кочубей А.Н. Ульзугуев // Радиотехника. 2005. № 10. С. 105-108.
23. Изучение антимикробной фотодинамической активности водных растворов наночастиц металлов / В.Б. Байбурун и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. Т. 4. № 1 (77).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Исаев Александр Евгеньевич –**

магистрант Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.,  
E-mail: isaevaleks@gmail.com

**Alexandr E. Isaev –**

Master student, Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov  
E-mail: isaevaleks@gmail.com

**Сафошкин Давид Зелкович –**

магистрант Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**David Z. Safoshkin –**

Master student, Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov

**Михайлов Илья Николаевич –**

магистрант Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Илья N. Mikhailov –**

Master student, Yuri Gagarin  
State Technical University of  
Saratov

**Васильков Михаил Юрьевич –**

ведущий инженер  
Саратовского филиала  
Института радиотехники  
и электроники  
им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук

**Mikhail Yu. Vasilkov –**

Lead Engineer,  
Kotelnikov Institute of  
Radio Engineering and  
Electronics of the  
Russian Academy of Sciences  
(Saratov Branch)

**Кособудский Игорь Донатович** –  
доктор химических наук, профессор  
Саратовского государственного  
технического университета  
имени Гагарина Ю.А.

**Igor D. Kosobudskiy** –  
Dr.Sc. (Chemistry), Professor,  
Yuri Gagarin  
State Technical University of Saratov

**Ушаков Николай Михайлович** –  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Саратовский филиал Института  
радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской  
академии наук

**Nikolai M. Ushakov** –  
Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor,  
Kotelnikov Institute of Radio  
Engineering and Electronics of the  
Russian Academy  
of Sciences (Saratov Branch)

*Статья поступила в редакцию 25.01.21, принята к опубликованию 26.02.21*

## Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник СГТУ», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора MS Word 2007 (параметры страницы – А 4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте [vestnik@sstu.ru](mailto:vestnik@sstu.ru).

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова.

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

Статья завершается сведениями об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунка.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Каждая формула должна иметь номер.

6. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

11. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую отдельным файлом. Высылается вместе с рукописью.

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

## Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемое научное периодическое издание по 2 отраслям науки: технические науки, физико-математические науки и следующим специальностям и направлениям:

**05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление:** 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки), 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки, физико-математические науки); **05.02.00 – Машиностроение и машиноведение:** 05.02.08 – Технология машиностроения; **05.16.00 – Металлургия и материаловедение:** 05.16.09 – Материаловедение (технические науки).

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

- Информатика, вычислительная техника и управление
- Машиностроение и машиноведение
- Металлургия и материаловедение

*Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!*

<b>Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник СГТУ»</b>		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Наименование направляющей статью организации		
Группа специальностей, к которой относится статья		