ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

**ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности**

2019 Том 20 **10 (231)**

## СОДЕРЖАНИЕ

*Технологическая оснастка для сборки*

**Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Гришин Д.В.** Расширение технологических возможностей проходного резца за счет применения в конструкции дополнительной сборочной единицы . . . . . 435

*Обеспечение качества. Испытания. Контроль*

**Чмыхало И.А., Меделяев И.А., Челноков А.В., Спирягин В.В.** Разработка и применение акустико-диагностической установки для исследования параметров сигналов акустической эмиссии в теплообменных аппаратах при различных режимах эксплуатации . . . . . 438

*Экология и безопасность сборочных работ*

**Микаева С.А., Микаева А.С.** Сборка модулей для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением в системах вентиляции . . . . . 444

*Трение и смазка в машинах и механизмах*

**Панин С.В., Корниенко Л.А., Ле Тхи Ми Хиеп, Буслович Д.Г., Нгуен Дык Ань.** Многокомпонентные высокопрочные антифрикционные композиты на основе полифениленсульфида . . . . . 448

**Гурьянов Г.Н., Гурьянов Н.Г.** Величина дельта-критерия формы очага деформации в зависимости от параметров процесса волочения круглого сплошного профиля . . . . . 454

**Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Мигранов А.М.** Триботехнические характеристики режущего инструмента с ионно-модифицированной поверхностью . . . . . 464

**Лернер Ю.Н.** Некоторые физические явления при трении . . . . . 469

*В помощь конструктору, технологу*

**Введенский В.Ю., Нуждин Г.А., Фролов С.В.** Моделирование петли гистерезиса магнитных материалов с помощью интерполяции дробно-линейной функцией . . . . . 471

**Сухова Н.А.** Разработка механизма управления производственной технологичностью авиационных двигателей . . . . . 476

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — **84967**) или непосредственно в издательстве

*Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96*

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

*Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.*

**Председатель редакционного совета**

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

**Редакционный совет**

**МОСКВА**

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н.
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

**Региональные редсоветы**

**ВЛАДИВОСТОК**

Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

**ВОЛГОГРАД**

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

**ИЖЕВСК**

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

**КАЗАНЬ**

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

**КОВРОВ**

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

**КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ**

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

**НИЖНИЙ НОВГОРОД**

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

**ОРЕЛ**

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

**ОРЕНБУРГ**

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

**ПЕРМЬ**

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

**РОСТОВ-НА-ДОНУ**

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.

**РЫБИНСК**

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

**САМАРА**

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

**ТОМСК**

А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

**ТУЛА**

А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

**ХАБАРОВСК**

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

**Беларусь**

**МИНСК**

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

**ГОМЕЛЬ**

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

**Украина**

**КИЕВ**

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

**ДОНЕЦК**

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

**Польша**

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

**Ответственные за подготовку и выпуск номера:**

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРе. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

**© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2019**

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

# ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

**THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes, 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials**

2019 Vol. 20 **10 (231)**

## CONTENTS

*Technological equipment for assembly*

**Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Grishin D.V.** Enhancement of technological opportunities of the passing cutter due to the application in the design of an additional assembly unit . . . . . 435

*Quality assurance. Testing. Monitoring*

**Chmyhalo I.A., Medeljaev I.A., Chelnokov A.V., Spiryagin V.V.** Development and use of acoustic-diagnostic installation for study of the parameters of acoustic emission signals in heat exchangers under various operating conditions . . . . . 438

*Ecology and safety in assembly*

**Mikaeva S.A., Mikaeva A.S.** Assembly of modules for air disinfection by ultraviolet radiation in ventilation systems . . . . . 444

*Friction & lubrication in machines and mechanisms*

**Panin S.V., Kornienko L.A., Le Thi My Hiep, D.G. Buslovich, Nguyen Duc Anh.** Multicomponent high-strength antifriction polyphenylene sulfide based composites . . . . . 448

**Guryanov G.N., Guryanov N.G.** Size delta-criteria of the form of the origin of deformation depending on the parameters of the turning process of a round continuous profile . . . . . 454

**Migranov M.Sh., Shechtman S.R., Migranov A.M.** Tribological characteristics of cutting tools with ion-modified surface . . . . . 464

**Lerner Yu.N.** Some physical phenomena at friction . . . . . 469

*Industrial and design engineer's aid*

**Vvedenskiy V.Yu., Nuzhdin G.A., Frolov S.V.** Simulation of magnetic hysteresis loop materials using interpolation linear fractional function . . . . . 471

**Sukhova N.A.** Development of a mechanism for the management of industrial manufacturability aircraft engines . . . . . 476

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — **84967**) or directly in editorial of the journal.
*Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96*
*E-mail: sborka@mashin.ru, http://www. mashin.ru*
*The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.*
*Advertisers are responsible for the content of their advertisements.*

**Chair of Editorial Advisory Board —**
**Member of Russian Academy of Science**
V.I. KOLESNIKOV

**Editors**

**MOSCOW**
A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

**Regional editors**

**VLADIVOSTOK**
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

**VOLGOGRAD**
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

**IZHEVSK**
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH

**KAZAN**
R.I. ADGAMOV

**KOVROV**
Yu.Z. ZHITNIKOV

**KOMSOMOLSK-ON-AMUR**
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

**NIZHNY NOVGOROD**
S.V. GOLUBEV

**OREL**
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

**ORENBURG**
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT

**PERM**
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

**ROSTOV-ON-DON**
A.A. RYZHKIN
I.V. KOLESNIKOV

**RYBINSK**
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV

**SAMARA**
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

**ST.-PETERSBURG**
E.V. SHALOBAEV

**TOMSK**
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

**TULA**
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

**KHABAROVSK**
V.I. SCHPORT

**Belarus**

**MINSK**
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

**GOMEL**
V.E. STARZHINSKI

**Ukraine**

**KIEV**
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

**DONETSK**
A.N. MIKHAILOV

**Poland**
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

**Executive editors of current issue:**
E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2019

УДК 621.9

**Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов,** *д-ра техн. наук,* **Д.В. Гришин**
*(АО "Научно-исследовательский инженерный институт", г. Балашиха, Моск. обл.)*
*E-mail: kea-swsu@mail.ru*

# Расширение технологических возможностей проходного резца за счет применения в конструкции дополнительной сборочной единицы

*Представлено устройство проходного резца, предназначенного для точения поверхности сложного профиля в условиях прерывистого резания. Встроенная в корпус инструмента дополнительная сборочная единица — устройство демпфирования ударных нагрузок — позволяет поддерживать заданную работоспособность сменной режущей многогранной пластины из инструментального сверхтвердого композита, имеющего наряду с уникальными физико-механическими характеристиками и режущими свойствами высокую хрупкость.*

*Применение устройства демпфирования расширяет технологические возможности проходного резца за счет повышения устойчивости прерывистого точения.*

*The device of a straight lathe tool, implementing the turning of surface of a complex profile under conditions of interrupted cutting, has been described. An additional assembly unit integrated into the body of the tool — a device damping impact loads, allows to maintain the set efficiency of a replaceable cutting multi-faceted plate made of super hard tool material composite, which has, along with unique physical and mechanical characteristics and cutting properties, high fragility. The use of the damping device has allowed to enlarge technological capabilities of the straight lathe tool by increasing stability of intermittent turning.*

**Ключевые слова:** проходной резец, сменная режущая многогранная пластина, устройство демпфирования, прерывистое точение.

**Keywords:** straight lathe tool, replaceable cutting multi-faceted plate, damping device, intermittent turning.

Основной элемент технологической системы, определяющий производительность и качество обработки, — резец, поэтому решение проблемы вибраций прерывистого резания может быть связано с оснащением конструкции проходного резца дополнительной сборочной единицей — специальным демпфирующим устройством.

Общий недостаток существующих конструкций устройств демпфирования — вибрации гасятся устройством только в одном направлении — по центру режущей кромки режущего элемента (РЭ). Конструкция резца исключает возможность настройки и регулировки степени демпфирования в зависимости от величины и направления [1—3].

Предложены новые конструкции инструмента и устройств, повышающие устойчивость процесса резания и качество обработки поверхностей сложного профиля [4—6]. Уменьшение возникающих вибраций достигается точной настройкой устройства демпфирования на величину, эквивалентную коэффициенту конструктивной сложности обрабатываемой поверхности, численное значение которого определяется отношением площади элементов разрыва к общей площади точения поверхности заготовки сложного профиля.

На рис. 1 представлена конструкция резца с устройством демпфирования вибраций в различных направлениях.

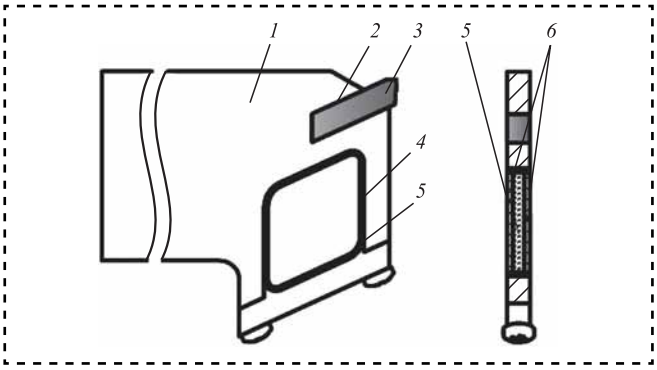



**Рис. 1. Конструкция резца с устройством демпфирования**

Корпус резца содержит державку *1* и два окна. В малое окно *2* устанавливают РЭ *3*, а в большое — устройство демпфирования *4*. Устройство демпфирования представляет собой сборочную единицу, состоящую из набора одной центральной *5* и двух охватывающих ее с зазорами периферийных пластин *6*, подобранных из сменного комплекта таким образом, чтобы их масса была эквивалентна величине прерывистости, обрабатываемой поверхности (т.е. отношению площади элементов разрыва к общей площади обрабатываемой поверхности). Прерывистость процесса резания характеризуется коэффициентом непрерывности:

$$k = \frac{\tau_{s.c}}{\tau_{s.c} + \tau_{w.c}}, \qquad (1)$$

где $\tau_{s.c}$ — время непрерывного резания РЭ поверхности заготовки;

$\tau_{w.c}$ — время холостого пробега РЭ через элементы разрыва на обрабатываемой поверхности заготовки.

При обработке сложного профиля устройство демпфирования принимает вибрационные силы, перераспределяет их между пластинами *5* и *6* и зазорами, стабилизируя процесс точения, и тем самым локализует негативные факторы прерывистого резания, освобождая РЭ от нежелательного воздействия (см. рис. 1).

Параллельные испытания проходных резцов стандартной и новой конструкции в целях выявления параметра шероховатости *Ra* обработанной поверхности спирали детали "Ротор" (рис. 2) проводили в наиболее распространенном для чистового точения диапазоне режимов резания: v = 120...180 м/мин; *S* = 0,05...0,15 мм/об; *t* = 0,05...0,10 мм (рис. 3) [7—9].

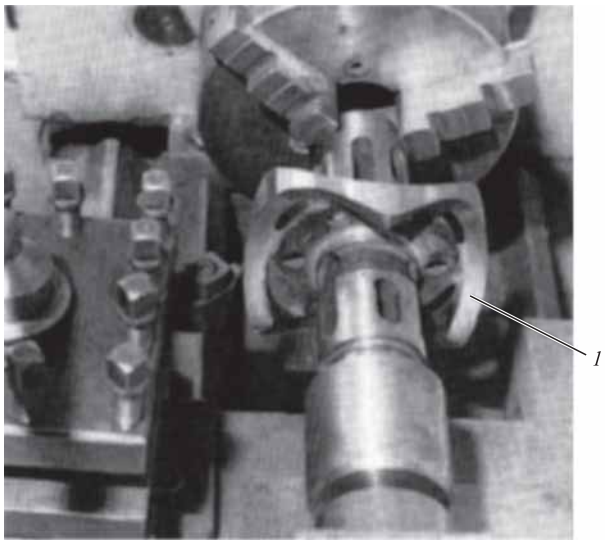



**Рис. 2. Точение поверхности спирали детали "Ротор" (*1*)**

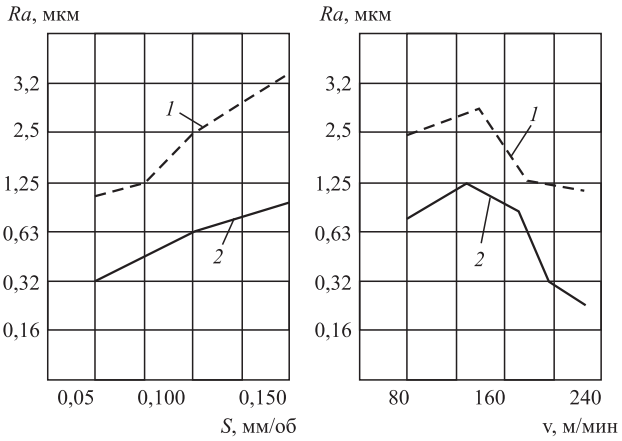



**Рис. 3. Влияние режимов резания на формирование параметра шероховатости *Ra* обработанной поверхности стали 45 (48...54 HRC) композитом 10:**
*1* — стандартный резец; *2* — проходной резец, оснащенный устройством демпфирования

Рациональные условия точения поверхностей сложного профиля создаются подбором композиционного материала, обладающего твердостью по Шору 35...75 единиц для пластин сменного модуля, что эквивалентно коэффициенту гашения вибраций и виброизоляции Ψ = 0,15...0,25. В указанном диапазоне твердости материалов сменных пластин эффект виброизоляции соблюдается за резонансной областью и составляет от 30 до 70 % по сравнению с обычным резцом без устройства демпфирования. При этом коэффициент передачи вибрационной нагрузки, возникаю-

щей вследствие точения поверхности сложного профиля и переданной на РЭ проходного резца:

$$\mu = \frac{P}{P_v} = \frac{1}{\left[1-\left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2\right]^2 + \Psi^2\left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2}\sqrt{1+\Psi^2\left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2}, \quad (2)$$

где $P$ — передаваемая на РЭ сила;

$P_v$ — возбуждаемая в процессе точения сила;

$\omega$ — частота собственных колебаний резца;

$\Omega$ — частота вынужденных колебаний [10, 11].

Чем больше отношение $\Omega/\omega$, тем эффективнее виброизоляция и гашение вибраций в ходе точения поверхности сложного профиля.

## Выводы

1. Применение инструмента с устройством демпфирования для точения поверхности сложного профиля седьмого квалитета точности позволяет, в сравнении со стандартным инструментом, улучшить от 20 до 70 % параметр шероховатости *Ra* обработанной поверхности.

2. Наибольшую эффективность применения устройства демпфирования наблюдали в том случае, когда отношение собственной частоты $\omega$ меньше частоты возбуждения вынужденных колебаний $\Omega$ в два раза.

3. Новая конструкция проходного резца разрывает контакт РЭ с державкой инструмента и резцедержателем, что способствует высокоэффективному демпфированию вибраций в различных направлениях и ударных нагрузок, возникающих в процессе прерывистого резания.

## Библиографический список


1. **Altintas Y.** Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. New York: Cambrdige University Press, 2012. 366 p.
2. **Kudryashov E.A., Smirnov I.M.** Tool guarantee of intermittent cutting processes // Manufacturing Technology. 2017. V. 17. P. 887—892.
3. **Васин С.А.** Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
4. **Резец** с устройством демпфирования: пат. на полезную модель № 178436 РФ / Е.А. Кудряшов, И.М. Смирнов, Н.А. Хижняк. 2018. Бюл. № 10.
5. **Пат. 2457078 РФ.** МПК[8] B23B27/00. Универсальный демпфирующий резец / Кудряшов Е.А., Новиков С.Г., Яцун Е.И.; опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21.
6. **Пат. 2479385 РФ.** МПК[8] B23B27/00. Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / Кудряшов Е.А., Новиков С.Г., Малыхин В.В.; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.
7. **Инструментальщик:** энциклопедический справочник-каталог. В 3 т. Т. 1 / Я.А. Музыкант и др. М.: Наука и технологии, 2009. 464 с.
8. **Кудряшов Е.А., Смирнов И.М.** Создание рациональных условий хрупким сверхтвердым режущим элементам для точения поверхности из разнородных конструкционных материалов // Изв. вузов. Машиностроение. 2018. № 2 (695). С. 75—85.
9. **Городецкий Ю.И., Буданков А.С., Комаров В.Н.** Об одной системе для экспериментального исследования динамики процесса резания металла // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 80—86.
10. **Асташев В.К., Корендясев Г.К.** Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 3. С. 3—9.
11. **Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Pavlov E.V.** Justification of Damping Cutter Design for Making Parts for High-Pressure Drilling Unit Cylinders // Journal of mining science. 2018. Vol. 53. № 3. P. 484—489.

УДК 620.19+620.179.1

**И.А. Чмыхало,** *канд. техн. наук,* **И.А. Меделяев,** *д-р техн. наук,*
**А.В. Челноков,** *канд. техн. наук,*
*(Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха Моск. обл.),*
**В.В. Спирягин** *(Военный учебный центр при Московском авиационном институте (Национальном исследовательском университете))*
*E-mail: himoff2012@rambler.ru*

# Разработка и применение акустико-диагностической установки для исследования параметров сигналов акустической эмиссии в теплообменных аппаратах при различных режимах эксплуатации

*Представлена акустико-диагностическая установка для изучения и формирования базы данных параметров сигналов акустической эмиссии в различных рабочих режимах эксплуатации теплообменных аппаратов.*

*The article presents an acoustic-diagnostic installation for studying and forming a database of parameters of acoustic emission signals in various operating modes of operation of heat exchangers.*

**Ключевые слова:** теплообменный аппарат, акустическая эмиссия.

**Keywords:** heat exchangers, acoustic emission.

Теплообменные аппараты (ТА) широко применяют во всех отраслях промышленности. Наибольшее распространение получили кожухотрубные ТА, что объясняется рядом преимуществ: высокой теплопередающей эффективностью, надежностью, а также отработанной годами технологии изготовления, что значительно снижает стоимость аппарата. Основной недостаток ТА заключается в низком коэффициенте дефектоскопической технологичности — отсутствии доступа к внутренней полости для оценки состояния всей металлоконструкции ТА. В ряде работ [1—3] представлены некоторые специфические механизмы потери работоспособности ТА, вызванные различными эксплуатационными условиями. По результатам отчета Ростехнадзора за 2017 г. доля ТА в структуре емкостного оборудования объектов, подконтрольных органам Ростехнадзора, составляет 30,7 %, а доля отказов, приходящаяся на их число, — 91,8 % (в период 2012—2017 гг.) [4]. При этом среди причин отказов доля сквозного повреждения трубок составляет 71,7 %, а на повреждения сварных соединений приходится 18,1 % [5].

В связи с этим задача повышения достоверности выявления различных дефектов в трубной решетке ТА, приводящих к потере его работоспособности в ходе длительной эксплуатации, приобретает особый статус.

В мировой практике для контроля технического состояния оборудования, работающего под давлением, без нарушения его пригодности к использованию по назначению широко применяют различные физические методы неразрушающего контроля, наиболее перспективный из которых — метод акустической эмиссии (АЭ). Особенности применения метода АЭ: возможность контроля 100 % металлоконструкций ТА; обнаружение и регистрация опасных развивающихся дефектов независимо от их размеров и расположения; высокая чувствительность к растущим, развивающимся трещинам (регистрируются приращения трещины 0,1...0,2 мм); не требуется применение специальных веществ, экологически безопасен; возможность обнаружения потери герметичности — наиболее важный критерий при диагностировании объектов, работающих под избыточным давлением [6].

Несмотря на описанные выше преимущества метода АЭ, его применение для диагностики ТА сдерживалось недостаточной изученностью влияния конструктивных и эксплуатационных особенностей ТА на параметры сигналов АЭ. Для изучения указанных особенностей разработана и запатентована акустико-диагностическая установка-стенд [7].

Разработанная установка (рис. 1) представляет собой корпус *1*, ограниченный с двух торцов крышками *2*, *3* с отверстиями по их центру и нанесенным на них резьбовым соединением для монтажа втулок *5* с развальцованным в них исследуемым съемным трубопроводом *4* с предварительно нанесенным сквозным дефектом *9*; трубопровод загерметизирован пробкой *19* и соединительным патрубком *11*. Собранная установка позволяет изменять давление в полостях *15* корпуса (межтрубное пространство) и *10* трубопровода (трубное пространство) посредством подачи давления через запорную арматуру *14*, *18* и нагнетательные патрубки *12*, *16*. Избыточное давление контролируется манометрами *13* и *17*. На крышках *2* и *3* установлены пьезоэлектрические датчики *20*, подключенные к аппаратуре приема и обработки данных *21* и персональному компьютеру *22* с набором установленного программного обеспечения.

Данная установка позволяет моделировать конструкционные особенности исследуемых объектов (различные конструкционные материалы, толщины, особенности сборки и изготовления, особенности акустического тракта), режимы эксплуатации (различные рабочие среды, изменение рабочего давления) и дефекты в исследуемых ТА. Аппаратура АЭ осуществляет сбор и обработку сигналов АЭ, генерируемых указанными дефектами, и формирует на их основе базы данных эталонных сигналов для дальнейшего сравнения с сигналами, полученными при диагностировании объектов контроля.

Установка-стенд определяет наличие и размер сквозных дефектов объектов контроля. При этом учтен режим эксплуатации, при котором истечение рабочей среды через сквозной дефект происходит не только из трубного пространства в межтрубное, но и наоборот.

Установка работает следующим образом. В лабораторных условиях на исследуемый объект *4* наносят сквозной дефект *9*, форма и размер которого наиболее характерны для контролируемого объекта, работающего под давлением. Во втулки *5* развальцовывают концы исследуемого объекта. Далее установку собирают и герметизируют. Исследуемый объект *4* с развальцованными втулками устанавливают в корпус *1* путем прокручивания через резьбовые соединения в отверстиях *6*, *7* и со стороны крышки *2* герметизируют пробкой *19*, а со стороны крышки *3* — системой для

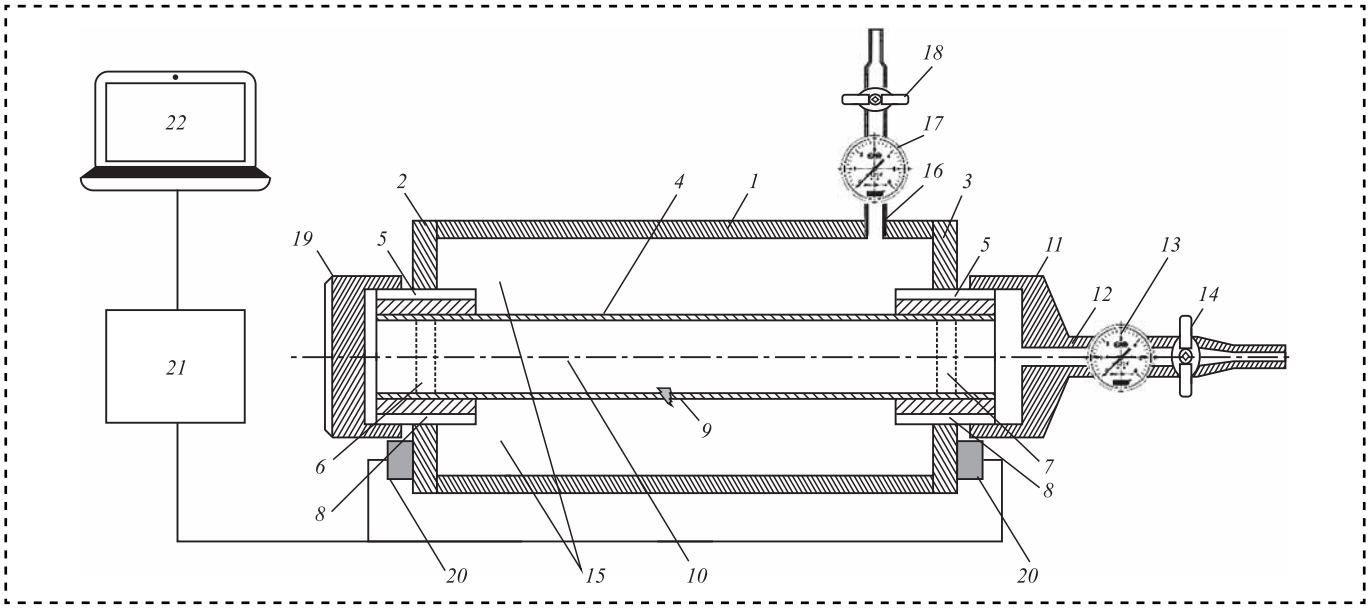



**Рис. 1. Акустико-диагностическая установка-стенд для определения сквозных дефектов объектов, работающих под давлением**

подачи избыточного давления рабочей среды в трубное пространство посредством ее запорной арматуры *14*. Далее моделируется режим работы ТА — межтрубное *15* и трубное *10* пространство заполняют испытательной средой, и создается испытательное давление, соответствующее режиму эксплуатации и контролируемое манометрами *13* и *17*.

Контроль сигналов АЭ осуществляют акустико-эмиссионным комплексом, содержащим два пьезоэлектрических датчика *20*, установленных соответственно на крышках *2* и *3* и подключенных к аппаратуре приема и обработки данных *21*, соединенной с персональным компьютером *22* с установленным набором программного обеспечения. Датчики *20* регистрируют сигналы АЭ, вызванные истечением рабочей среды, например, воздушных масс, через сквозные дефекты в направлении движения как из межтрубного (внешнего) пространства *15* в трубное (внутреннее) пространство *10*, так и обратно. При отсутствии сквозного дефекта датчик *20* регистрирует сигналы другого характера, вызванные перемещением рабочих сред в ТА в рабочих режимах эксплуатации.

Эксперименты проводили с использованием системы A-Line 32D модификации Ethernet-Box, состоящей из сетевого промышленного компьютера, комплекта соединительных кабелей, предусилителей или модулей и преобразователей АЭ (ПАЭ) (датчиков). Управление платами в корпусе сетевого промышленного компьютера осуществляется при помощи другого персонального компьютера с набором программного обеспечения.

Эталонные сигналы АЭ формируются следующим образом. В лабораторных условиях на установке датчиками *20* выявляются сигналы АЭ, генерируемые при истечении рабочей среды через сквозной дефект *9* известного размера при разных режимах истечения рабочей среды, задаваемых посредством изменения давления, после чего в аппаратуре приема и обработки сигналов *21* проводится их преобразование в цифровую форму, далее на персональном компьютере *22* в программной среде LabView формируют базы данных эталонных сигналов АЭ. Затем исследуемый трубопровод *4* заменяют на аналогичный с дефектом другого размера, и испытание повторяют при различных сочетаниях рабочих режимов. Полученные эталонные сигналы АЭ вносят в базу данных компьютера [8, 9].

После формирования эталонных сигналов АЭ и размещения их численных значений в базе данных компьютера испытывают контролируемый ТА путем подключения к нему датчиков *20* акустико-эмиссионного комплекса. Полученные на контролируемом объекте сигналы АЭ вводят в программную среду LabView, где их сравнивают с базой данных предварительно полученных эталонных сигналов АЭ, сформированной с помощью установки, и при наличии сигналов, входящих в соответствующие интервалы, выдается заключение о наличии сквозного дефекта, его размерах и местоположении.

Замену исследуемого трубопровода *4* другим проводят следующим образом. С втулки *5* свинчивают пробку *19* и систему для подачи избыточного давления рабочей среды в трубное пространство посредством соединительного патрубка *11*. Вывинчивают втулки *5* с исследуемым трубопроводом *4*. Проводят развальцовку во втулках *5* нового исследуемого трубопровода *4*. После подготовительных операций исследуемый трубопровод устанавливают на стенде.

## Примеры экспериментальных исследований, выполненных с использованием установки

**Пример 1.** Цель исследований — экспериментальное подтверждение рассчитанного порога чувствительности метода АЭ по выявлению турбулентного течения азота в ТА и оценка возможности применения метода АЭ для контроля герметичности труб ТА.

Для турбулентного течения порог чувствительности $2r_п$ можно оценить с помощью формулы

$$2r_п = \frac{\mu\,\mathrm{Re}_{кр}}{c\rho_н} = \frac{\mu\,\mathrm{Re}_{кр}}{\mathrm{v}p_н\rho_н},$$

где $\mu$ — динамическая вязкость вытекающей среды;

$\mathrm{Re}_{кр}$ — критическое число Рейнольдса;

$c$ — скорость звука в среде;

$\rho_н$ — плотность среды;

$\mathrm{v}$ — скорость движения среды в канале;

$p_н$ — давление в выходном сечении канала.

Рассчитанный порог чувствительности для азота при турбулентном течении ($\mu = 1{,}7\cdot10^{-5}$ Па·с; $\rho_н = 1{,}128$; $\mathrm{Re}_{кр} = 2\cdot10^3$) при перепаде давле-

ний $p_н$ = 0,5 МПа составляет $2r_п \approx 0{,}15$ мм. Поэтому при выполнении условия $2r_п \geqslant 0{,}15$ мм и перепаде давлений $p_н \geqslant 0{,}5$ МПа методом АЭ будет обнаружена потеря герметичности.

В качестве объектов исследования применяли трубки из стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм и длиной 400 мм с нанесенным сквозным дефектом (диаметр дефекта 0,2 мм, дефект расположен на стенке трубки со сдвигом от середины ее длины на 30 мм в одну из сторон), развальцованные во втулки. Избыточное давление в трубном и межтрубном пространстве создавали компрессором и редуктором, установленными в линии нагружения. При проведении испытаний избыточное давление составляло 0,5 МПа.

Методика проведения испытаний состоит в последовательном проведении серии экспериментов, заключающихся в создании избыточного давления в трубном и межтрубном пространстве акустико-диагностической установки с заранее нанесенным сквозным дефектом. Весь процесс испытаний контролирует прибор A-Line 32D, который фиксирует сигналы АЭ, вызванные при истечении газа через дефект (рис. 2 на стр. 2 обложки). Хронометрическая последовательность проведения каждого из экспериментов и числовые значения одного из диагностических параметров представлены в табл. 1.

В процессе проведения эксперимента получены зависимости диагностических параметров АЭ от размера и расположения дефекта. Распространение упругих колебаний, вызванных истечением газа через сквозной дефект трубки акустико-диагностической установки диаметром 0,2 мм, фиксируется датчиками, размещенными непосредственно на металлоконструкции установки. Энергетические характеристики принимаемого АЭ сигнала тем больше, чем ближе расположен ПАЭ к месту развальцовки трубок в установке. Таким образом, подтверждается возможность осуществления контроля состояния трубок, закрепленных в акустико-диагностической установке, ПАЭ, расположенными на внешней поверхности ТА. Данный факт необходимо учитывать при разработке схемы расстановки ПАЭ на поверхности различных диагностируемых ТА.

Для оценки влияния направления истечения газа (из межтрубного пространства в трубное и наоборот) на распространение АЭ сигналов проводили нагружение трубного пространства, а затем межтрубного пространства, фиксируя при этом сигналы АЭ, генерируемые при истечении газа через имеющийся сквозной дефект. Направление истечения не влияет на параметры АЭ, так как АЭ сигналы генерируются в месте истечения и одинаково распространяются по ТА до ПАЭ.

**Пример 2.** Цель исследований — определение экспериментальной зависимости изменения критического давления $p_{кр}$, при котором происходит начало пластической деформации, от параметров начального несовершенства геометрической формы трубы, и оценка возможности применения метода АЭ для контроля начала пластической деформации в материале труб ТА.

В качестве объектов исследования применяли трубы с заранее нанесенными дефектами в виде эллиптического прогиба, развальцованные во втулки (рис. 3).

В целях контроля деформации трубы предусмотрено использование тензометрического датчика перемещения зажимного типа. Для регистрации сигналов АЭ акустико-эмиссионным комплексом на крышке установки устанавливают два преобразователя АЭ, подключенных к аппаратуре приема и обработки данных A-Line32D. Тензодатчик регистрирует перемещение трубы, вызванное пластической деформацией, а преобразователи АЭ — генерируемые при этом сигналы АЭ.

*Таблица 1*

**Хронометрические показатели проведения исследования**

| Хронометраж, с | Действие | Среднее значение числа выбросов на датчиках | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ПАЭ 1 | ПАЭ 2 | ПАЭ 3 | ПАЭ 4 |
| С 1 по 10 | Нагружение | 4300 | 4240 | 3000 | 3100 |
| С 10 по 30 | Выдержка | 1240 | 1200 | 1190 | 1190 |
| С 30 по 60 | Нагружение | 4280 | 4260 | 3040 | 3090 |
| С 60 по 80 | Выдержка | 1240 | 1220 | 1200 | 1190 |

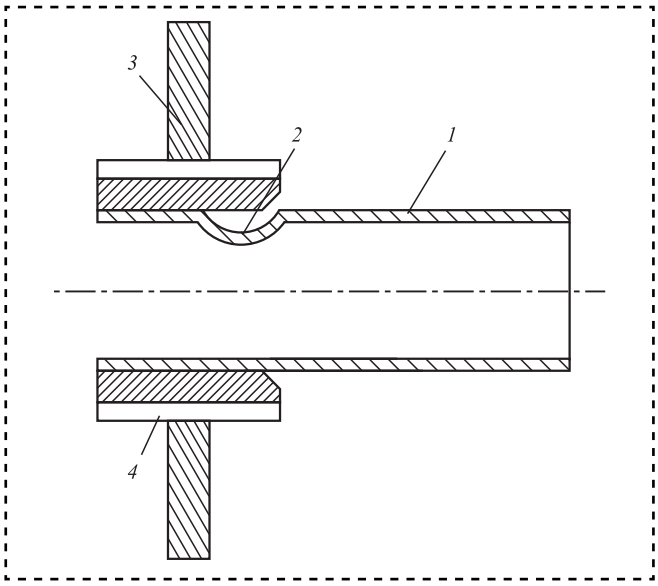



**Рис. 3. Испытательная труба с дефектом в виде прогиба:** *1* — испытательная труба; *2* — дефект в виде прогиба; *3* — крышка корпуса; *4* — втулка с внешней резьбой

Опираясь на выявленное в работе [10] наиболее опасное соотношение параметров эллиптического прогиба трубы, характеризующегося глубиной $u$, длиной $a$, шириной $b$ и составляющего $u/a/b$ = 1/3,2/1,27, подготовлены испытательные трубы с прогибами (табл. 2).

Предварительное нанесение дефектов проводили на испытательной машине Tiratest 2300 (рис. 4 на стр. 2 обложки) при помощи инденторов с параметрами площадки контакта, в соответствии с описанным ранее соотношением. Для достоверной выборки при проведении эксперимента подготовлено по 10 испытательных труб для каждого из типоразмеров дефектов (рис. 5 на стр. 2 обложки).

Для обеспечения требуемого избыточного давления (до 10 МПа в соответствии с результатами численного моделирования) использовали гидравлическое нагружение, при котором в качестве рабочей среды использовали воду. В целях обеспечения безопасности при проведении испытаний в схему испытательной установки включена бронекамера с возможностью подвода преобразователей АЭ и трубопровода от насосной станции к корпусу установки (рис. 6 на стр. 2 обложки).

*Таблица 2*

**Геометрические параметры дефектов испытательных труб, мм**

| Номер испытательной трубы | Глубина $u$ | Длина $a$ | Ширина $b$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 9,6 | 3,9 |
| 2 | 5 | 16 | 6,5 |
| 3 | 7 | 22,4 | 9,1 |
| 4 | 9 | 28,8 | 11,7 |
| 5 | 12 | 38,4 | 15,6 |

После установки испытательного трубопровода в модель ТА последовательно определяли $p_{кр}$ для труб с прогибами (начиная с наибольшего) и для бездефектных труб. Давление повышали ступенчато с шагом 0,1 МПа, после чего проводились выдержка испытательного трубопровода и регистрация сигналов АЭ.

Испытание останавливали после получения сигналов от тензодатчика о деформации трубы, регистрации на этапах выдержки сигналов АЭ амплитудой выше порога дискриминации (39 дБ) и одновременном увеличении скорости счета и суммы импульсов АЭ, сопровождающих пластическую деформацию при достижении напряжения предела текучести материала.

Получены экспериментальные значения $p_{кр}$ для труб с различными прогибами и построена экспериментальная зависимость критического давления, требуемого для деформации теплообменной трубы, от геометрического размера начального прогиба (рис. 7). Установлено, что дефект в виде локальной деформации в вальцовочном соединении существенно снижает устойчивость теплообменной трубы, уменьшая критическое давление, необходимое для развития дальнейшей пластической деформации. Полученные данные согласуются с результатами численного моделирования [10].

Таким образом, при регистрации сигналов АЭ и сопоставлении испытательного давления с параметрами дефектов труб по графику на рис. 7 представляется возможным оценивать глубину прогиба теплообменных труб.

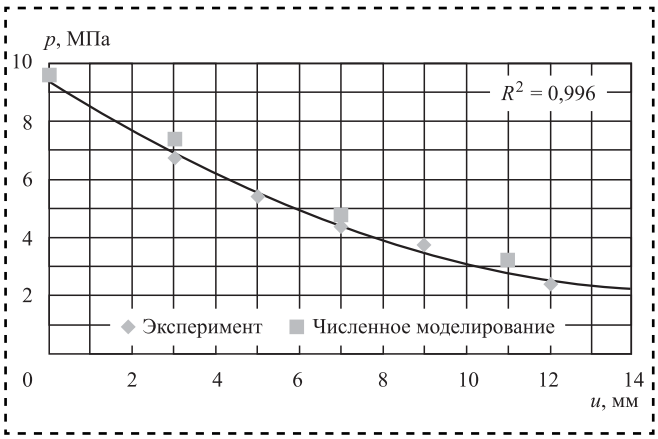



**Рис. 7. Зависимость изменения критического давления от глубины начального прогиба трубы**

## Заключение

Акустико-диагностическая установка-стенд позволяет расширить ассортимент испытуемых труб ТА путем использования сменных исследуемых объектов с различными параметрами, например, труб различных толщин и из необходимых материалов, со сквозными дефектами разных видов и размеров, а также одновременно создать различные режимы их испытания (изменением давлений нагнетания рабочих сред) и при этом определять конкретные значения сигналов АЭ, соответствующих этим параметрам и режимам, формируя эталонные значения АЭ в базе данных компьютера. Проведение моделирования различных размеров сквозных дефектов (от 50 мкм) контролируемого объекта и формирование эталонных сигналов АЭ, соответствующих каждому из типоразмеров дефектов при заданных рабочих параметрах, соответствующих реальным режимам эксплуатации ТА, повышают достоверность получаемых эталонных сигналов.

Установка-стенд предназначена для многократного применения путем использования сменных исследуемых объектов (труб) для последующего диагностирования трубных систем. Возможность осуществления заявляемой акустико-диагностической установки-стенда для определения сквозных дефектов ТА подтверждается использованием в ней известных элементов, в том числе на уровне функционального обобщения, а также материалов, применяющихся в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности. Данная установка позволяет решить задачу, заключающуюся в расширении ассортимента исследуемых труб, с одновременным увеличением достоверности получаемых результатов путем:

— получения на экспериментальной установке-стенде эталонных сигналов АЭ, характерных для истечения рабочей среды через сквозной дефект известного размера в соответствии с реальными режимами эксплуатации оборудования, работающего под давлением;

— формирования базы данных эталонных сигналов АЭ в программной среде LabView;

— получения сигналов АЭ в ходе дальнейшего проведения диагностирования производственных объектов контроля и сравнения их с базой данных эталонных сигналов АЭ в программной среде LabView и выдаче заключения о наличии, местоположении сквозного дефекта и его размере.

Достоверность полученных данных обеспечивается путем моделирования установкой-стендом технологических условий, приближенных к различным реальным условиям работы контролируемых ТА, а также путем изготовления физической модели объекта из марки материала исследуемого объекта с соответствующими размерами и допусками, требуемыми условиями контакта пьезоэлектрического датчика на поверхности модели, точностью аппаратуры и средств контроля.

## Библиографический список


1. **Меделяев И.А., Чмыхало А.И.** Модель разрушения трубок теплообменных аппаратов с учетом сверхнормативной эксплуатации в условиях коррозионного воздействия // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. Т. 19. № 5. С. 233—240.
2. **Спирягин В.В.** Анализ технического состояния металлоконструкций систем охлаждения ракетной техники, способов оценки и продления сроков их службы // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. материалов VII Международной конференции. М.: ИМЕТ РАН. 2017. С. 742—744.
3. **Меделяев И.А., Спирягин В.В., Кончаков Н.И., Кобзев И.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния медных труб при их развальцовке в отверстия трубных решеток теплообменных аппаратов и воздействии эксплуатационных нагрузок // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. Т. 20. № 3. С. 137—140.
4. **Годовой** отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 г. / М.: НТЦ ПБ, 2018. 420 с.
5. **Нефедьев Е.Ю., Смирнов А.Д., Гомера В.П.** Разработка методических приемов для повышения эффективности АЭ контроля теплобменников: сб. статей СПбПУ // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 408—418.
6. **Клюев В.В.** Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Кн. 1 / В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
7. **Патент** на полезную модель № 178291 Российская Федерация, МПК G01N 29/14. Акустико-диагностическая установка-стенд для определения сквозных дефектов объектов, работающих под давлением / А. Чмыхало, В. Спирягин, И. Меделяев, А. Челноков, С. Соловов; опубл. 28.0.2018. Бюл. № 18. 17 с.
8. **Свидетельство** о государственной регистрации базы данных № 20186204749, Российская Федерация. Локация утечки в теплообменных аппаратах / А.И. Чмыхало. Заявитель и правообладатель А.И. Чмыхало; 09.04.2018; опубл. 24.05.2018.
9. **Свидетельство** о государственной регистрации базы данных № 20186204767 Российская Федерация. Определение сквозного дефекта трубной решетки теплообменнка / В.В. Спирягин. Заявитель и правообладатель В.В. Спирягин; 11.04.2018; опубл. 29.05.2018.
10. **Меделяев И.А., Спирягин В.В., Кончаков Н.И., Кобзев И.В.** Численное моделирование процесса деформации теплообменных труб под действием внешней распределенной нагрузки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. Т. 20. № 5. С. 231—234.

УДК 697.9

**С.А. Микаева,** *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева,** *канд. экон. наук*
*(МИРЭА — Российский технологический университет)*
*E-mail: mikaeva@npo.lit*

# Сборка модулей для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением в системах вентиляции

*Описана сборка модуля для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым излучением в системах вентиляции. Представлены технические характеристики и устройство модуля МЕГАЛИТ 2200Ф.*

*The assembly of the module for air disinfection with ultraviolet radiation in ventilation systems is described. Presented technical characteristics and divice module MEGALIT 2200F.*

**Ключевые слова:** сборка, устройство, модуль, воздух, очистка, ультрафиолет, технические характеристики.

**Keywords:** assembly, device, module, air, cleaning, ultraviolet, technical characteristics.

**В** настоящее время тяжело представить нашу жизнь без приборов по очистке воздуха. Качество воздуха, которым мы дышим, существенно влияет на наше здоровье и на все живые микроорганизмы. Для решения данной проблемы используют бактерицидные облучатели, системы и модули для обеззараживания воздуха ультрафиолетовым (УФ) излучением. Подобные устройства позволяют уничтожать 99 % патогенных бактерий, тем самым обеззараживать воздух [1].

УФ-обеззараживание воздуха основано на бактерицидном действии УФ-излучения — электромагнитного излучения, занимающего диапазон между рентгеновским и видимым излучением (длина волны 100...400 нм). Различают несколько участков спектра УФ-излучения, имеющих разное биологическое воздействие: УФ-А (315...400 нм), УФ-В (280...315 нм), УФ-С (200...280 нм), вакуумный УФ (100...200 нм). Из всего УФ-диапазона участок УФ-С часто называют бактерицидным из-за его высокой обеззараживающей эффективности по отношению к бактериям и вирусам. Максимум бактерицидной чувствительности микроорганизмов приходится на длину волны 265 нм. УФ-излучение — это физический метод обеззараживания, основанный на фотохимических реакциях, которые приводят к необратимым повреждениям дезоксирибонуклеиновой (ДНК) и рибонуклеиновой кислоты (РНК) микроорганизмов. В результате микроорганизм теряет способность к размножению (инактивируется) [2].

УФ-технологию обеззараживания применяют при обеззараживании воздуха и поверхностей. Основные достоинства — высокая эффективность в отношении широкого спектра микроорганизмов, в том числе устойчивых к хлорированию (вирусы и цисты простейших); отсутствие влияния на физико-химические и органолептические свойства воздуха; не образуются побочные продукты; нет опасности передозировки; низкие капитальные затраты, энергопотребление и эксплуатационные расходы.

УФ-установки компактны и просты в эксплуатации, не требуют специальных мер безопасности.

Для обеззараживания УФ-излучением основными промышленно применяемыми источниками являются ртутные лампы высокого и низкого давления, в том числе их новое поколение — амальгамные энергоэкономичные

лампы. Лампы высокого давления обладают высокой единичной мощностью (несколько киловатт), но более низким КПД (9...12 %) и меньшим ресурсом, чем лампы низкого давления (КПД 40 %), единичная мощность которых составляет десятки и сотни ватт. УФ-системы на амальгамных энергоэкономичных лампах чуть менее компактны, но гораздо более энергоэффективны, чем системы на лампах высокого давления. Поэтому требуемое количество УФ-оборудования, а также тип и число используемых в нем УФ-ламп, зависят не только от требуемой дозы УФ-облучения, расхода и физико-химических показателей качества обрабатываемой среды, но и от условий размещения и эксплуатации [2].

Эксплуатация УФ-модуля должна осуществляться с соблюдением мер безопасности с учетом требований, указанных для установок закрытого типа в Руководстве Р3.5.1904-04 Минздрава РФ [3]. К работе с УФ-модулем допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомленные с устройством УФ-модуля и правилами его эксплуатации. На работу УФ-модуля распространяются все требования по технике безопасности при эксплуатации электрооборудования, питание которого осуществляется напряжением 220/380 ± 10 % В и частотой 50/60 Гц. Корпус УФ-модуля заземляют проводником PE в ламповом кабеле. В случае аварийной ситуации следует обесточить УФ-модуль и выключить главный выключатель.

Размещение УФ-модуля в вентиляционных установках или воздушных каналах зданий должно исключать возможность выхода УФ-излучения из воздуховодов. Контакт внешней блокировки модуля подключают в цепь включения вентиляционной установки. По мере загрязнения или ежеквартально поверхности кварцевых чехлов чистят. В случае боя бактерицидной лампы ее удаляют и утилизируют осколки. Отслужившая лампа должна быть обезврежена и утилизирована в соответствии с правилами, принятыми для обычных ртутных ламп дневного света низкого давления [4, 5].

УФ-система предназначена для обеззараживания воздуха в системах вентиляции и кондиционирования. УФ-модули применяют для снижения микробиологической обсемененности воздуха, подаваемого в помещения (например, при рециркуляции воздуха в вентиляционной системе здания, вероятности биологического загрязнения атмосферного воздуха и т.д.): в лечебно-профилактических учреждениях, жилых, производственных, торговых зданиях и сооружениях, театрах, киноконцертных залах, объектах транспортной инфраструктуры. УФ-модули внедряют в технологическую схему вновь проектируемых или уже существующих систем вентиляции и кондиционирования объектов. Климатическое исполнение УФ-модулей — УХЛ, категория размещения — 4.2 по ГОСТ 15150 (температура окружающего воздуха от +1 до +35 °С и относительной влажности воздуха до 80 % при температуре +25 °С) [6—8].

При воздействии УФ-излучения на живые микроорганизмы имеется оптимальный для их инактивации диапазон длин волн от 250 до 280 нм (рис. 1).

Обеззараживание воздуха в УФ-модуле происходит за счет воздействия на микроорганизмы бактерицидного УФ-излучения с длиной волны 254 нм. Инактивация микроорганизмов происходит за счет сообщения им достаточной дозы УФ-облучения.

Доза облучения $D$, или количество энергии, сообщаемое микроорганизмам, — главная характеристика установки УФ-обеззараживания:

$$D = \langle I \rangle \langle t \rangle,$$

где $D$ — доза УФ-облучения;

$\langle I \rangle$ — средняя интенсивность УФ-облучения;

$\langle t \rangle$ — среднее время нахождения под облучением.

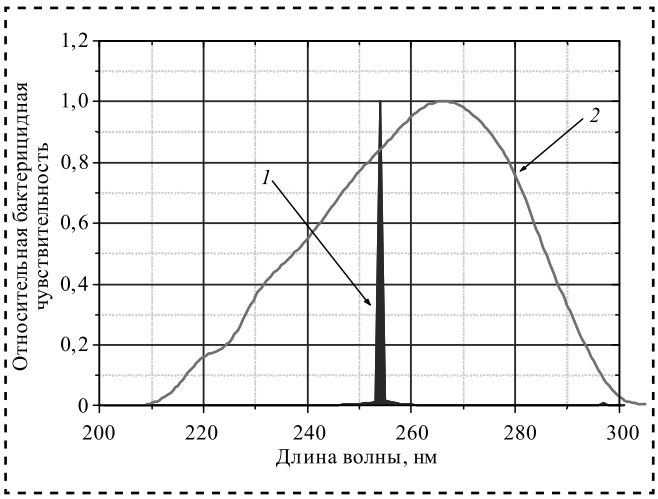



**Рис. 1. Кривая бактерицидного действия УФ-излучения:** *1* — спектральная линия 254 нм излучения УФ-лампы; *2* — бактерицидная чувствительность микроорганизмов

Экспериментально установленные значения летальных доз УФ-облучения для микроорганизмов различных видов приведены в Руководстве Р 3.5.1904—04. Значения объемной $D_V$ дозы для некоторых микроорганизмов при двух уровнях бактерицидной эффективности представлены в таблице.

В комплект поставки и сборки УФ-модуля входят пульт управления, УФ-лампа и комплект уплотнительных элементов. УФ-модуль предназначен для обеззараживания воздуха УФ-излучением в системах вентиляции и кондиционирования (рис. 2 на стр. 3 обложки). Пульт управления предназначен для управления УФ-модулем и контроля за его работой, а также для размещения электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА) (рис. 3 на стр. 3 обложки). УФ-модуль подсоединяется к воздуховоду при помощи переходников, геометрические параметры которых соответствуют присоединительным размерам воздуховодов и УФ-модуля. Внутри корпуса пульта на монтажной панели расположены ЭПРА, источник питания, блоки клеммных зажимов, реле, шпилька заземления, термостат и автоматические выключатели.

**Объемные дозы УФ-облучения для различных уровней бактерицидной эффективности**

| Вид микроорганизма | $D_V$, Дж/м$^3$, при $J_{бк}$ | |
|---|---|---|
| | 90 % | 99,9 % |
| Bacillus Anthracis | 118 | 507 |
| Bacillus Subtilis | 802 | 3380 |
| Corynebacterium Dephtheriae | 89 | 379 |
| Escherichia Coli | 79 | 385 |
| Legionella pneumophila | 53 | 221 |
| Mycobacterium Tuberculosis | 142 | 583 |
| Pseudomonas Aeruginosa (environmental strain ) | 145 | 612 |
| Pseudomonas Fluorescens | 92 | 385 |
| Salmonella Enteritidis | 105 | 443 |
| Salmonella paratyphoid (enteric fever) | 60 | 356 |
| Staphylococcus aureus | 130 | 385 |
| Influenza virus | 95 | 385 |
| Hepatitis virus | 68 | 466 |
| Poliovirus (Poliomyelitis) | 289 | 1224 |
| Rotavirus | 342 | 1400 |
| Aspergillus niger (black) | 4734 | 19 240 |
| Mucor ramosissimus (white gray) | 510 | 2058 |
| Penicillum digitatum (olive) | 1262 | 5130 |
| Paramecium | 1640 | 11 660 |
| Baker's yeast | 126 | 513 |
| Brever's yeast | 95 | 385 |
| Common yeast cake | 192 | 770 |
| Saccaharomyces var. ellipsoides | 192 | 770 |
| Saccaharomyces sp. | 255 | 1026 |

Панель оператора служит для индикации состояний УФ-системы и настройки технологических параметров (рис. 4 на стр. 3 обложки). Область режима работы УФ-системы отображает текущую наработку ламп и число неисправных ламп. Кнопка ПУСК — это включение УФ-ламп. Модуль может работать в системе переключения Местное—Дистанционное. Сообщения — раздел меню, содержащий сообщения о предупреждениях и авариях. Раздел меню также содержит информацию о состоянии ламп, о выключении УФ-ламп, а также позволяет редактировать параметры системы модуля.

*Технические характеристики МЕГАЛИТ 2200Ф*

Материал корпуса:
- УФ-модуль . . . . . Оцинкованная сталь/AISI 430
- пульт управления . . . . . Окрашенная сталь

Габаритные размеры, длина×ширина×высота, мм:
- УФ-модуль . . . . . 2000×500×310
- пульт управления . . . . . 620×222×780

Размер шины фланца, мм . . . . . 20

Сечение вентиляционного канала, мм . . . . . 400×250

Масса, не более, кг:
- УФ-модуль . . . . . 50
- пульт управления . . . . . 40

Степень пыле- и влагозащищенности:
- УФ-модуль . . . . . IP 40
- пульт управления . . . . . IP 54

Скорость потока в УФ-модуле, м/с . . . . . 4...10

Расход при эффективности 99,9 %, м$^3$/ч . . . . . 2200

Минимальный расход, м$^3$/ч . . . . . 1440

Число ламп, шт. . . . . 2

Тип ламп. . . . . ФОТОТРОН 158

Номинальный ресурс работы лампы, ч . . . . . 16 000

Число включений/выключений, не более. . . . . 5000

Потребляемая мощность, не более, кВт. . . . . 0,94

Напряжение питания, В . . . . . 220 ± 10%

Частота питающего напряжения, Гц . . . . . 50 ± 1

Тепловыделение в пульте управления, не более, Вт . . . . . 10 % от потребляемой мощности модуля

Длина соединительных кабелей "пульт—УФ-модуль", м . . . . . 12

Отслужившие лампы должны быть обезврежены и утилизированы в соответствии с постановлением Правительства РФ № 681 от 03.09.2010 "Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде".

Бактерицидные модули эффективны против всех видов микроорганизмов, включая нанобактерии и вирусы, безопасны в применении, имеют свободный доступ к внутренним элементам установки, малые потери напора и эксплуатационные расходы. Они размещаются как в существующих, так и в проектируемых воздуховодах.

Собранные бактерицидные модули применяют в многоэтажных жилых зданиях и сооружениях, деловых, торговых, спортивных центрах, общеобразовательных и дошкольных учреждениях, в общественно-культурных учреждениях, на промышленных предприятиях, вокзалах и аэропортах, медицинских и лечебно-профилактических учреждениях, фармацевтическом производстве, предприятиях пищевой промышленности, общественного питания и торговли, в агропромышленных комплексах, на складах и хранилищах готовой продукции и сырья, а также в логистических распределительных центрах.

### Библиографический список


1. **ГОСТ 25375—82.** Методы, средства и режимы стерилизации и дезинфекции изделий медицинского назначения. Термины и определения. М.: Издательство стандартов. 1986.
2. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. С. 228.
3. **Р.3.5.1904—04.** Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях. М.: Федеральный Центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. 2005.
4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания ультрафиолетовым излучением // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 11. С. 59—64.
5. **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка установки очистки воздуха // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 302—307.
6. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017.
7. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: МИРЭА, 2017.
8. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.

**ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"**
**продолжает подписку на журнал**

**"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"**

☑ *За наличный и безналичный расчет.*
☑ *С любого номера и на любой срок.*
☑ *Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: 8 (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 678.073:661.481

**С.В. Панин,** *д-р техн. наук,* **Л.А. Корниенко,** *канд. физ.-мат. наук*
*(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск),*
**Ле Тхи Ми Хиеп, Д.Г. Буслович, Нгуен Дык Ань**
*(Томский политехнический университет)*
*E-mail: rosmc@ispms.tsc.ru*

# Многокомпонентные высокопрочные антифрикционные композиты на основе полифениленсульфида*

*Исследованы механические и триботехнические характеристики композитов на основе полифениленсульфида (ПФС), наполненных политетрафторэтиленом (ПТФЭ), коллоидным графитом (КГр) и молотыми углеродными волокнами (МУВ, 200 мкм). Установлено, что наилучшими характеристиками прочности и износостойкости обладает многокомпонентный композит состава ПФС + 10 % ПТФЭ + 10 % КГр + 10 % МУВ. Введение политетрафторэтилена обеспечивает твердосмазочный эффект, повышает износостойкость композита в 18 раз, уменьшает коэффициент трения в 3 раза при металлополимерном сопряжении, в то время как при керамополимерном трибосопряжении износостойкость возрастает в 14 раз при уменьшении коэффициента трения в 2,5 раза. Армирующие углеродные волокна микронного (200 мкм) размера увеличивают модуль упругости при изгибе в 1,5 раза, а частицы коллоидного графита за счет повышенной теплопроводности обеспечивают более однородное формирование структуры и повышение твердости полимерной матрицы. Многокомпонентный композит на основе ПФС может быть рекомендован для узлов трения в машиностроении как в металлополимерных, так и керамополимерных трибосопряжениях.*

*The mechanical and tribotechnical properties of polyphenylene sulfide (PPS) based composites filled with polytetrafluoroethylene (PTFE), colloidal graphite (CGr) and milled (short) carbon microfibers (MCF, 200 μm long) were investigated. It is revealed that the multicomponent composite "PPS + 10 % PTFE + 10 % CGr + 10 % MCF" possesses the best values of strength and wear resistance properties. Loading of the polytetrafluoroethylene provides solid lubrication increasing the wear resistance of the composite by 18 times, reducing the friction coefficient by 3 times at metal-polymer friction pairs, while at ceramic-polymer one wear resistance increases by 14 times at the friction coefficient decreasing by 2.5 times. Reinforcement by the short carbon fibers (200 μm long) increases the flexural modulus by 1.5 times. Colloidal graphite particles due to higher heat conductivity ensure formation of more uniform polymer matrix with increased hardness. A multi-component PPS based composite is recommended for application in friction units in mechanical engineering for both metal-polymer and ceramic-polymer tribounits.*

**Ключевые слова:** полифениленсульфид, политетрафторэтилен, графит, углеродное волокно, модуль упругости, износостойкость, надмолекулярная структура.

**Keywords:** PPS, PTFE, grafhite, carbon, microfiller, elasticity modulus, wear resistance, permolecular structure.

Полифениленсульфид (ПФС) — перспективный высокотемпературный конструкционный термопласт, обладающий высокими показателями теплостойкости, жесткости, ударопрочности, гидролизно-химической стойкости, технологичности, формостабильности, высокой адгезией к большинству материалов (стеклу, керамике, титану, бронзе, стали). Это определяет области его применения: машиностроение, авиационная и автомобильная, газовая и нефтяная промышленности, электротехника и т.д. [1—2]. Однако чистый ПФС обладает низкой износостойкостью и высоким коэффициентом трения (более 0,34), что ограничивает его применение в узлах трения.

* Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013—2020 гг., а также поддержана грантом президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8. Работа поддержана грантом РФФИ № 18-58-00037.

Для повышения триботехнических характеристик полимеров, как правило, используют различные типы наполнителей, прежде всего твердосмазочные микрочастицы (ПТФЭ, $MoS_2$, графит, нитрид бора и др.), а также нанонаполнители (углеродные нановолокна/нанотрубки, наночастицы на основе оксидов, нитридов, карбонитридов) [3—5]. Совместное введение твердосмазочных и армирующих наполнителей в полимерную матрицу позволяет комплексно повысить трибомеханические характеристики, расширяя тем самым номенклатуру и области применения полимерных композитов с заданными эксплуатационными свойствами в узлах трения машин и механизмов.

Нановолокна/наночастицы выполняют роль твердой смазки в композитах на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), повышая износостойкость в 2—5 раз и снижая коэффициент трения [6—8]. Неорганические нанонаполнители в ПФС не выполняют роль твердой смазки, что обусловлено формирующейся слоистой фрагментарной надмолекулярной структурой, препятствующей равномерному распределению нанонаполнителей в композиции на основе ПФС. Поэтому в ПФС-матрицу в качестве армирующего наполнителя вводят короткие углеродные (микро)волокона (МУВ), а в качестве твердосмазочных наполнителей — политетрафторэтилен (ПТФЭ) и коллоидный графит (КГр), которые в совокупности могут защитить матрицу от режущего воздействия углеродных волокон и улучшить структуру полимера за счет выравнивания градиента температуры при спекании и твердосмазочного действия при трибонагружении.

Цель работы — поиск эффективного комплексного твердосмазочного наполнителя для ПФС и исследование механических и триботехнических характеристик композитов на основе ПФС, в состав которых введены: политетрафторэтилен; армирующие молотые углеродные волокна микрометровой размерности (200 мкм); порошковый коллоидный графит в условиях сухого трения скольжения.

## Методика проведения экспериментов и полученные результаты

Использовали порошок ПФС фирмы Ticona Fortron (0205B4) со средним размером частиц 20 мкм, мелкодисперсный порошок ПТФЭ 5...15 мкм, углеродные микроволокна со средней длиной 200 мкм (диаметр 7,5 мкм) и мелкодисперсный порошок коллоидного графита (5 мкм). Композиты на основе ПФС получали методом горячего прессования при температуре 360 °С с последующим охлаждением со скоростью 5 °С/мин.

Твердость по Шору *D* определяли на приборе Instron 902 в соответствии с ASTM D 2240. Испытания на трехточечный изгиб проводили на электромеханической испытательной машине Instron 5582 согласно ISO 178:2010. Объемный износ образцов в режиме сухого трения скольжения определяли по схеме "шар-по-диску" на трибометре CSEM CH2000 (CSEM, Швейцария) при нагрузке 10 Н (контактное давление $[P_{max}]$ = 31,8 МПа) и скорости скольжения 0,3 м/с на двух контртелах (металлическом и керамическом). Радиус контртел: шариков из стали ШХ15 и керамики $ZrO_2$ составлял 6 мм. Дистанция испытаний — 3 км, радиус траектории вращения — 10 мм, круговая частота вращения — 286 мин$^{-1}$.

Для исследования топографии и шероховатости поверхностей изнашивания образцов использовали оптический микроскоп Neophot2 (Carl Zeiss, Jena) и профилометр New View 6200 (Zygo). Надмолекулярную структуру композитов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхностях скола образцов с надрезом, механически разрушенных после выдержки в жидком азоте. Кристалличность образцов определяли на совмещенном анализаторе SDT Q600 (TA Instruments, США) [10].

Исследованы двухкомпонентные смеси с твердосмазочными наполнителями (КГр, ПТФЭ) и армирующими (углеродными) микроволокнами. В табл. 1 приведены механические характеристики полифениленсульфида и композитов на его основе.

Плотность всех исследованных композитов возрастает при наполнении матрицы как неорганическими (КГр, МУВ), так и органическими наполнителями (ПТФЭ). Модуль упругости при изгибе *G* возрастает при наполнении матрицы ПФС армирующими наполнителями (молотые углеродные волокна), и уменьшается (на 11 %) при наполнении ПТФЭ. Предел прочности композитов уменьшается вдвое при наполнении матрицы политетрафторэтиленом, а при наполнении рублеными

*Таблица 1*

**Механические характеристики ПФС и композитов на его основе**

| Композиты | Плотность ρ, г/см$^3$ | Твердость по Шору *D* | Модуль упругости при изгибе *G*, МПа | Предел прочности $\sigma_в$, МПа | Относительное удлинение ε, % | Кристалличность μ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ПФС | 1,33 | 79,5 ± 0,5 | 3930 ± 71 | 97,8 ± 1,6 | 2,56 ± 1,4 | 50,6 |
| ПФС + КГр | 1,39 | 73,5 ± 0,8 | 4040 ± 139 | 57,3 ± 12,1 | 1,36 ± 0,1 | 50,0 |
| ПФС + ПТФЭ | 1,41 | 74,1 ± 0,5 | 3596 ± 140 | 46,0 ± 4,9 | 1,27 ± 0,1 | 31,1 |
| ПФС + МУВ | 1,38 | 80,6 ± 0,5 | 6014 ± 1495 | 99,7 ± 10,6 | 1,5 ± 0,3 | 34,2 |
| ПФС + КГр + ПТФЭ | 1,44 | 72,9 ± 0,6 | 5187 ± 1035 | 48,5 ± 2,7 | 1,2 ± 0,1 | 36,5 |
| ПФС + КГр + МУВ | 1,43 | 75,9 ± 0,4 | 5997 ± 253 | 70,7 ± 4,4 | 0,98 ± 0,1 | 37,6 |
| ПФС + КГр + ПТФЭ + МУВ | 1,45 | 74,5 ± 0,3 | 5469 ± 665 | 50,4 ± 3,9 | 0,85 ± 0,1 | 22,6 |

Примечание. Массовая доля наполнителей КГр, ПТФЭ, МУВ — 10 %.

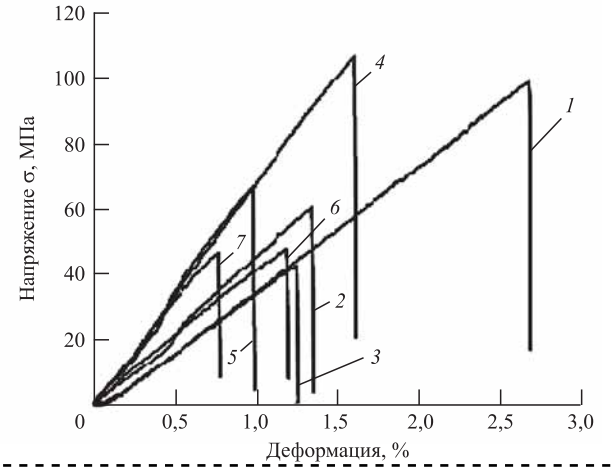



**Рис. 1. Диаграмма деформирования:**
*1* — ПФС; *2* — ПФС + 10 % КГр; *3* — ПФС + 10 % ПТФЭ; *4* — ПФС + 10 % МУВ; *5* — ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ; *6* — ПФС + 10 % КГр + 10 % МУВ (200 мкм); *7* — ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ + 10 % МУВ (200 мкм) (трехточечный изгиб)

углеродными волокнами возрастает на 10 %. Влияние каждого из наполнителей на механические свойства композиций на основе ПФС иллюстрирует рис. 1. Комплексное введение твердосмазочных и армирующих наполнителей позволяет оптимально сочетать высокую износостойкость с необходимым уровнем прочностных характеристик композитов.

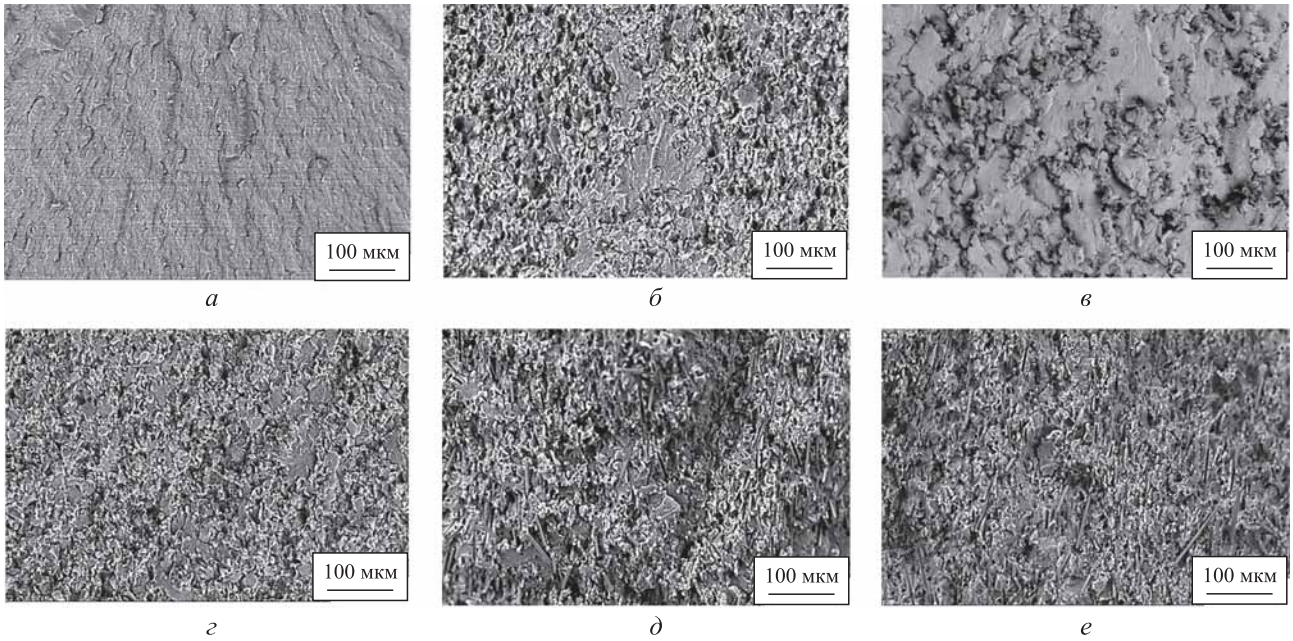



**Рис. 2. РЭМ-изображения надмолекулярной структуры:**
*а* — ПФС; *б* — ПФС + 10 % КГр; *в* — ПФС + 10 % ПТФЭ; *г* — ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ; *д* — ПФС + 10 % КГр + 10 % МУВ (200 мкм); *е* — ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ + 10 % МУВ (200 мкм)

На рис. 2 приведены РЭМ-фотографии надмолекулярной структуры ненаполненного ПФС и всех исследованных композиций на его основе. В исходном ПФС наблюдается однородная фрагментарная надмолекулярная структура (рис. 2, *а*). В композите "ПФС + 10 % КГр" надмолекулярная структура менее однородная, что, вероятно, связано с неоднородным распределением частиц коллоидного графита (рис. 2, *б*). Частицы ПТФЭ распределяются (концентрируются) по границам фрагментов матрицы (рис. 2, *в*). Наиболее однородная надмолекулярная структура наблюдается в многокомпонентном композите "ПФС + + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ + + 10 % МУВ" (рис. 2, *е*).

Триботехнические характеристики приведенных выше композитов в условиях сухого трения на металлическом и керамическом контртелах представлены в табл. 2.

Политетрафторэтилен обеспечивает твердую смазку, повышает износостойкость матрицы в 18 раз, уменьшает коэффициент трения в 3 раза при металлополимерном трибосопряжении (рис. 3). При керамополимерном трибосопряжении износостойкость возрастает в 14 раз при уменьшении коэффициента трения в 2,5 раза. Армирующие молотые углеродные волокна микронного (200 мкм) размера увеличивают модуль упругости при изгибе практически вдвое.

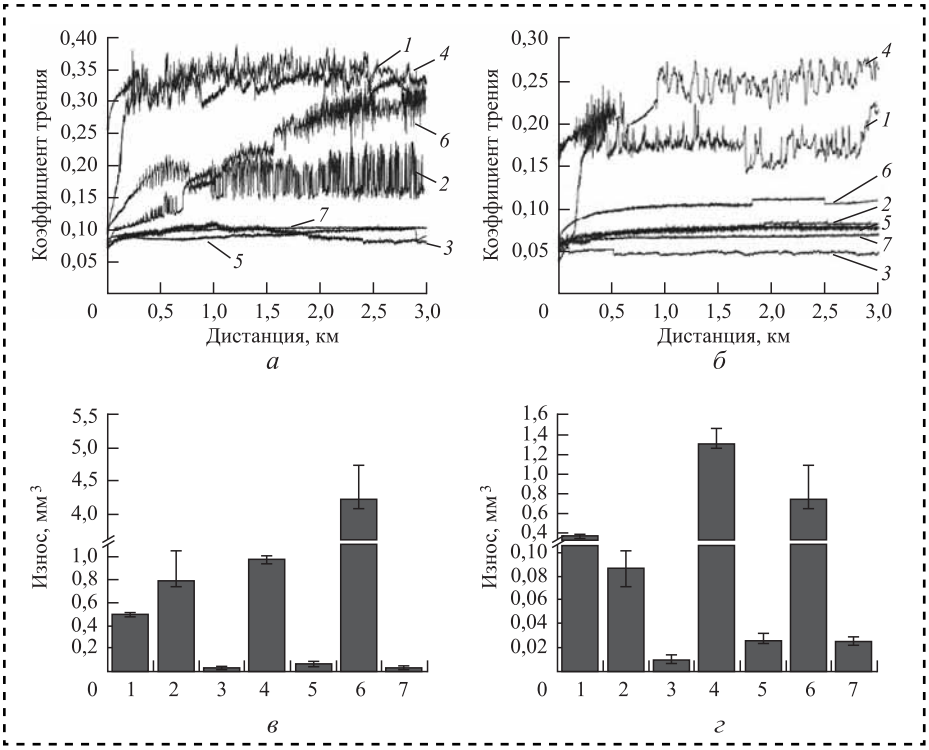



**Рис. 3. Диаграммы коэффициента трения (*а*, *б*) и интенсивности износа (*в*, *г*):** *1* — ПФС; *2* — ПФС + 10 % КГр; *3* — ПФС + 10 % ПТФЭ; *4* — ПФС + 10 % МУВ (200 мкм); *5* — ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ; *6* — ПФС + 10 % КГр + 10 % МУВ (200 мкм); *7* — ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ + 10 % МУВ (200 мкм); *а*, *в* — металлическое контртело; *б*, *г* — керамическое контртело

*Таблица 2*

**Триботехнические характеристики ПФС и композитов на его основе ("шар-по-диску")**

| Композиты | Коэффициент трения | | Объемный износ, мм$^3$ | |
|---|---|---|---|---|
| | Металлическое контртело | Керамическое контртело | Металлическое контртело | Керамическое контртело |
| ПФС | 0,30 ± 0,02 | 0,17 ± 0,03 | 0,49 ± 0,015 | 0,37 ± 0,005 |
| ПФС + КГр | 0,17 ± 0,03 | 0,07 ± 0,006 | 0,78 ± 0,28 | 0,086 ± 0,014 |
| ПФС + ПТФЭ | 0,093 ± 0,02 | 0,048 ± 0,002 | 0,031 ± 0,009 | 0,009 ± 0,0045 |
| ПФС + МУВ | 0,32 ± 0,02 | 0,234 ± 0,027 | 0,98 ± 0,04 | 1,31 ± 0,15 |
| ПФС + КГр + ПТФЭ | 0,092 ± 0,01 | 0,074 ± 0,005 | 0,058 ± 0,01 | 0,025 ± 0,007 |
| ПФС + КГр + МУВ | 0,23 ± 0,06 | 0,103 ± 0,008 | 4,2 ± 0,53 | 0,05 ± 0,01 |
| ПФС + КГр + ПТФЭ + МУВ | 0,1 ± 0,01 | 0,067 ± 0,002 | 0,027 ± 0,005 | 0,025 ± 0,004 |

Примечание. Массовая доля наполнителей КГр, ПТФЭ, МУВ — 10 %.

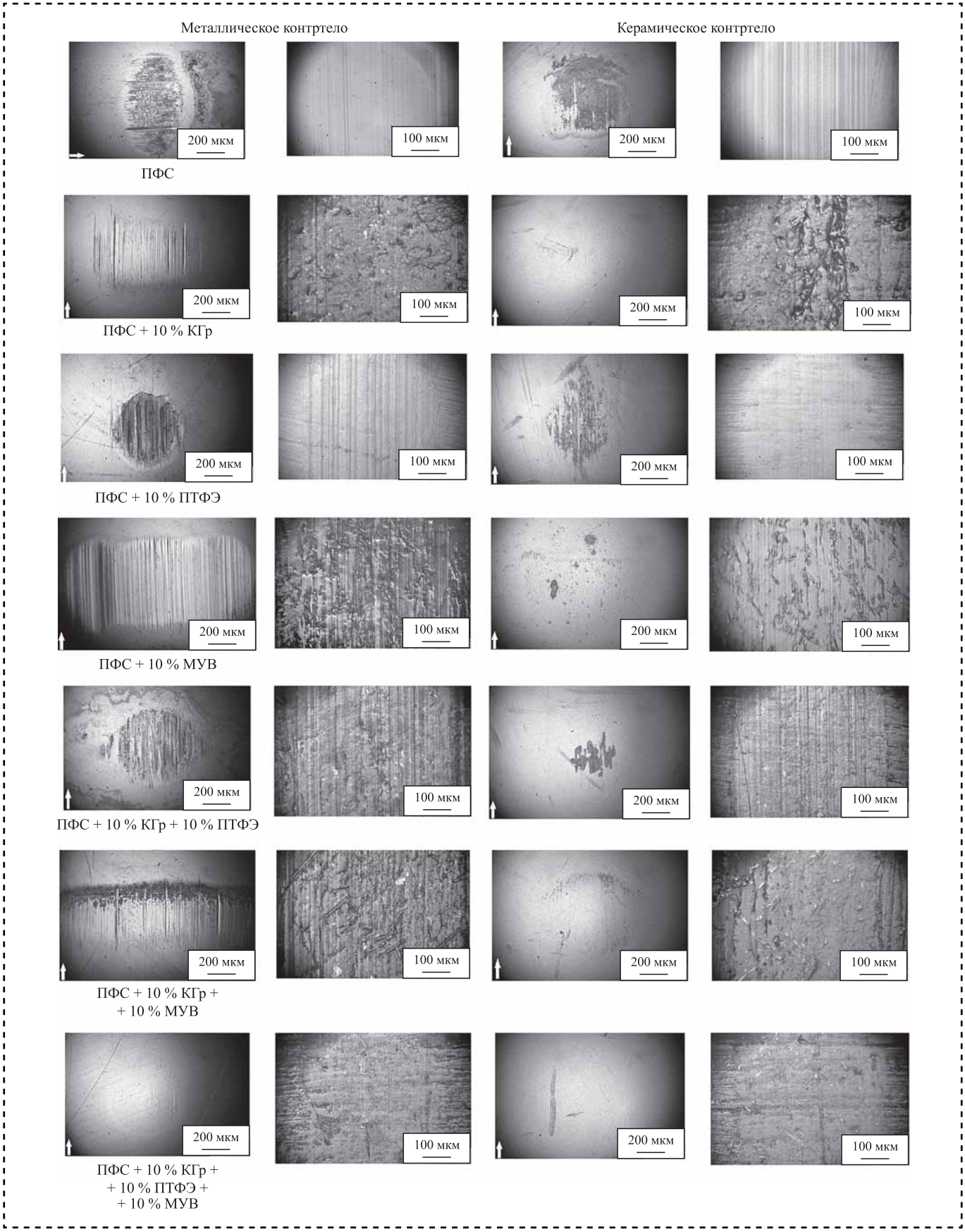



**Рис. 4. Оптические фотографии топографии поверхностей изнашивания образцов и контртел**

Таким образом, частицы ПТФЭ — эффективный твердосмазочный наполнитель для композитов на основе ПФС как в металлополимерных, так и в керамополимерных сопряжениях (рис. 3, *в* и *г*).

На рис. 4 приведены фотографии топографии поверхностей изнашивания образцов и контртел (металлического и керамического) всех исследованных композитов на основе ПФС. Наименьшие показатели шероховатости поверхностей образцов наблюдали в четырехкомпонентном композите ПФС + 10 % КГр + 10 % ПТФЭ + 10 % МУВ как при металлополимерном сопряжении, так и при керамополимерном трибосопряжении. При этом ПТФЭ выполняет роль твердой смазки, а углеродные волокна микронной размерности "защищают" поверхность образцов от изнашивания, повышая в совокупности износостойкость многокомпонентного композита на основе ПФС в различных условиях трибосопряжения.

## Заключение

Исследованы трибомеханические свойства композитов на основе матрицы ПФС с твердосмазочными и армирующими наполнителями в условиях металлополимерного и керамополимерного сопряжений. Наилучшими характеристиками прочности и износостойкости обладает многокомпонентный композит состава ПФС + 10 % ПТФЭ + 10 % КГр + 10 % МУВ. Преимущества трехкомпонентного композита над двухкомпонентными обусловлены формированием более однородной надмолекулярной структуры в матрице с фрагментарной структурой. Многокомпонентный композит на основе ПФС может быть рекомендован для узлов трения в машиностроении как в металлополимерных, так и керамополимерных сопряжениях.

## Библиографический список


1. **Stoeffler K., Andjelic S., Legros N. et al.** Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber // Compos. Sci. Technol. 2013. N 84. P. 65—71. DOI: 10.1016 / j.compscitech. 2013.05.005.
2. **Sebastian R., Noll A., Zhang G. et al.** Friction and wear of PPS/CNT nanocomposites with formation of electric isolating transfer films // Tribol Int. 2013. N 64. P. 187—195. DOI: 10.1016 / j.triboint.2013.04.004.
3. **Yu L., Bahadur S., Xue Q.** An investigation of the friction and wear behaviors of ceramic particle filled polyphenylene sulfide composites // Wear. 1998. N 214. P. 54—63. DOI: 10.1016/ S0043-1648(97)00215-9.
4. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Shilko S.V.** Influence of Nano- and Microfillers on the Mechanical and Tribotechnical Properties of "UHMWPE-PTFE" Composites // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 712. P. 161—165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.161.
5. **Cho M.H., Bahadur S.** Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites // Wear. 2005. N 258. P. 835—845. DOI: 10.1016/ j.wear.2004.09.055.
6. **Noll A., Burkhart T.** Morphological characterization and modelling of electrical conductivity of multi-walled carbon nanotube/poly(p-phenylene sulfide) nanocomposites obtained by twin screw extrusion // Compos Sci Technol. 2011. N 71. P. 499—505. DOI: 10.1016/j.compscitech. 2010.12.026.
7. **Yu L., Bahadur S., Xue Q.** An investigation of the friction and wear behaviors of ceramic particle filled polyphenylene sulfide composites // Wear. 1998. N 214. P. 54—63. DOI: 10.1016/ S0043-1648(97)00215-9.
8. **Влияние** углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК / С.В. Панин и др. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017, Т. 60. № 9. С. 45—51.
9. **Panin S.V., Le T.M.H., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Ivanova L.R., Ovechkin B.B.** Mechanical and tribotechnical properties of polyphenylene sulfide composites reinforced with carbon fibers of various dimension // AIP Conference Proceedings. 2018. 2051. 020231; https://doi.org/10.1063/1.5083474.
10. **Hay J.N., Luck D.A.** The conformation of crystalline PPS // Polymer. 2001. N 42. P. 8297—8301.

УДК 621.778.016.3.004.18

**Г.Н. Гурьянов,** *канд. техн. наук (ОАО "НИИМетиз", г. Магнитогорск),*
**Н.Г. Гурьянов** *(ООО "Башкирская сетевая компания", г. Белорецк)*
*E-mail: ggnbelorhome@ rambler.ru*

# Величина дельта-критерия формы очага деформации в зависимости от параметров процесса волочения круглого сплошного профиля

*Предложены показатели для оценки деформированного состояния при волочении круглого сплошного профиля. Приведены значения дельта-критерия формы очага деформации и предложенных показателей при фиксированном и оптимальном угле волочения при различных моделях упрочнения обрабатываемого материала и коэффициентах вытяжки и трения, напряжения противонатяжения. Представлены зависимости для оценки связи между критериями очага деформации и показателями деформированного состояния, формулы для расчета оптимальной величины дельта-критерия. Рассмотрены зависимости от коэффициента трения для осевого напряжения, коэффициента запаса прочности И.Л. Перлина и показателя напряженного состояния В.Л. Колмогорова при фиксированном и оптимальном угле волочения.*

*Учет критериев формы очага деформации и показателей деформированного состояния способствует выбору рациональных режимов волочения круглого сплошного профиля.*

*The proposed indicators to assess the deformed state when drawing a round solid profile. The values of the delta-criteria are given: the criterion of the shape of the deformation zone and the proposed indicators for a fixed and optimal value of the drawing angle for different models of hardening of the material being processed and the values of drawing and friction coefficients, anti-tension stresses. Dependencies are proposed to assess the relationship between the criteria of the deformation zone and the indicators of the deformed state. Formulas for calculating the optimal value of the delta criterion are proposed. The dependences on the friction coefficient for axial stress, the safety factor I.L. Perlin, and the stress state indicator V.L. Kolmogorov at a fixed and optimal angle of dragging.*

*Taking into account the criteria for the shape of the deformation zone and indicators of the deformed state contributes to the choice of rational modes of drawing a round solid profile.*

**Ключевые слова:** волочение, проволока, пруток, рабочий канал волоки, критерии формы очага деформации, степень деформации сдвига, показатели деформированного состояния, коэффициент вытяжки, относительное обжатие.

**Keywords:** drawing, wire, rod, working channel of die drawing, criteria for the shape of the deformation zone, degree of shear deformation, indicators of the deformed state, drawing ratio, relative reduction.

**В** отечественной теории волочения для исследования напряженно-деформированного состояния круглого сплошного профиля (проволоки, прутка) редко используют комбинированные показатели формы очага деформации. Энергосиловые показатели процесса волочения наиболее часто определяют в зависимости от коэффициентов вытяжки $\mu$ и трения $f$, угла $\alpha$ наклона к оси волочения образующей рабочего конуса волоки [1—3]. В зарубежных публикациях при исследованиях процесса волочения форму очага деформации часто оценивают дельта-критерием [4—7]:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r}\left(1+\sqrt{1-r}\right)^2, \qquad (1)$$

где $r$ — относительное обжатие поперечного сечения, $r = \left(d_0^2 - d_к^2\right)/d_0^2 = (\mu - 1)/\mu$;

$\mu$ — коэффициент вытяжки, $\mu = (d_0/d_к)^2$;

$d_0$, $d_к$ — диаметр проволоки (прутка) до и после деформации;

$\alpha$ — угол волочения, рад.

Относительное обжатие в отечественной литературе обычно обозначают "$\delta$".

Критерий $\Delta$ из формулы (1) не характеризует относительную высоту очага деформации

круглого сплошного профиля в коническом канале волоки. Относительную длину очага деформации выразили через критерий $\Delta$:

$$\Delta^* = 1/\Delta. \quad (2)$$

Математические преобразования устанавливают равенство для конического канала очага деформации [8, 9]:

$$\frac{\left(1+\sqrt{1-r}\right)^2}{r} = \frac{d_0 + d_к}{d_0 - d_к}. \quad (3)$$

Левая часть отношения (3) входит в формулу (1). Если принять равенство значений $\alpha$ и $\mathrm{tg}\alpha$, то $\Delta = d_{ср}/L = (L/d_{ср})^{-1}$, тогда имеем:

$$\frac{4\alpha}{Ln\mu} = \alpha\frac{d_0 + d_к}{d_0 - d_к} = \frac{d_{ср}}{L} = \Delta \text{ или } \frac{Ln\mu}{\alpha} = \frac{4L}{d_{ср}} = \frac{4}{\Delta}. \quad (4)$$

Для установления характера связи критерия $\Delta$, коэффициента вытяжки $\mu$ и относительного обжатия $r$ получены зависимости:

$$\Delta = \frac{\alpha\left(\sqrt{\mu}+1\right)}{\sqrt{\mu}-1} = \frac{\alpha\left(\sqrt{1/(1-r)}+1\right)}{\sqrt{1/(1-r)}-1}; \quad (5)$$

$$\mu = \frac{1}{1-r} = \left(\frac{\Delta+\alpha}{\Delta-\alpha}\right)^2. \quad (6)$$

Оптимальный угол $\alpha_{опт}$ рабочего конуса волоки, при котором наблюдается минимальная сила волочения, зависит от условий контактного трения и модели упрочнения протягиваемого материала проволоки [1—3], т.е. оптимальная величина критерия $\Delta_{опт}$ также определяется величиной коэффициента трения и параметрами кривой упрочнения материала проволоки (прутка) в отличие от произвольной величины критерия $\Delta$ из формулы (1). Поэтому представляет интерес сравнение критерия $\Delta$ при фиксированном $\alpha$ и критерии $\Delta_{опт}$ при $\alpha_{опт}$.

В работах [8—10] показано влияние различных безразмерных критериев на напряжение волочения и запас прочности проволоки. Рассмотрим характер связи критериев формы очага деформации $\Delta$ и $\Delta^*$ с безразмерными показателями $\Phi_1$ и $\Phi_2$:

$$\Phi_1 = \mathrm{tg}\alpha/\ln\mu; \quad (7)$$

$$\Phi_2 = \ln\mu/\mathrm{tg}\alpha. \quad (8)$$

При расчетах напряжения волочения и других показателей иногда принимают $\mathrm{tg}\alpha = \alpha$. Приближенными аналогами показателей $\Phi_1$ и $\Phi_2$ являются выражения соответственно:

$$\chi_1 = \alpha/\ln\mu; \quad (9)$$

$$\chi_2 = \ln\mu/\alpha. \quad (10)$$

При волочении показатель $\mathrm{tg}\alpha$ отражает среднюю по сечению проволоки деформацию сдвига [11]. Показатель $\ln\mu$ определяет деформацию формоизменения [1—3, 11—13]. Таким образом, критерии $\Phi_1$ и $\Phi_2$ представляют отношения приближенных значений для деформации сдвига и деформации формоизменения. Правомерность принятия равенства $\mathrm{tg}\alpha = \alpha$ при расчете критериев $\chi_1$ и $\chi_2$ оценим из сравнения значений соответствующих критериев $\Phi_1$ и $\chi_1$, $\Phi_2$ и $\chi_2$.

**Цель работы** — сравнение критериев $\Delta$, $\Delta^*$, $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\chi_1$, $\chi_2$ при разных параметрах деформации в коническом канале волоки и определение характера влияния критерия формы очага деформации $\Delta$ на напряжение волочения, запас прочности и показатели деформированного состояния $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\chi_1$, $\chi_2$.

Приняли следующие модели упрочнения:

$$\sigma_т = 340\mu^{1,37} \text{ МПа}; \quad (11)$$

$$\sigma_т = 340 + 950(\ln\mu)^{0,37} \text{ МПа}; \quad (12)$$

$$\sigma_т = 340 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Модель упрочнения (12) получена для проволочной заготовки из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т при термической обработке по заводскому режиму: охлаждение в воде после выдержки при 1050 °С [14]. Для выяснения формы кривой упрочнения при равном исходном пределе $\sigma_{т0}$ = 340 МПа приняты модели упрочнения (11) и (13). Эмпирическая зависимость (13) отражает отсутствие деформационного упрочнения. На рис. 1 приведены зависимости предела текучести от коэффициента вытяжки $\mu$ в интервале его изменения 1,05...2,0, при котором нижняя и верхняя границы изменения единичного обжатия $r(\delta)$ соответственно равны 0,05 и 0,51.

Кривая *1* модели упрочнения (11) отражает почти линейный рост предела текучести $\sigma_т$ от коэффициента вытяжки. Кривая *2* модели (12) показывает интенсивное упрочнение при малой степени деформации ($\mu < 1,2$). В заданном интервале изменения коэффициента вытяжки

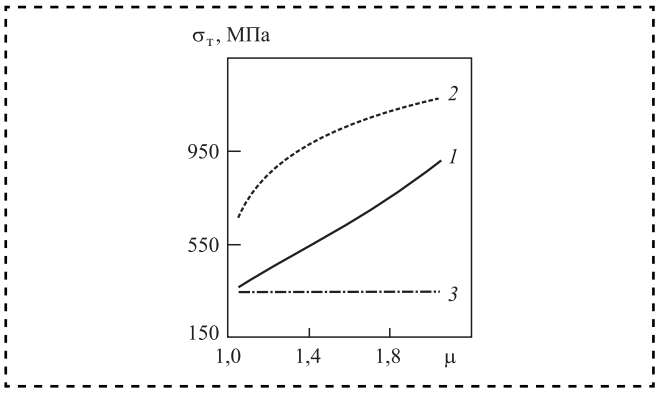



**Рис. 1. Зависимости предела текучести $\sigma_т$ от коэффициента вытяжки μ:**
*1* — модель упрочнения (11); *2* — (12); *3* — (13)

предел текучести заметно выше при модели упрочнения (12).

В работах [15, 16] предложены соответствующие формулы для определения оптимального угла $\alpha_{опт}$ волочения:

$$\sigma_{тк} = \sigma_{т0}\mu^k; \tag{14}$$

$$\sigma_{тк} = \sigma_{т0} + m\varepsilon^n = \sigma_{т0} + m(\ln\mu)^n; \tag{15}$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{опт}^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} f \frac{\mu^k - 1}{k\left(\mu^k + 1\right)}\left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{т0}}\right) = \frac{f\left(\mu^k - 1\right)\left(1 - \sigma_q/\sigma_{т0}\right)}{0,385k\left(\mu^k + 1\right)}; \tag{16}$$

$$\operatorname{tg}^2\alpha_{опт} = Af\left(1 - \sigma_q/\sigma_{т0}\right)/B, \tag{17}$$

где $A = \sigma_{т0}\ln\mu + m(\ln\mu)^{n+1}/(n+1)$

$B = 2\sqrt{3}\sigma_{т0}\left(2 + m(\ln\mu)^n/\sigma_{т0}\right)/9$;

$\sigma_{т0}$, $\sigma_{тк}$ — предел текучести соответственно на входе и выходе рабочего конуса волоки;

$\varepsilon = \ln\mu$ — степень деформации;

$k$, $m$, $n$ — коэффициенты упрочнения при моделях упрочнения (14) и (15);

$\sigma_q$ — напряжение противонатяжения.

При отсутствии деформационного упрочнения ($k = m = 0$) из формул (16) и (17) следует:

$$\operatorname{tg}\alpha_{опт}^2 = \frac{3\sqrt{3}}{4} f\ln\mu\left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{т0}}\right). \tag{18}$$

При модели упрочнения (14) и отсутствии деформационного упрочнения имеем аналитические зависимости соответственно (16) и (18) для расчета угла $\alpha_{опт}$. Критерий $\Delta_{опт}$ с учетом этих формул и при $\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha$ определяется соответственно зависимостями:

$$\Delta_{опт} = \left(1 - 1/\mu\right)^{-1}\left(1 + \sqrt{1/\mu}\right)^2 \times \sqrt{\frac{f\left(\mu^k - 1\right)\left(1 - \sigma_q/\sigma_{т0}\right)}{0,385k\left(\mu^k + 1\right)}}; \tag{19}$$

$$\Delta_{опт} = \left(1 - 1/\mu\right)^{-1}\left(1 + \sqrt{1/\mu}\right)^2 \times \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{4} f\ln\mu\left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{т0}}\right)}. \tag{20}$$

## Аналитические зависимости для расчета напряженного состояния и запаса прочности материала проволоки

Напряжение волочения $\sigma_z$ рассчитывали по формуле

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{zq} + \sigma_{cd}, \tag{21}$$

где $\sigma_{z1}$ — прирост осевого напряжения в рабочем конусе;

$\sigma_{zq}$ — прирост от действия напряжения противонатяжения $\sigma_q$;

$\sigma_{cd}$ — прирост напряжения на деформацию сдвига металла.

Составляющие формулы (21) при моделях упрочнения (14) и (15) определяют зависимостями [17, 18]:

$$\sigma_{z1} = \frac{\sigma_{т0}}{k}\left(\mu^k - 1\right)\left(1 + f/\operatorname{tg}\alpha\right); \tag{22}$$

$$\sigma_{z1} = \left[\sigma_{т0}\ln\mu + \frac{m}{n+1}(\ln\mu)^{n+1}\right]\left(1 + f/\operatorname{tg}\alpha\right); \tag{23}$$

$$\sigma_{zq} = \sigma_q\left[1 - \frac{f\left(\mu^k - 1\right)}{k\operatorname{tg}\alpha}\right]; \tag{24}$$

$$\sigma_{zq} = \sigma_q\left[1 - \frac{f}{\operatorname{tg}\alpha}\left(\ln\mu + \frac{m(\ln\mu)^{n+1}}{\sigma_{т0}(n+1)}\right)\right]; \tag{25}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{2\sigma_{т0}\operatorname{tg}\alpha\left(1 + \mu^k\right)}{3\sqrt{3}}; \tag{26}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{2\operatorname{tg}\alpha\left(2\sigma_{т0} + m(\ln\mu)^n\right)}{3\sqrt{3}}. \tag{27}$$

При отсутствии деформационного упрочнения ($k = m = 0$) из формул (22) и (23) следует зависимость

$$\sigma_{z1} = \sigma_{т0} \ln \mu \left(1 + f/\mathrm{tg}\,\alpha\right),$$

которая отличается от формулы Зибеля только величиной предела текучести: в формуле Зибеля используется средний $\sigma_т$ предел текучести в очаге пластической деформации.

Из формул (24) и (25) для расчета прироста осевого напряжения от действия противонатяжения при отсутствии упрочнения следует уравнение

$$\sigma_{zq} = \sigma_q \left(1 - f \ln \mu/\mathrm{tg}\,\alpha\right). \quad (28)$$

Вторая упрощенная формула И.Л. Перлина [2] для расчета напряжения волочения включает выражение (28) [19].

Коэффициент запаса прочности по И.Л. Перлину равен [2]

$$\gamma = \sigma_{тк}/\sigma_z. \quad (29)$$

Значение $\gamma = 1$ принимается предельным, так как велика вероятность разрушения материала проволоки (прутка). Поэтому авторы работы [2] в зависимости от механических свойств материала рекомендуют осуществлять процесс волочения при коэффициенте запаса $\gamma > 1{,}4$.

Показатель напряженного состояния по В.Л. Колмогорову [11]:

$$k_\sigma = \sigma/T, \quad (30)$$

где $\sigma$ — среднее нормальное напряжение;

$T$ — интенсивность касательных напряжений.

## Критерии формы очага деформации Δ и Δ* и показатели деформированного состояния $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\chi_1$ и $\chi_2$

В табл. 1 приведены значения критериев $\Delta$, $\Delta^*$, $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\chi_1$, $\chi_2$ при пяти значениях относительного обжатия $r$ и коэффициента вытяжки $\mu$ и углах волочения 4 и 9°.

С ростом степени деформации интенсивно уменьшаются значения показателей $\Delta$, $\Phi_1$ и $\chi_1$ при малых степенях деформации $r = 0{,}05...0{,}20$ или $\mu = 1{,}05...1{,}25$ (см. табл. 1). Отношение показателей формы $\Delta/\Phi_1$, $\Delta/\chi_1$ и $\Phi_2/\Delta^*$ близко к четырем, $\Delta/\Phi_1$ несколько меньше $\Delta/\chi_1$, так как $\mathrm{tg}\alpha > \alpha$. Разница значений для показателей $\Phi_1$ и $\chi_1$ меньше разницы между значениями $\Phi_2$ и $\chi_2$. Из данных табл. 1 следует одинаковый характер влияния угла волочения $\alpha$ и степени деформации на пары критериев: $\Delta$ и $\Phi_1$; $\Delta^*$ и $\Phi_2$; $\Delta$ и $\chi_1$; $\Delta^*$ и $\chi_2$.

При принятых моделях упрочнения (11)—(13), оптимальном угле волочения $\alpha_{опт}$ и напряжении $\sigma_q$ противонатяжения 0 и 85 МПа вычислен критерий $\Delta_{опт}$ в зависимости от коэффициента трения $f$ (табл. 2).

При $\alpha_{опт}$ значение $\Delta_{опт}$ уменьшается с ростом напряжения противонатяжения, повы-

*Таблица 1*

**Расчетные показатели в зависимости от относительного обжатия *r* и коэффициента вытяжки μ при угле волочения 4 и 9°**

| α, ° | $r(\mu)$ | Δ | Δ* | $\Phi_1$ | $\Phi_2$ | $\chi_1$ | $\chi_2$ | $\Delta/\chi_1$ | $\Delta/\Phi_1$ | $\Phi_2/\Delta^*$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 0,15 (1,18) | 1,72 | 0,58 | 0,43 | 2,32 | 0,43 | 2,33 | 4,00 | 3,99 | 3,99 |
| | 0,20 (1,25) | 1,25 | 0,80 | 0,31 | 3,19 | 0,31 | 3,23 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| | 0,25 (1,33) | 0,97 | 1,03 | 0,24 | 4,11 | 0,24 | 4,17 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| | 0,30 (1,43) | 0,78 | 1,28 | 0,20 | 5,10 | 0,20 | 5,00 | 4,01 | 4,00 | 4,00 |
| | 0,40 (1,67) | 0,55 | 1,82 | 0,14 | 7,30 | 0,14 | 7,14 | 4,02 | 4,01 | 4,02 |
| 9 | 0,15 (1,18) | 3,87 | 0,26 | 0,97 | 1,03 | 0,96 | 1,03 | 4,00 | 3,97 | 3,96 |
| | 0,20 (1,25) | 2,82 | 0,35 | 0,71 | 1,41 | 0,70 | 1,43 | 4,00 | 3,97 | 3,97 |
| | 0,25 (1,33) | 2,19 | 0,46 | 0,55 | 1,82 | 0,55 | 1,82 | 4,00 | 3,97 | 3,97 |
| | 0,30 (1,43) | 1,77 | 0,57 | 0,44 | 2,25 | 0,44 | 2,27 | 4,01 | 3,98 | 3,98 |
| | 0,40 (1,67) | 1,24 | 0,81 | 0,31 | 3,22 | 0,31 | 3,23 | 4,02 | 3,99 | 3,99 |

*Таблица 2*

**Критерий $\Delta_{опт}$ при $\alpha_{опт}$ в зависимости от коэффициента трения *f* при коэффициенте вытяжки 1,15 и 1,35, напряжении противонатяжения 0 и 85 МПа и моделях упрочнения (11)—(13)**

| μ | $\sigma_q$, МПа | Модель упрочнения | *f* | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0,015 | 0,030 | 0,05 | 0,075 | 0,15 | 0,30 | 0,50 |
| 1,15 | 0 | (11) | 1,52 | 2,15 | 2,77 | 3,27 | 4,65 | 6,54 | 8,36 |
| | 85 | | 1,32 | 1,86 | 2,40 | 2,84 | 4,03 | 5,69 | 7,29 |
| 1,35 | 0 | | 1,03 | 1,46 | 1,88 | 2,21 | 3,13 | 4,36 | 5,51 |
| | 85 | | 0,90 | 1,26 | 1,63 | 1,92 | 2,72 | 3,81 | 4,84 |
| 1,15 | 0 | (12) | 1,66 | 2,34 | 3,02 | 3,57 | 5,06 | 7,11 | 9,07 |
| | 85 | | 1,44 | 2,03 | 2,62 | 3,09 | 4,39 | 6,19 | 7,92 |
| 1,35 | 0 | | 1,15 | 1,62 | 2,08 | 2,46 | 3,46 | 4,87 | 6,05 |
| | 85 | | 1,00 | 1,40 | 1,81 | 2,13 | 3,01 | 4,21 | 5,33 |
| 1,15 | 0 | (13) | 1,53 | 2,15 | 2,78 | 3,28 | 4,66 | 6,55 | 8,37 |
| | 85 | | 1,32 | 1,87 | 2,41 | 2,84 | 4,04 | 5,70 | 4,00 |
| 1,35 | 0 | | 1,04 | 1,47 | 1,89 | 2,23 | 3,15 | 4,39 | 5,55 |
| | 85 | | 0,90 | 1,27 | 1,64 | 1,94 | 2,74 | 3,84 | 4,87 |

*Таблица 3*

**Показатели $\Phi_1$ и *Ot* в зависимости от коэффициента трения *f* при отсутствии противонатяжения и при напряжении противонатяжения 85 МПа, моделях упрочнения (11)—(13), коэффициенте вытяжки 1,15 и 1,35**

| μ | Модель упрочнения | *f* = 0,015 | | *f* = 0,05 | | *f* = 0,15 | | *f* = 0,30 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\Phi_1$ | *Ot* | $\Phi_1$ | *Ot* | $\Phi_1$ | *Ot* | $\Phi_1$ | *Ot* |
| $\sigma_q$ = 0 | | | | | | | | | |
| 1,15 | (11) | 0,38 | 4,00 | 0,70 | 3,99 | 1,17 | 3,97 | 1,66 | 3,93 |
| | (12) | 0,42 | 4,00 | 0,76 | 3,99 | 1,28 | 3,96 | 1,81 | 3,92 |
| | (13) | 0,38 | 4,00 | 0,70 | 3,99 | 1,17 | 3,97 | 1,67 | 3,93 |
| 1,35 | (11) | 0,26 | 4,00 | 0,47 | 3,98 | 0,80 | 3,93 | 1,13 | 3,86 |
| | (12) | 0,29 | 4,00 | 0,52 | 3,98 | 0,88 | 3,92 | 1,25 | 3,83 |
| | (13) | 0,26 | 4,00 | 0,47 | 3,98 | 0,80 | 3,93 | 1,14 | 3,86 |
| $\sigma_q$ = 85 МПа | | | | | | | | | |
| 1,15 | (11) | 0,33 | 4,00 | 0,60 | 3,99 | 1,01 | 3,97 | 1,44 | 3,95 |
| | (12) | 0,36 | 4,00 | 0,66 | 3,99 | 1,11 | 3,97 | 1,57 | 3,94 |
| | (13) | 0,33 | 4,00 | 0,60 | 3,99 | 1,01 | 3,97 | 1,44 | 3,95 |
| 1,35 | (11) | 0,22 | 4,00 | 0,41 | 3,99 | 0,69 | 3,95 | 0,98 | 3,90 |
| | (12) | 0,25 | 4,00 | 0,45 | 3,98 | 0,77 | 3,94 | 1,09 | 3,87 |
| | (13) | 0,23 | 4,00 | 0,41 | 3,99 | 0,69 | 3,95 | 0,98 | 3,90 |

шается с ростом коэффициента трения и зависит от модели упрочнения, что не учитывается при расчете критерия $\Delta$ по формуле (1). Значения $\Delta$ (табл. 1) и $\Delta_{опт}$ (табл. 2) уменьшаются с ростом коэффициента вытяжки. Критерий $\Delta_{опт}$ больше при модели упрочнения (12).

При $\alpha_{опт}$ определены отношения *Ot* критериев $\Delta$ (1) и $\Phi_1$ (7):

$$Ot = \Delta/\Phi_1. \quad (31)$$

Данные табл. 3 показывают увеличение показателя $\Phi_1$ и небольшое уменьшение отношения *Ot* с ростом коэффициента трения *f*. При моделях упрочнения (11) и (12) и действии противонатяжения показатели $\Phi_1$ и *Ot* не отличаются с точностью до второго знака после запятой. Сравнение данных табл. 3 показывает уменьшение показателя $\Phi_1$ и приближение значений отношения *Ot* к четырем от действия противонатяжения. Таким образом, наибольшее отклонение *Ot* равно 3,83 при модели (12), наибольших значениях коэффициентов вытяжки 1,35 и трения 0,30 и отсутствии противонатяжения.

## Связь критериев формы очага деформации и деформированного состояния

Результаты расчетов и данные табл. 1—3 при $\alpha$ и $\alpha_{опт}$ дали основание для вывода приближенных равенств:

$$\Phi_1 = \Delta/4; \quad (32)$$

$$\Phi_2 = 4\Delta^*; \quad (33)$$

$$\chi_1 = \Delta/4; \quad (34)$$

$$\chi_2 = 4\Delta^*. \quad (35)$$

Так как критерии $\Delta$ и $\Delta^*$ определяют форму очага деформации, а показатели $\Phi_1$, $\Phi_2$ и $\chi_1$, $\chi_2$ — отношения для сдвиговой и однородной деформаций, то из равенств (32)—(35) следует прямая зависимость отношений этих деформаций от формы очага деформации.

Вычислили степень расхождения *R* в процентах критерия $\Delta$ по формуле (1) и на основе приближенного равенства (32) и показателя $\Phi_1$ из формулы (7) при оптимальном угле волочения, коэффициенте вытяжки 1,15 и 1,35, напряжении $\sigma_q$ противонатяжения 0 и 85 МПа:

$$R = \frac{100\left(4\Phi_1(7) - \Delta(1)\right)}{\Delta(1)}. \quad (36)$$

Результаты расчета расхождения *R* в зависимости от коэффициента трения *f* при моделях упрочнения (11)—(13) представлены на рис. 2.

Расхождение *R* увеличивается с ростом коэффициентов трения и вытяжки, т. е. усиливается влияние модели упрочнения и степени деформации. Расхождение практически не отличается для моделей упрочнения (11) и (13). Противонатяжение уменьшает значение показателя *R*. Линии *2* и *5* показывают расхождения *R* выше при модели упрочнения (12). При малых значениях коэффициента трения величина *R* отрицательная. В этом случае выражение (32) занижает величину $\Phi_1$, а в широком интервале изменения коэффициента трения формула (32) завышает показатель $\Phi_1$ (7) при его расчете по критерию $\Delta$ (1). При волочении коэффициент трения редко превышает 0,20 [15], тогда $R < 3$ % при $\sigma_q = 0$ и обеспечена достаточная точность формулы (32) для практических расчетов.

При варьировании коэффициента трения наряду с расхождением *R* изменяются другие расчетные показатели процесса волочения, например, осевое напряжение, запас прочности, оптимальные значения угла $\alpha_{опт}$ и критерия $\Delta_{опт}$. На рис. 3 показана связь расхождения *R* (36) с оптимальными значениями угла волочения и критерия $\Delta_{опт}$ при принятых моделях упрочнения, степени де-

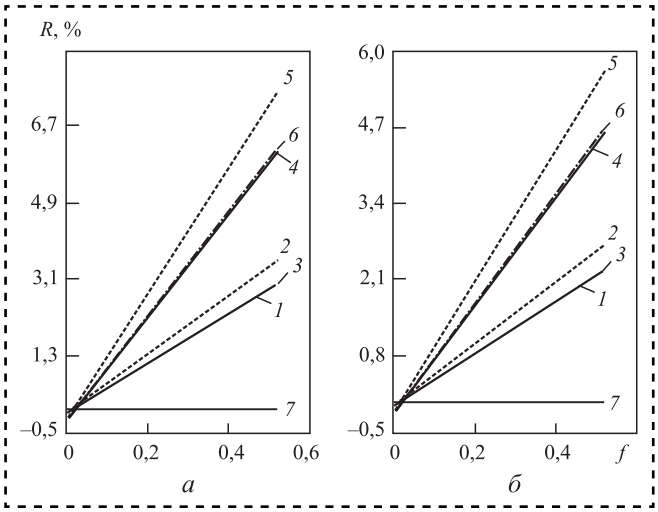



**Рис. 2. Изменение значения *R* в зависимости от коэффициента трения *f* при оптимальном угле волочения:**
*а* — $\sigma_q = 0$; *б* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{т0} = 85$ МПа; *1—3* — $\mu = 1{,}15$; *4—6* — $\mu = 1{,}35$; *1*, *4* — модель упрочнения (11); *2*, *5* — модель упрочнения (12); *3*, *6* — модель упрочнения (13); *7* — $R = 0$

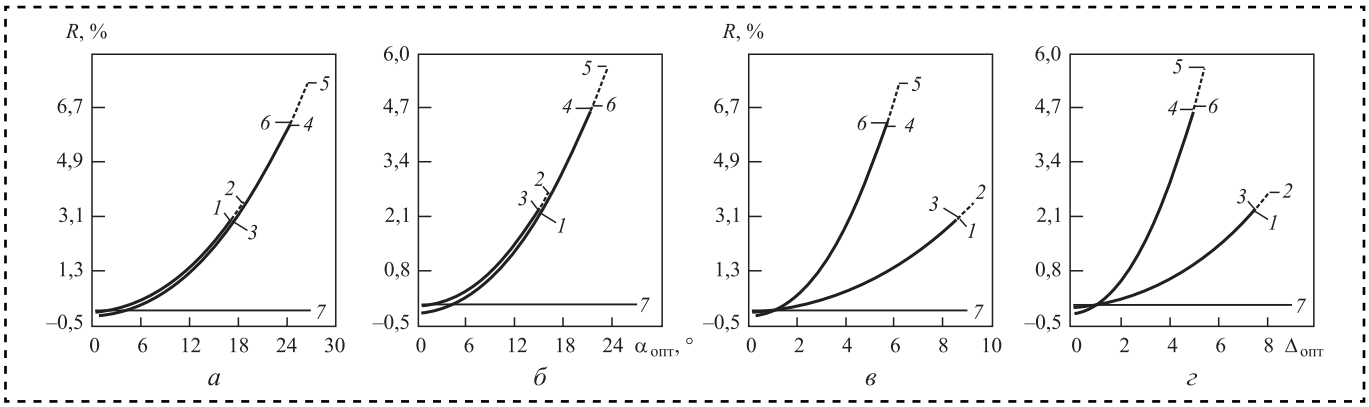



**Рис. 3. Связь изменения значения *R* с оптимальными значениями угла волочения (*а*, *б*) и критерия $\Delta_{опт}$ (*в*, *г*):**
*а*, *в* — $\sigma_q = 0$; *б*, *г* — $\sigma_q = 85$ МПа; *1—3* — $\mu = 1{,}15$; *4—6* — $\mu = 1{,}35$; *1*, *4* — модель упрочнения (11); *2*, *5* — модель упрочнения (12); *3*, *6* — модель упрочнения (13); *7* — $R = 0$

формации и напряжения противонатяжения. Коэффициент трения изменялся в диапазоне 0,0001...0,52.

Данные рис. 3 показывают рост расхождения *R* (36) с увеличением значений угла волочения и критерия $\Delta_{опт}$. Абсциссы точек пересечения прямой линии *7* с кривыми *1—6* определяют значения угла $\alpha_{опт}$ и критерия $\Delta_{опт}$, при которых выполняется равенство (32): при расчете показателя $\Phi_1$ по критерию $\Delta$ расхождение *R* равно 0. Сравнение расположения кривых на рис. 3, *а—г* показывает уменьшение показателей $\alpha_{опт}$, $\Delta_{опт}$ и *R* от действия противонатяжения.

При принятых моделях упрочнения, коэффициентах вытяжки и напряжениях противонатяжения на рис. 4 приведены зависимости от коэффициента трения показателей дефор-

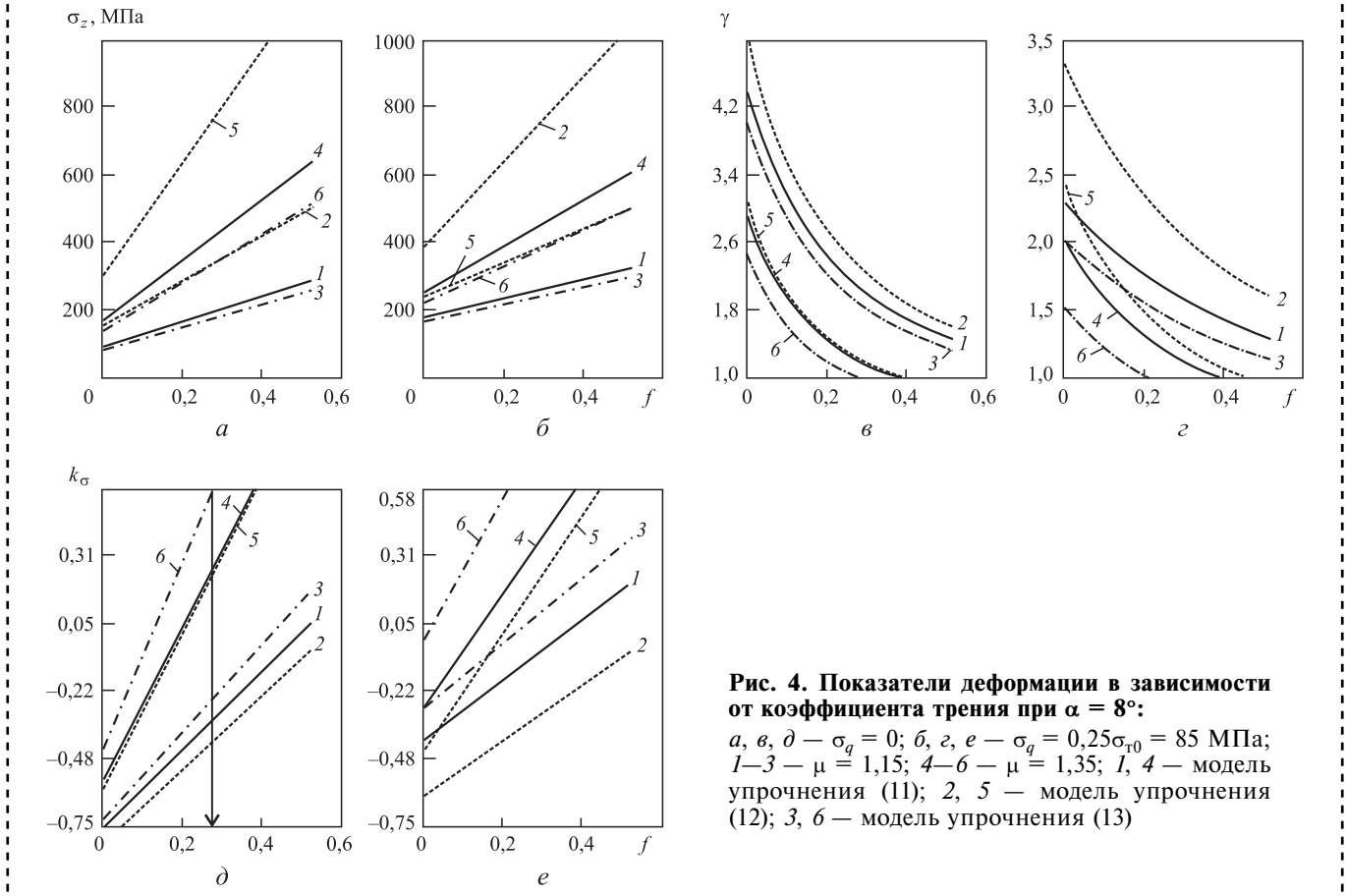



**Рис. 4. Показатели деформации в зависимости от коэффициента трения при $\alpha = 8°$:**
*а*, *в*, *д* — $\sigma_q = 0$; *б*, *г*, *е* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{т0} = 85$ МПа; *1—3* — $\mu = 1{,}15$; *4—6* — $\mu = 1{,}35$; *1*, *4* — модель упрочнения (11); *2*, *5* — модель упрочнения (12); *3*, *6* — модель упрочнения (13)

мации при $\alpha = 8°$ и зависимости показателей на рис. 5 при $\alpha_{опт}$.

Напряжение $\sigma_z$ волочения (21) больше при модели упрочнения (12) и $\alpha = 8°$ (рис. 4, *а*, *б*) и $\alpha_{опт}$ (рис. 5 *д*, *е*), что показывают линии *2* и *5*. Напряжение заметно меньше при отсутствии деформационного упрочнения (линии *3* и *6*). Расстояние между линиями *5* и *6* при коэффициенте вытяжки 1,35 значительно больше расстояния между линиями *2* и *3* при $\mu = 1{,}15$. При значениях $\alpha = 8°$ и $\alpha_{опт}$ от действия противонатяжения заметно повысилось напряжение, особенно при $f < 0{,}05$.

Коэффициент запаса прочности $\gamma$ более интенсивно уменьшается в начале роста коэффициента трения при $\alpha = 8°$ (рис. 4, *в*, *г*) и $\alpha_{опт}$ (рис. 5 *ж*, *з*). Линии *4—6* пересекают ось абсцисс ($\gamma = 1$) при $\alpha = 8°$, отсутствии и действии противонатяжения (рис. 4, *в*, *г*). Ось абсцисс при $\alpha_{опт}$ (рис. 5 *ж*, *з*) пересекает только

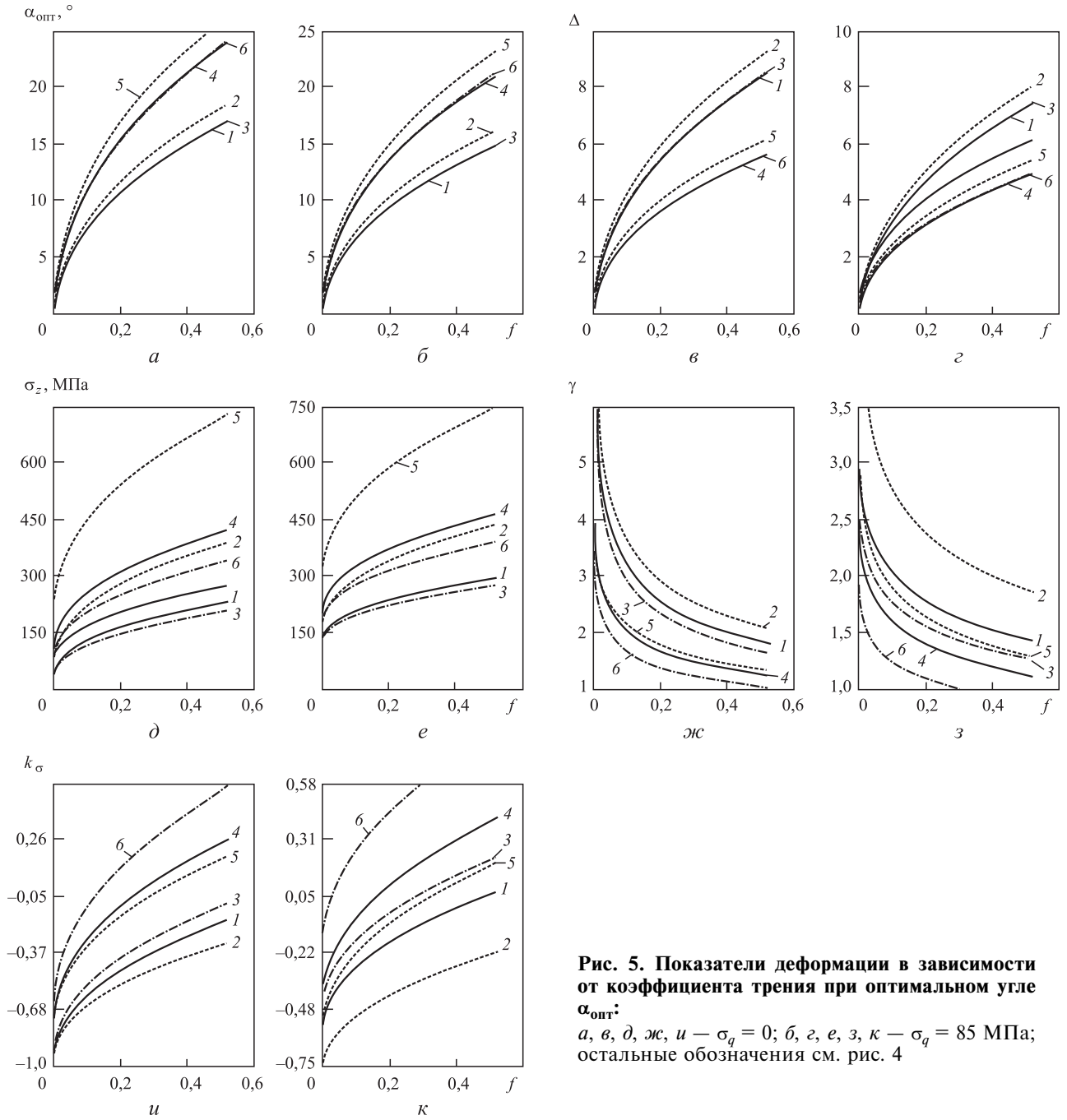



**Рис. 5. Показатели деформации в зависимости от коэффициента трения при оптимальном угле $\alpha_{опт}$:**
*а*, *в*, *д*, *ж*, *и* — $\sigma_q = 0$; *б*, *г*, *е*, *з*, *к* — $\sigma_q = 85$ МПа; остальные обозначения см. рис. 4

линия *6* при модели упрочнения (13). Точки пересечения линий *4—6* с абсциссой при действии противонатяжения (рис. 4, *г*) лежат при меньших значениях коэффициента трения, чем аналогичные точки при отсутствии противонатяжения (рис. 4, *в*). Линия *6* пересекает ось абсцисс при меньшем *f*.

Верхняя линия графиков для показателя $k_\sigma$ напряженного состояния проходит через ординату 0,58. При $k_\sigma = 0{,}58$ коэффициент запаса прочности $\gamma = 1$ [2] и наступает предельный случай процесса волочения, т. е. высокая вероятность разрушения материала проволоки (прутка) [1—3, 17]. Поскольку между коэффициентом $\gamma$ и показателем $k_\sigma$ имеется взаимная связь [20], то коэффициенты трения в точках пересечения линий *4—6* и абсциссы на рис. 4, *в*, *г* и абсцисс для точек пересечения этих линий *4—6* с верхней линией графиков на рис. 4, *д*, *е* равны. Вертикальная линия из точки пересечения линии *6* с верхней горизонтальной линией графика фиксирует предельную величину коэффициента трения, при которой показатель $k_\sigma = 0{,}58$, а коэффициент запаса $\gamma = 1$.

Абсцисса точки пересечения линии *6* с верхней горизонтальной линией графика для показателя $k_\sigma$ на рис. 5, *и* равна абсциссе точки пересечения линии *6* с нижней осью графика для коэффициента $\gamma$ на рис. 5, *ж*. Точка пересечения на этих графиках находится при более высоком значении коэффициента трения, чем на рис. 4, *в*, *д* при $\alpha = 8°$. При отсутствии упрочнения больше показатель $k_\sigma$ и меньше предельный коэффициент трения.

Значения для угла $\alpha_{опт}$ и критерия $\Delta_{опт}$ увеличиваются с ростом коэффициентов трения и вытяжки. При моделях упрочнения (11) и (13) близко располагаются линии *1* и *3* при коэффициенте вытяжки 1,15 и линии *4* и *6* при коэффициенте вытяжки 1,35. Для стали 12Х18Н10Т (кривые *2* и *5*) больше значения угла $\alpha_{опт}$ и критерия $\Delta_{опт}$. Данные табл. 2 и на рис. 5, *в*, *г* для критерия $\Delta_{опт}$ согласуются.

Автор работы [3] указал обычные условия волочения стальной проволоки: коэффициент вытяжки 1,4 (относительное обжатие 0,286 или 28,6 %), $\alpha = 6°$, коэффициент трения 0,05 и отсутствует противонатяжение ($\sigma_q = 0$). При таких параметрах деформации $\Delta = 1{,}25$. При изготовлении опытно-промышленных партий проволоки для канатов в северном исполнении [21, 22] волочение проволоки из стали 70 осуществляли без противонатяжения по маршруту: 3,15 — 2,60 — 2,25 — 1,90 — 1,60 — 1,40 — 1,23 — 1,10 мм. Проволока готового диаметра 1,10 мм соответствовала требованиям технических условий ТУ 14-4-1542—89 "Проволока стальная канатная специальная" маркировочной группы прочности 2060 Н/мм$^2$ (210 кгс/мм$^2$). Средний коэффициент $\mu$ вытяжки по маршруту волочения равен 1,36, а относительное обжатие $r = 0{,}265$ или $r = 26{,}5$ %. Для волочения использованы волоки с углом рабочего конуса $\alpha = 7°$. При принятых средних по маршруту волочения $\mu = 1{,}36$ и $\alpha = 7°$ критерий $\Delta = 1{,}59$. В работе [7] отмечено, что при волочении проволоки $\Delta$ часто находится в области 1,5. Но при этом не указан материал проволоки, маршрут ее деформирования и механические свойства. Критерий $\Delta = 1{,}5$ не противоречит значению $\Delta = 1{,}25$, вычисленному по данным А.Л. Тарнавского [3], и среднему $\Delta = 1{,}59$ по маршруту волочения стальной канатной проволоки [21, 22].

## Заключение

Предложены зависимости для связи параметров, показателей деформации, критериев формы очага деформации круглого сплошного профиля при коническом канале волоки. Представлены аналитические зависимости для расчета оптимальной величины критерия $\Delta_{опт}$. Дано сравнение критериев формы очага деформации и отношений для сдвиговой и однородной деформации, в зависимости от относительного обжатия, коэффициента вытяжки и угла волочения.

Равенства для определения связи критериев формы очага деформации $\Delta$ и $\Delta^*$ с показателями $\Phi_1$, $\Phi_2$ и $\chi_1$, $\chi_2$ характеризуют зависимость деформированного состояния от формы очага деформации. При трех моделях упрочнения построены зависимости осевого напряжения, коэффициента запаса прочности и показателя напряженного состояния от коэффициента трения при $\alpha = 8°$ и $\alpha_{опт}$. В отличие от произвольной величины критерия $\Delta$ оптимальная величина критерия $\Delta_{опт}$ зависит от коэффициента трения, напряжения противонатяжения и модели упрочнения. Модель упрочнения в меньшей степени влияет на оптимальную величину критерия $\Delta_{опт}$, чем коэффициенты

вытяжки и трения, напряжение противонатяжения. При отсутствии деформационного упрочнения меньше предельная величина коэффициента трения, при которой наступает равенство осевого напряжения и предела текучести протягиваемого материала. Повышение интенсивности деформационного упрочнения вызвало некоторое увеличение оптимальных значений угла $\alpha_{опт}$ и критерия $\Delta_{опт}$.

Показано согласование значений дельта-критерия формы очага деформации, вычисленных по отечественным и зарубежным данным практики волочения проволоки. Учет критериев формы очага деформации способствует выбору рациональных режимов деформирования проволоки.

## Библиографический список


1. **Губкин С.И.** Пластическая деформация металлов. Т. 3. М.: Металлургиздат, 1960. 306 с.
2. **Перлин И.Л., Ерманок М.З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
3. **Тарнавский А.Л.** Эффективность волочения с противонатяжением. М.: Металлургиздат, 1959. 152 с.
4. **Бэкофен В.** Процессы деформации / пер. с англ. В.С. Берковского, Ф.И. Рузанова. М.: Металлургия, 1977. 288 с.
5. **Wright R.N.** Wire Technology Process Engineering and Metallurgy. 2011. 320 p.
6. **Hosford W.F., Caddell R.M.** Metal Forming. Mechanikcs and Metallurgy. Cambridgy University Press, 2007. 312 p.
7. **Wright R.N.** Workability in Extrusion and Wire Drawing, in Workability Testing Techniques / ed. G.E. Dieter. ASM International. Materials Park, Ohio, 1984. 255 p.
8. **Гурьянов Г.Н.** Критерии для оценки формы очага и неоднородности деформации при волочении сплошного круглого профиля // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ. 2013. Вып. 2. С. 86—96.
9. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Оценка параметров волочения круглого сплошного профиля по критериям формы очага пластической деформации // Сталь. 2015. № 6. С. 48—54.
10. **Гурьянов Г.Н.** Показатели напряженного состояния, запаса прочности и эффективности формоизменения в зависимости от критериев формы очага деформации при разных моделях упрочнения проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 11. С. 22—35.
11. **Колмогоров В.Л.** Напряжения, деформация, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.
12. **Гурьянов Г.Н.** Оценка эффективности формоизменения проволоки в проходе волочения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 1. С. 19—24.
13. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Расчет осевого напряжения для формоизменения проволоки и преодоления силы трения // Сталь. 2015. № 4. С. 48—54.
14. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2008. 358 с.
15. **Гурьянов Г.Н.** Методы определения коэффициента трения при волочении круглого сплошного профиля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 8. С. 60—68.
16. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Оценка прироста осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки при разных параметрах и моделях упрочнения проволоки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 9. С. 387—399.
17. **Гурьянов Г.Н.** Прирост осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки от контактного трения при разных параметрах деформации и моделях упрочнения материала проволоки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 8. С. 32—44.
18. **Гурьянов Г.Н.** Изменение показателей напряженного состояния и запаса прочности проволоки при отклонении коэффициента трения от номинального значения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 18—29.
19. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Сравнительная оценка показателей деформации при расчете с применением действительного угла волочения и приведенного угла И.Л. Перлина при разных моделях упрочнения материала проволоки // Производство проката. 2018. № 11. С. 10—24.
20. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Характер взаимосвязи между расчетными показателями деформации при разных моделях упрочнения материала проволоки // Технология металлов. 2019. № 1. С. 34—46.
21. **Разработка** и освоение производства канатов в северном исполнении: отчет о НИР / В.Я. Киселев и др. Магнитогорск: ВНИИметиз, 1989. № ГР 01880020051. 168 с.
22. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М., Егоров В.Д.** К разработке прогрессивного производства проволоки и канатов в северном исполнении // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 29—34.

УДК 621.735.016.2

**М.Ш. Мигранов, С.Р. Шехтман,** *д-ра техн. наук,* **А.М. Мигранов**
*(Уфимский государственный авиационный технический университет)*
*E-mail: migmars@mail.ru*

# Триботехнические характеристики режущего инструмента с ионно-модифицированной поверхностью

*Рассмотрены способы улучшения триботехнических характеристик износостойких покрытий на режущем инструменте из быстрорежущей стали после ионной модификации поверхности. Покрытия сформированы в две стадии: диффузионное насыщение азотом (азотирование) и нанесение (Ti, Cr)N твердых покрытий с помощью плазмы дугового разряда катода (CAPDP). Покрытие включает в себя дополнительный ионный легированный слой, имплантированный на ранее азотированную поверхность быстрорежущей стали. Такое многослойное покрытие значительно увеличивает (в 2,1—2,4 раза) износостойкость режущего инструмента за счет расширения стадии нормального износа. Компромисс между высокой износостойкостью и надежностью покрытия, которые зависят от степени адгезии с подложкой, достигается в многослойном покрытии, которое содержит нижний слой, обогащенный индием.*

*Some ways of improving tribotechnical characteristics of wear-resistant coatings on high-speed steel cutting tools after ion surface modification are considered. Coatings in two stages are formed: diffusion saturation of nitrogen (nitriding) and deposition (Ti, Cr)N solid coatings by cathode arc discharge plasma (CAPDP). The coating includes an additional ion-doped layer implanted on the previously nitrided surface of high-speed steel. This multi-layer coating significantly increases (2.1—2.4 times) the wear-bone of the cutting tool by expanding the stage of normal wear. The compromise between high wear resistance and reliability of the coating, which depend on the degree of adhesion with the sub-spoon, is achieved in a multi-layer coating, which contains a lower layer enriched with indium.*

**Ключевые слова:** трение, износ, имплантация, ионно-модифицированная поверхность, многослойные покрытия, износостойкость, ионное азотирование, триботехнические характеристики.

**Keywords:** friction, wear, implantation, ion-modified surface, multilayer coatings, wear resistance, ion nitriding, tribotechnical characteristics.

Один из способов улучшения режущих свойств инструментов — разработка нового вида многослойных покрытий, сочетающих повышенную износостойкость и антифрикционные свойства [1—3]. Высокая износостойкость инструментов с твердым покрытием определяется тем, что оно функционирует в качестве экрана для контактирующих поверхностей инструмента, тем самым защищая их от внешнего воздействия при резании. В основном это происходит во время стационарной стадии износа (нормальном износе). Однако неизбежный износ покрытия приводит к воздействию на базовый материал инструмента, фрикционные свойства которого значительно хуже свойств покрытия. В результате этого износ инструмента быстро вступает в катастрофическую фазу. Продление стадии нормального трения, однако, вполне осуществимо. Это достигается в многослойных покрытиях нанесением дополнительного нижнего слоя на поверхность основы инструмента. Этот слой должен сочетать в себе свойства и способности создавать защитные вторичные структуры в межфазовом слое покрытия и подложки. Один из способов создания таких слоев — ионная модификация (легирование или смешивание) поверхности инструмента.

**Цель работы** — исследование влияния антифрикционного состава подложки на износостойкость резцов с многослойными покрытиями и определение наилучшей основы для разработки многослойных покрытий с программируемым изменением свойств, обеспечивающих для каждого слоя покрытия выполнение функции износостойкости на соответствующей стадии износа.

Исследовали многослойные триплексные покрытия, нанесенные с помощью трех устройств. Используемую в качестве основы быстрорежущую сталь предварительно азотировали в тлеющем разряде. Затем поверхность инструмента модифицировали добавлением ионов до нанесения твердого покрытия, а модифицированный слой (Ti, Cr)N покрывали с помощью ФОП (физическое осаждение покрытия)-метода (таблица).

Ионное азотирование подложки из быстрорежущей стали проводили в специальном устройстве в сочетании с нагреванием. Твердое покрытие наносили плазмой с дуговым разрядом катода (CAPDP). Поверхностный слой очищали до имплантации специальной кратковременной обработкой в тлеющем разряде для улучшения адгезии ФОП-покрытия с подложкой. До нанесения ФОП-покрытия каждый из образцов имплантирован ионами одного из шестнадцати различных элементов с помощью высокоэнергетического ионного имплантатора с энергией около 60 кэВ при комнатной температуре.

Концентрацию атомов имплантируемых элементов в поверхностном слое образцов определяли с помощью рентгеновского микроанализа на сканирующем электронном микроскопе JSM — U3, оборудованном спектрометром на двух кристаллах для рассеивания волн. Химический состав вторичных фаз, появляющихся на поверхности инструмента при резании, исследовали с помощью ВИМС-спектрометрии вторичной массы ионов.

Для ионной модификации на поверхности выбирали шестнадцать химических элементов: газы с высокой способностью к окислению, создающие устойчивые динамические защитные поверхностные пленки при трении; неметаллы (B, C, Si), способные создавать соединения с высокими прочностными свойствами при взаимодействии с основными материалами и окружающей средой; металлы, включая металлы с низкой точкой плавления (в частности, In, Mg, Sn, Ga), используемые как смазки или антифрикционные материалы; родственные металлы с гексагональной решеткой и антифрикционными свойствами; металлы (Al, Cr), способные образовывать оксидоподобные пленки, устойчивые при резании, с хорошими антифрикционными свойствами и низким коэффициентом теплопроводности; металлы с низким коэффициентом трения при контактировании с обрабатываемыми материалами (сталью, никелевыми и титановыми сплавами), например, Ag и Cu.

Износ инструмента с покрытиями исследовали при обработке стали 45. Скорость резания составляла 70 м/мин, глубина резания 0,5 мм, подача 0,28 мм/об. Резание проводили как с охлаждающей жидкостью, так и без нее. Исследовали износ четырехгранных быстросменных пластин из быстрорежущей стали с многослойными покрытиями. Влияние ионной модификации поверхности на износостойкость резцов оценивали сравнением периодов стойкости инструментов с предложенными многослойными покрытиями инструментов

**Характеристики исследуемых многослойных покрытий**

| Стадия износа режущего инструмента | Наименование слоя | Характеристики текущего слоя | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Метод модификации поверхности | Состав и структура слоя | Микро-твердость, ГПа | Толщина, мкм |
| Нормальный износ | Износостойкий рабочий слой | ФОП-покрытие (Ti,Cr)N | (Ti,Cr) N | 26...28 | 6...8 |
| Катастрофический износ | Поверхностная модифицированная подложка | Ионная имплантация | –"– | 11...12 | 30...32 (в зависимости от имплантируемого элемента) |
| | Упрочненная подложка из быстрорежущей стали | Ионное азотирование | Монофазовый с высоким содержанием азота в мартенситном α — Fe | | |

с обычными покрытиями без дополнительной ионной модификации. Коэффициент износостойкости инструмента определяли как отношение времени, необходимого для резания до соответствующего техническим условиям значения износа инструмента с многослойным покрытием, ко времени, необходимому для резания инструментом с поверхностным технологическим покрытием (Ti, Cr)N + ионное азотирование. Адгезию покрытия к подложке определяли методом царапания, а коэффициенты трения — с помощью адгезиомера особой конструкции [4]. Для оценки антифрикционных свойств слоя и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов использовали адгезийный компонент коэффициента трения: отношение сопротивления сдвигу $\tau_{nn}$, вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению $P_{rn}$, возникающему на пластическом контакте при температурах испытания ($\tau_{nn}/P_{rn}$).

Влияние имплантируемых элементов на износостойкость инструмента в значительной степени определяется условиями резания. Рабочая температура при высокоскоростном резании составляет около 600 °С (870...900 К). Если используется охлаждающая жидкость, температура снижается не менее чем на 100 °С [3, 5, 6]. При этом ионная модификация поверхности резца значительно влияет на его износостойкость.

Износостойкость резца повышает комплексное сочетание многочисленных взаимосвязанных факторов:

- образование жидких и газообразных фаз или легкоплавких эвтектик, которые действуют как смазочные вещества;
- создание аморфных кислородосодержащих пленок с низкими коэффициентами трения и теплопроводностью;
- снижение прилипания поверхности инструмента к обрабатываемому материалу и в то же самое время повышение адгезии твердого покрытия ФОП с модифицированной основой.

Имплантация химических элементов позволяет получать лучшие результаты при использовании индия, серебра и азота (повышение износостойкости инструмента в 2—3 раза при различных условиях резания, как с охлаждающей жидкостью, так и без нее). Наиболее предпочтительно по комплексу свойств покрытие с имплантированным слоем индия, что дает возможность повысить износостойкость инструмента максимально, независимо от использования охлаждающей жидкости. В то же время адгезия между покрытием и основным слоем, модифицированным индием, также достаточно высока, что подтверждает надежность покрытия в целом.

Индий имеет низкую трибологическую совместимость с традиционно обрабатываемыми металлами (сталь, никель и титан) [3]. Высокая эффективность имплантации индия на поверхности режущего инструмента подтверждается результатами других исследований, полученных для инструментов из твердых сплавов.

Сканирующая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ были сделаны для многослойных покрытий на инструменте из быстрорежущей стали с ионным защитным слоем, азотированным в тлеющем разряде и твердым ФОП-покрытием, нанесенным на слой, модифицированный индием. На рис. 1, *а* представлена микроструктура косых шлифов в 5° для образца с многослойными покрыти-

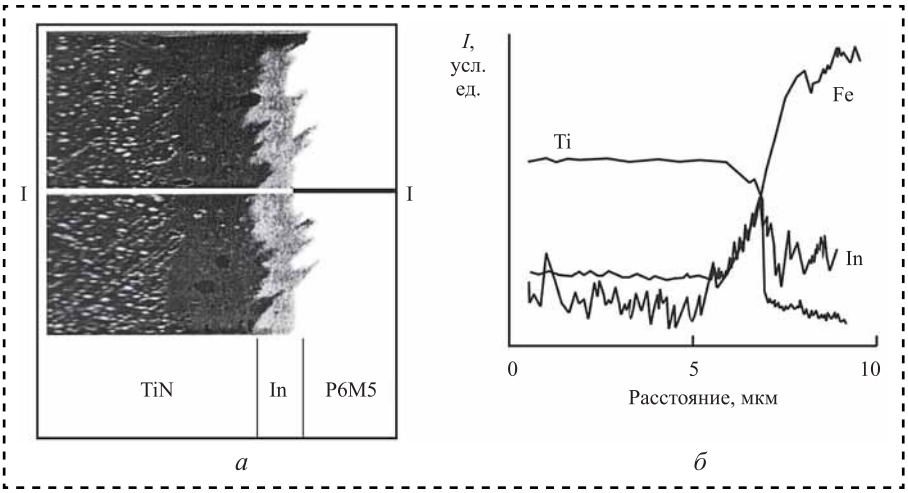



**Рис. 1. Микроструктура многослойного (Ti, Cr) N покрытия на быстрорежущую сталь Р6М5 с переходной поверхностью, модифицированной ионами In (ионная имплантация), ×600:**
*а* — косой шлиф в многослойном покрытии (SEI); *б* — распределение элементов (рентгеновский микроанализ)

ями на поверхности, микроструктура получена в сканирующем электронном микроскопе с помощью детектора твердой пары.

При таком подходе контраст рисунка образуется за счет потока обратно рассеянных электронов и зависит от атомной плотности компонентов образца. Поперечное сечение обратно рассеянных электронов выше для тяжелых элементов и значительно ниже для легких. Отдельные слои многослойного покрытия представляют различный контраст, темный для TiN и серый для нижнего слоя, обогащенного индием. Толщина этой зоны $l = 6{,}0$ мкм. Реальная глубина модифицированного (серого) слоя $h = l\sin(5°) \approx 0{,}3$ мкм. Возможно это слой железа, содержащий имплантируемый аргон (Ar), оставшийся на поверхности в результате травления $Ar^+$ после азотирования и обогащения In. Тяжелый элемент матрицы вольфрам увеличивает интенсивность рентгеновской эмиссии индия в $K_\alpha$ и его фон. Такой эффект матрицы рассеивает и увеличивает видимый объем эмиссии In в $K_\alpha$-излучениях. Профиль распределения In неточный вследствие плохой разрешающей способности рентгеновского метода и стимулируемой диффузии при нагревании поверхности до 500 °С во время нанесения (Ti, Cr)N. Основываясь на технологических параметрах ионной имплантации, реальная глубина слоя, имплантированного In, составляла порядка 0,3 мкм.

В азотированных образцах концентрации типа In — N возникают в зоне имплантации In. В соответствии с данными ВИМС (спектроскопии вторичной массы ионов) соотношение концентрации In в свободном состоянии и связанным порядка 10:1 (рис. 2).

Чтобы объяснить, как имплантированный индий влияет на износостойкость инструмента при резании, исследовали: зависимость коэффициента трения от температуры; отличительные особенности окисления индия в зоне износа (с помощью ВИМС) и возникновение оксидов при нагревании образцов с поверхностью, модифицированной In.

Исследование зависимости коэффициента трения от температуры для образцов с модифицированной поверхностью показали, что индий улучшает фрикционные свойства быстрорежущей стали (рис. 3). Действуя как смазочное вещество, In снижает сопротивление сдвигу $\tau_{пп}$ адгезионных связей, возникших в трибопарах.

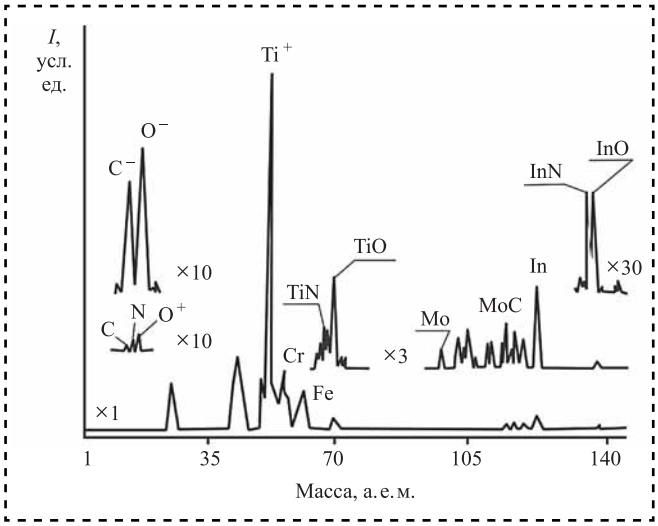



**Рис. 2. Спектры вторичной массы ионов в зоне износа режущего инструмента (время резания — 30 мин)**

Этого, однако, недостаточно для объяснения улучшения износостойкости резцов с поверхностью, модифицированной индием, в два и более раза. Как показал спектрометрический анализ массы зоны износа, влияние индия

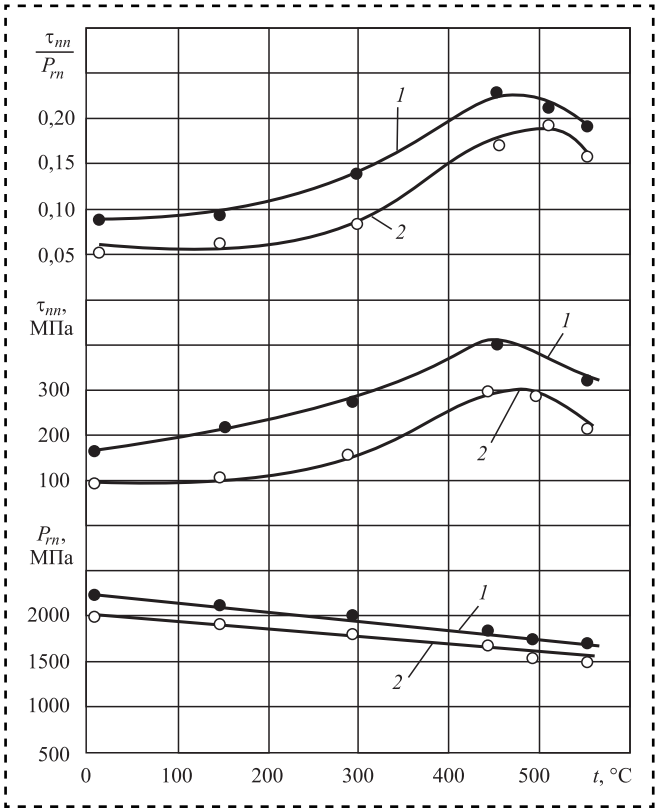



**Рис. 3. Влияние температуры при испытании на фрикционные свойства режущих инструментов из быстрорежущей стали с модифицированной поверхностью:**
*1* — ионное азотирование Р6М5; *2* — ионное азотирование Р6М5 + имплантация In

более сложное. Кроме индия в массе металла в зоне износа обнаружено присутствие оксида индия, возникшего в результате разложения как индия, так и нитрида индия при нагревании во время трения.

После выполнения операций по развертыванию стало ясно, что сила сцепления второго компонента вначале составляла приблизительно 445,7 эВ, а после 25-минутной выдержки — 445,8 эВ. Очевидно, что при такой высокой силе сцепления эта линия соответствует $In_2O_3$. Относительная интенсивность этой линии по сравнению с In $3d_{5/2}$ ($I_{In_2O_3}/I_{In}$) была 23 % в первоначальном состоянии (рис. 4, *а*) и увеличилась до 41 % после 25 минут (рис. 4, *г*). Химический сдвиг: 0,9 эВ в первоначальном состоянии; 1,0 эВ после 25-минутной выдержки.

Имплантированный индий существует в двух фазовых состояниях: в свободном и в группе нитрида (InN). По мере того как верхнее твердое (Ti, Cr)N покрытие изнашивается, модифицированный слой становится незащищенным на трущейся поверхности. В условиях высоких нагрузок и при высоких температурах частичное окисление In начнется до разрушения ФОП-покрытия, выполняющего защитную роль. Нормальное трение характеризуется минимальной глубиной повреждения контактирующей поверхности, поэтому даже небольшая глубина модифицированного слоя влияет на повышение износостойкости инструмента. Растворенный индий In улучшает фрикционные свойства поверхности и снижает интенсивность прилипания на фрикционную поверхность. Таким образом, модифицирование поверхности In способствует понижению подачи тепла в зону трения по каналам рассеивания, которые защищают поверхность инструмента. Двойное влияние In повышает самоорганизацию системы и расширяет стадию нормального и устойчивого износа, тем самым реализуя основные законы контроля за трением [5].

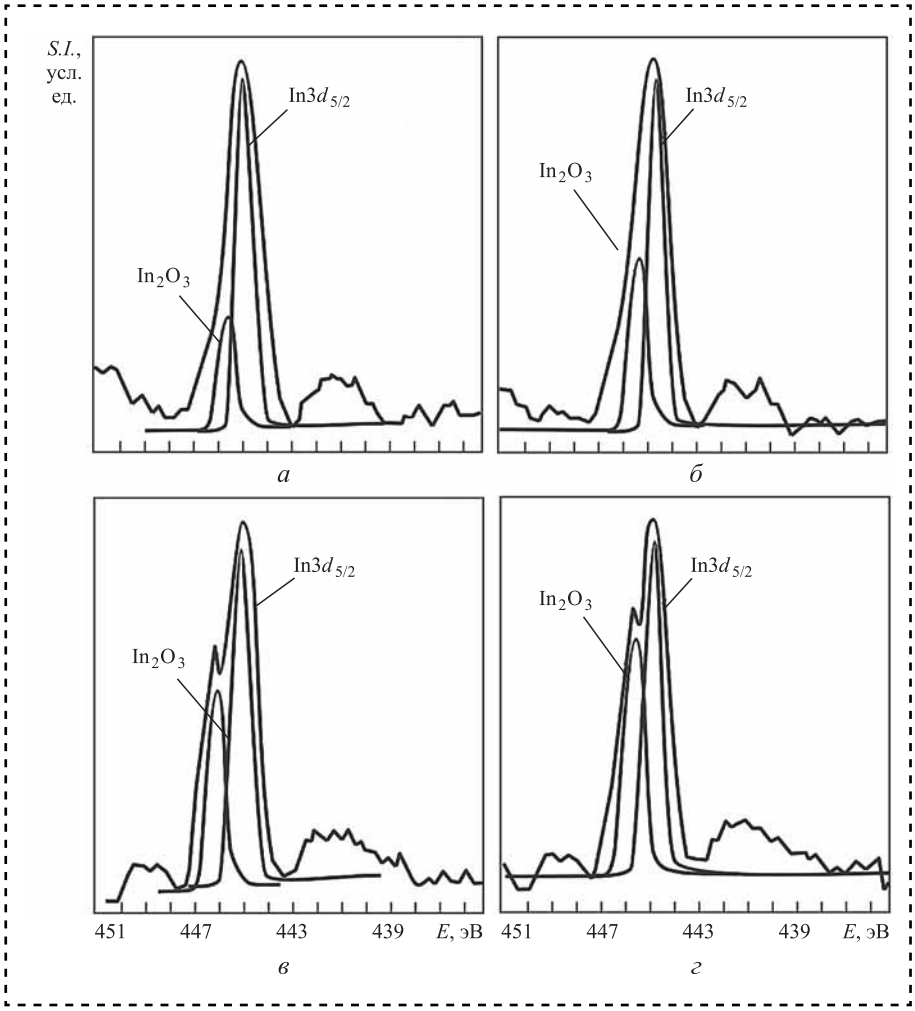



**Рис. 4. Изменения формы In $3d_{5/2}$ линий на спектре фотоэлектронов с поверхности из быстрорежущей стали после ионной имплантации и окисления при 823 К в течение:**
*а* — 0 мин; *б* — 5 мин; *в* — 15 мин; *г* — 20 мин

По результатам работы установлено, что:

— оптимальное сочетание высокой прочности и надежности (характеризуемых высокой адгезией покрытия к основанию) проявляется в многослойном покрытии с нижним слоем, обогащенным In. Этот элемент присутствует в нижнем слое, как в свободном, так и в связанном (InN) состояниях;

— положительное влияние ионной имплантации In на износостойкость инструмента можно объяснить сложными процессами. Действуя как жидкая фаза при температурах резания, индий способствует уменьшению коэффициента трения. Когда резец

нагревается при трении, образующиеся на поверхности износа кислородосодержащие фазы индия защищают инструмент, препятствуя переходу от нормального к катастрофическому износу. Это позволяет увеличить стадию нормального износа и значительно повысить износостойкость инструмента;

— в результате двухступенчатого упрочнения поверхностного слоя инструмента: диффузионным насыщением азотом (ионное азотирование быстрорежущей стали) и нанесением износостойкого покрытия со сложнолегированными нитридами (Ti, Cr)N с дополнительным модифицированным нижним слоем позволяет значительно повысить (в 2,1—2,4 раза) износостойкость инструмента, благодаря увеличению стадии нормального износа.

### Библиографический список


1. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. **Будилов В.В., Киреев Р.М., Шехтман С.Р.** Технология вакуумной ионно-плазменной обработки. М.: Изд-во МАИ, 2007. 155 с.
3. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 327 с.
4. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
5. **Migranov M., Migranova R.** Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 496. P. 75—79.
6. **Vereschaka A.A., Migranov M.Sh.** Study of wear resistance of sintered powder tool materials // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 871. P. 159—163.


УДК 521.892

**Ю.Н. Лернер,** *канд. техн. наук (Израиль)*

# Некоторые физические явления при трении


*На основании результатов исследований трения ниобия по кремнию предложено уравнение вынужденных колебаний поверхностных электронов. Показано, что трение при ковалентной атомной связи существенно меньше, чем при ионной и металлической атомной связи.*

*Based on the results of studies of silicon niobium friction, the equation of forced vibrations of surface electrons is proposed. It is shown that friction with a covalent atomic bond is substantially less than with an ionic and metallic atomic bond.*



**Ключевые слова:** трение, электроны, вынужденные колебания, ионная, металлическая и ковалентная атомные связи.

**Keywords:** friction, electrons, forced vibrations, ionic, metallic and covalent bonds.


Сделана попытка ответить на постоянные вопросы, касающиеся происхождения трения. В работе [1] исследовано трение между кремнием и пленкой ниобия и обнаружено, что при температуре больше критической (9,2 К для ниобия) трение в 2—3 раза больше, чем при температуре меньше критической, т. е. при температуре выше критической имеет место электронная компонента трения, включающая электростатическое и ван-дер-ваальсово трение.

Электростатическое трение вызывает вынужденные колебания электронов в переменном электростатическом поле. Запишем уравнение колебаний электрона, находящегося на неподвижной поверхности:

$$m(d^2x/dt^2) + F = qE\cos\omega t, \qquad (1)$$

где $m$ — масса электрона;

$x$ — смещение электрона;

$F$ — сила сопротивления движению электрона;

$q$ — заряд электрона;

$E$ — разность амплитуд напряженности в соседних точках движущегося тела;

$\omega$ — частота колебаний среды.

При составлении уравнения (1) принято, что все действующие силы расположены на прямой, параллельной поверхности и направленной по движению. Примем, что сила $F$ пропорциональна смещению $x$:

$$F = mC^2\omega_0^2 x, \qquad (2)$$

где $C$ — безразмерный коэффициент;

$\omega_0$ — собственная частота колебаний электрона.

Имеем:

$$m(d^2x/dt^2) + mC^2\omega_0^2 x = qE\cos\omega t. \qquad (3)$$

Частное решение уравнения (3) имеет вид:

$$x = qE\cos\omega t/mC^2\omega_0^2[1 - (\omega/C\omega_0)^2]. \qquad (4)$$

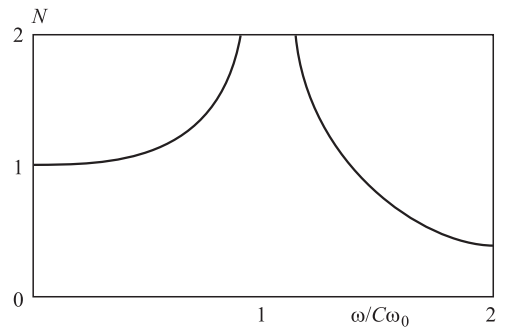
С учетом формулы (2):

$$F = NqE\cos\omega t, \qquad (5)$$

где $N = 1/[1 - (\omega/C\omega_0)^2]$.

Зависимость трения от скорости изображена на рисунке при $C = 1$. Значения $N$ в правой части выражения (5) условно приняты положительными. Видно, что при низких частотах $N$ возрастает слабо. Далее $N$ возрастает все сильнее. При резонансе функция разрывается. В правой части $N$ с ростом частоты асимптотически уменьшается. По изменению $N$ можно судить об изменении трения с изменением скорости.

Сопоставим полученные результаты вычислений с результатами исследований трения металлов при очень больших скоростях. В работе [2] исследовано трение стального шарика по стали в режиме замедления. Шарик подвешивали во вращающемся магнитном поле в разреженной атмосфере. При скорости 600 м/с коэффициент трения составил $f = 0{,}2$. С замедлением скорости трение возрастало. При скорости около 200 м/с трение значительно увеличивалось и происходило заклинивание. Результат эксперимента соответствует правой ветви на рисунке.




**Зависимость трения от скорости**

Ковалентная атомная связь образуется парой электронов, поделенной между двумя атомами, причем эти электроны занимают две устойчивые орбитали, по одной от каждого атома. Это существенное отличие от ионной и металлической атомной связи, где вовлеченные в процесс трения электроны не имеют устойчивых орбиталей и располагаются на поверхности трения. Поэтому трение тел с ковалентной атомной связью должно быть существенно меньше трения тел с ионной и металлической атомной связью.

В качестве примера рассмотрим алмаз, имеющий ковалентные атомные связи. Трение алмаза весьма мало. В монографии [2] приведен результат исследования трения меди по алмазу при скоростях от 600 м/с до нуля: $f = 0{,}05$. Амплитуда электростатического поля на поверхности алмаза намного меньше, чем на поверхности меди. Поэтому в эксперименте медь—алмаз принадлежащее меди переменное электростатическое поле скользило без потерь на трение по поверхности алмаза, имеющей весьма слабое электростатическое поле. В этом эксперименте резонанс не наблюдался.

У имеющего ковалентные атомные связи политетрафторэтилена (ПТФЭ) $f = 0{,}05$.

## Библиографический список

1. **Suppression** of electronic friction on Nb films in the superconducting state / M. Kisel et al. // Nature Materials. 2011. V. 10. P. 119—122.

2. **Bowden F.P., Tabor D.** The Friction and Lubrication of Solids. Part 2. Oxford: University Press. 2001.

УДК 621.318.13:004

**В.Ю. Введенский,** *канд. физ.-мат. наук,* **Г.А. Нуждин,** *канд. техн. наук (НИТУ "МИСиС"),*
**С.В. Фролов,** *канд. физ.-мат. наук (Академия ГПС МЧС России)*
*E-mail: vved_v@mail.ru*

# Моделирование петли гистерезиса магнитных материалов с помощью интерполяции дробно-линейной функцией

*Выведены основные соотношения и представлены способы применения дробно-линейных функций для интерполяции нисходящей и восходящей ветвей петли магнитного гистерезиса при сборке различных магнитных изделий и электротехнических устройств. Предложена новая модель, описывающая намагниченность как сумму необратимого вклада в виде дробно-линейной функции и обратимого вклада. На примере аморфного магнитно-мягкого сплава 30КСР проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета по нескольким моделям.*

*The basic relations are derived and the ways of applying linear fractional functions for interpolating the descending and ascending branches of the magnetic hysteresis loop when assembling various magnetic products and electrical devices are presented. A new model is proposed that describes the magnetization as the sum of an irreversible contribution in the form of a fractional-linear function and a reversible contribution. Using the example of an amorphous soft magnetic alloy 30 KCP, the experimental data were compared with the results of calculations for several models.*

**Ключевые слова:** петля гистерезиса, моделирование, магнитные материалы, аморфный магнитно-мягкий сплав, интерполяция, дробно-линейная функция.

**Keywords:** hysteresis loop, modeling, magnetic materials, amorphous soft magnetic alloy, interpolation, linear fractional function.

При сборке различных магнитных изделий и электротехнических устройств, например, постоянных магнитов в электрических двигателях, магнитопроводов трансформаторов, сердечников магнитных датчиков разного назначения, петля магнитного гистерезиса — основная используемая характеристика ферромагнитных и ферримагнитных материалов [1—3]. Модель магнитного гистерезиса применяют при расчетах параметров конструируемых изделий, а также при исследовании магнитных свойств материалов, технологических процессов их обработки и происходящих в материалах фазовых и структурных превращений. Большое число и разнообразие предложенных в настоящее время моделей определяется, главным образом, целью моделирования [4]. Основные функции модели гистерезиса:

1) хранение в сжатой форме информации о полученных ранее из эксперимента координатах точек петли гистерезиса;

2) воспроизведение координат промежуточных точек (задача интерполяции);

3) получение новых данных (прогностическая функция).

Прогностическую функцию модели используют, например, при выяснении взаимосвязи параметров петли гистерезиса между собой (коэрцитивной силы, остаточной индукции и т.д.), предсказания связи петли гистерезиса и кривой намагничивания и другими характеристиками.

В данной работе использовали модели гистерезиса, основанные на интерполяции с использованием дробно-линейных функций.

**Цель работы** — изучить на конкретных примерах точность этих моделей и выявить их достоинства и недостатки.

Дробно-линейной функцией называется функция следующего вида:

$$f(x) = \frac{ax + b}{cx + d}, \qquad (1)$$

где $a$, $b$, $c$, $d$ — постоянные;

$c \neq 0$ (иначе функция превращается в линейную);

$ad - bc \neq 0$.

Последнее условие означает, что функция $f(x)$ не является константой. При описании петли гистерезиса интерполируется зависимость магнитной индукции $B$ от напряженности магнитного поля $H$, т.е. функция $f$ принимает значения индукции $B$, а аргумент $x$ — значения $H$.

Интерполяцию дробно-линейной функцией удобно использовать при задании небольшого числа узлов интерполяции — точек, через которые проходит график интерполируемой функции. Если в качестве узлов интерполяции используют все экспериментальные точки, то удобнее рассматривать кусочно-линейную интерполяцию или алгебраическую интерполяцию, например, с помощью многочленов Лагранжа или полиномиальных сплайнов. Последние варианты позволяют достичь большой точности интерполяции, но неудобны из-за практической невозможности использования простых физических соображений для реализации прогностической функции модели. В данной работе ограничились дробно-линейной интерполяцией в двух вариантах — с 3 или 4 узлами интерполяции.

Если к приближенному описанию кривой размагничивания (участка нисходящей ветви петли гистерезиса во втором квадранте плоскости $H$—$B$) предъявляется требование прохождения кривой через три точки: точку остаточной индукции $B_r$ с координатами (0, $B_r$), точку коэрцитивной силы $H_c$ с координатами ($-H_c$, 0) и точку максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$ с координатами ($-H_d$, $B_d$), то приближенная формула, описывающая кривую размагничивания, примет вид:

$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c - \alpha H}, \qquad (2)$$

где $H_c$ — коэрцитивная сила по индукции;

$\alpha$ — коэффициент, характеризующий выпуклость петли гистерезиса.

В формулу (2) следует подставлять абсолютные значения напряженности поля $H$, т.е. взятые по модулю. При использовании алгебраических значений $H$ формула (2) имеет вид:

$$B = B_r \frac{H_c + H}{H_c + \alpha H}. \qquad (3)$$

Очевидно, что (2) и (3) представляют собой выражения дробно-линейных функций. Формула (3) может быть получена решением задачи интерполяции с тремя узлами путем приравнивания значений интерполирующей функции (1) и ее аргумента соответствующим координатам узлов интерполяции при замене $f$ на $B$ и $x$ на $H$:

$$B_r = \frac{b}{d}; \qquad (4)$$

$$B_d = \frac{-aH_d + b}{-cH_d + d}; \qquad (5)$$

$$0 = \frac{-aH_c + b}{-cH_c + d}. \qquad (6)$$

По этим уравнениям параметры $a$, $b$, $c$, $d$ определить нельзя, но можно найти три относительных величины $b/a = H_c$; $b/d = B_r$ и $c/d = \alpha/H_c$, где

$$\alpha = \frac{H_c}{H_d} + \frac{B_r}{B_d} - \frac{B_r H_c}{B_d H_d}. \qquad (7)$$

Знаний параметров $H_c$, $B_r$ и $\alpha$ достаточно для расчетов по интерполяционной формуле (3).

На рис. 1, *а* приведены экспериментальные точки спинки петли гистерезиса и интерполирующая кривая по формуле (3) для кольцевого образца из витой аморфной ленты сплава 30КСР [3]. Средний диаметр образца — 16 мм. Образец находился в исходном состоянии после закалки из жидкого состояния (спиннингования расплава) и не подвергался термической обработке. Измерения проведены в условиях повторяемости и воспроизводимости в квазистатическом режиме индукционно-импульсным методом на установке МК-3Э [6]. Максимальная напряженность магнитного поля 800 А/м. Параметры петли гистерезиса, использованные для моделирования, представлены в табл. 1. Величины $H_d$ и $B_d$ определяли нахождением координат точки экстремума зависимости произведения $BH$ от напряжен-

*Таблица 1*

**Параметры кривой размагничивания образца из аморфного сплава 30КСР**

| $B_r$, Тл | $H_c$, А/м | $H_d$, А/м | $B_d$, Тл | $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,42 | 17,72 | 14,89 | 0,37 | 0,974 |

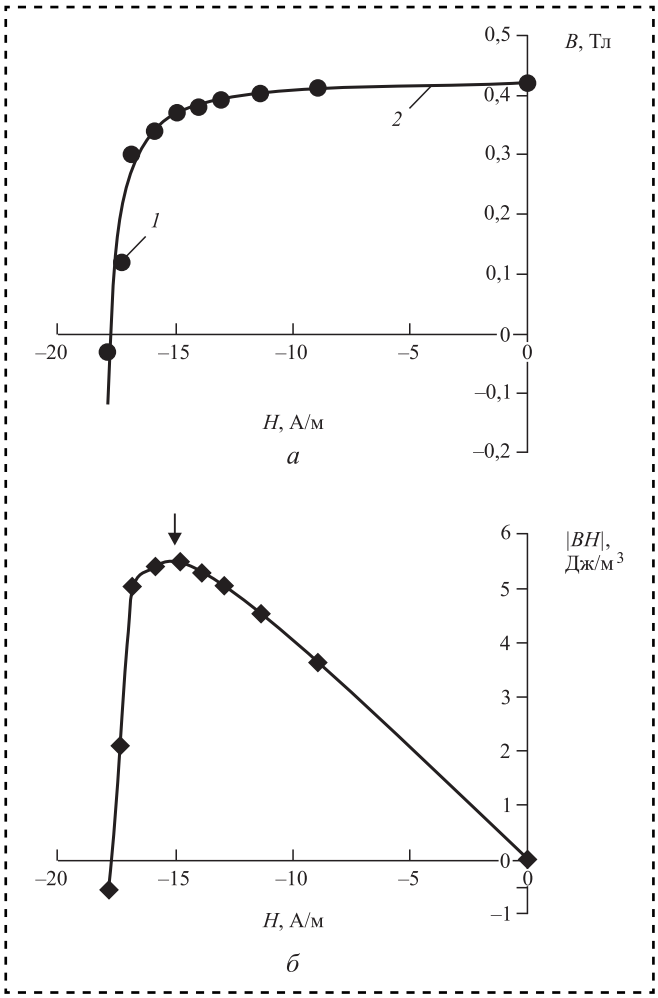



**Рис. 1. Кривая размагничивания образца аморфного сплава 30КСР (*а*) (экспериментальные точки (*1*) и интерполирующая кривая (*2*) по формуле (3)) и полевая зависимость энергетического произведения (*б*)**

ности магнитного поля $H$ (рис. 1, *б*), а значение параметра $\alpha$ — расчетом по формуле (7).

Экспериментальные точки хорошо ложатся на расчетную кривую (см. рис. 1, *а*). Отклонения экспериментальных значений индукции от интерполирующей кривой не превышают погрешность измерения индукции, за исключением двух точек в поле, близком к коэрцитивной силе, и хорошо соотносятся с ранее полученными оценками погрешностей измерений на установке МК-3Э [6]. Остаточная дисперсия, найденная делением суммы квадратов отклонений экспериментальных значений индукции от расчетных на число степеней свободы (число точек $n = 10$ минус число параметров модели $p = 3$), меньше дисперсии выборки значений индукции примерно в 11 раз. Это свидетельствует об адекватности модели. Еще один показатель качества модели — коэффициент детерминации (квадрат коэффициента корреляции) $R^2 = 0{,}91$. Это означает, что 91 % разброса данных объясняет использованная модель.

Для магнитомягких материалов максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max}$, в отличие от материалов для постоянных магнитов, не является нормируемым параметром, и величины $H_d$ и $B_d$, как правило, не определяют. Также серьезный недостаток — ограниченность диапазона рассматриваемых полей (второй квадрант плоскости $H$—$B$) и вытекающая отсюда невозможность сопоставления процессов перемагничивания и намагничивания. В связи с этим интерес представляет другая модель — гистерезисная модель Чана и др. [7], которая фактически является применением дробно-линейной интерполяции к нисходящей и восходящей ветвям петли гистерезиса. В качестве узлов интерполяции используют вершины петли гистерезиса, а также точки остаточной индукции и коэрцитивной силы [8]. Нисходящая ветвь петли гистерезиса в этой модели описывается выражением:

$$B_1(H) = \mu_0 H + B_s \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c\left(\frac{B_s}{B_r} = 1\right)}, \quad (8)$$

где $\mu_0$ — магнитная постоянная;

$B_s$ — индукция насыщения.

Из выражения (8) следует, что $B_1(0) = B_r$, $B_1(H_c) = \mu_0 H_c$, а при $H \to \infty$ индукция зависит от поля линейно: $B_1(H) = \mu_0 H + B_s$. Это означает, что формула (8) предназначена для описания предельной петли гистерезиса (максимальное поле больше поля насыщения). Петля гистерезиса предполагается симметричной.

Модифицируем формулу (8). Переходя от индукции $B_1$ к намагниченности $M_1$ ($B_1 = \mu_0 H + \mu_0 M_1$) и используя алгебраические значения напряженности поля вместо абсолютных значений $H$, получим для нисходящей ветви петли гистерезиса по намагниченности выражение:

$$M_1(H) = M_s \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c\left(\frac{M_s}{M_r} - 1\right)}. \quad (9)$$

Намагниченность $M_1$ принимает следующие значения в узлах интерполяции:

$$M_1(0) = M_r;\ M_1(-H_c) = 0;$$
$$M_1(\infty) = M_s;\ M_1(-\infty) = -M_s,$$

где $M_s$ — намагниченность насыщения;

$M_r$ — остаточная намагниченность;

$H_c$ — коэрцитивная сила по намагниченности.

Наличие операции модуля (взятия абсолютного значения числа) в знаменателе (9) позволяет превратить график дробно-линейной функции, имеющий вид гиперболы с вертикальной и горизонтальной асимптотами, в график кривой с насыщением с двумя горизонтальными асимптотами $M_1 = \pm M_s$.

Аналогичная формула дробно-линейной интерполяции справедлива для восходящей ветви петли гистерезиса:

$$M_2(H) = M_s \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c\left(\frac{M_s}{M_r} - 1\right)}. \quad (10)$$

Намагниченность $M_2$ принимает следующие значения в точках остаточной намагниченности, коэрцитивной силы и точках магнитного насыщения:

$$M_2(0) = -M_r;\ M_2(H_c) = 0;$$
$$M_2(-\infty) = -M_s;\ M_2(\infty) = M_s.$$

Эти равенства были использованы при выводе формулы (10).

На рис. 2 представлен результат использования формулы (9) для приближенного описания экспериментальных точек нисходящей ветви петли гистерезиса аморфного сплава 30КСР. Вместо намагниченности насыщения использовали значение максимальной намагниченности $M_{\max}$ (табл. 2).

*Таблица 2*

**Параметры использованных моделей петли гистерезиса аморфного сплава 30КСР**

| $\mu_0 M_{\max}$, Тл | $\mu_0 M_r$, А/м | $H_c$, А/м | $\nu$ | $H_{rev}$, А/м |
|---|---|---|---|---|
| 0,68 | 0,42 | 17,72 | 0,8 | 267 |

Экспериментальные точки ложатся на расчетную кривую лишь в малых полях, где происходит необратимое перемагничивание материала. В больших полях модель непригодна. Ситуацию исправляет модифицированная модель, в которой разделены намагниченности на необратимую $M_{1irr}$ и обратимую составляющую $M_{1rev}$.

Для необратимой составляющей намагниченности $M_{1irr}$ используем формулу (9), умножая ее на параметр $\nu$ — объемную долю материала, в которой перемагничивание осуществляется необратимо, путем смещения границ доменов.

Обратимую составляющую намагниченности $M_{1rev}$, формирующуюся главным образом за счет вращения намагниченности, аппроксимируем функцией Ланжевена

$$L(x) = \mathrm{cth}x - 1/x,$$

где $x = H/H_{rev}$;

$H_{rev}$ — характерное поле обратимого процесса намагничивания.

Функцию Ланжевена при этом умножаем на $(1 - \nu)$, предполагая, что за счет обратимого процесса изменение намагниченности происходит в оставшейся после необратимого перемагничивания области материала с объемной долей $(1 - \nu)$.

Суммируя $M_{1irr}$ и $M_{1rev}$, получаем выражение для намагниченности произвольной точки на нисходящей ветви петли гистерезиса:

$$M_1(H) = \nu M_s \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c\left(\frac{M_s}{M_r} - 1\right)} + (1-\nu)\left[\mathrm{cth}\left(\frac{H}{H_{rev}}\right) - \frac{H_{rev}}{H}\right]. \quad (11)$$

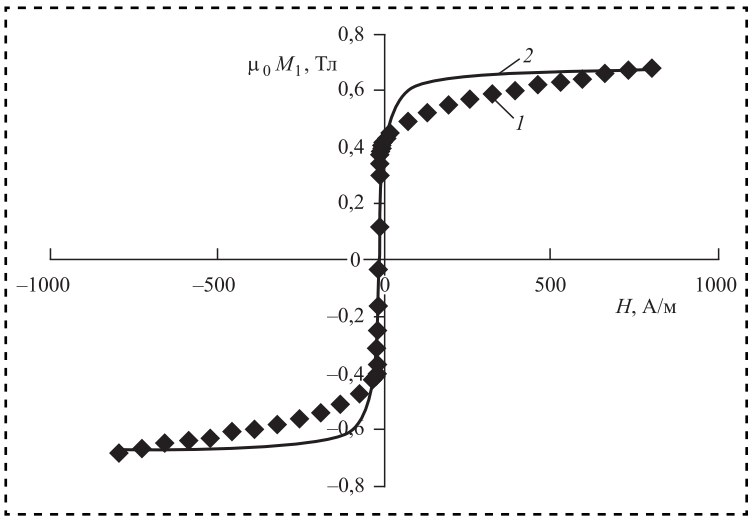



**Рис. 2. Нисходящая ветвь петли гистерезиса аморфного сплава 30КСР:**

*1* — экспериментальные точки; *2* — линия, полученная расчетом по формуле (9)

Представленная модель схожа с моделью Джилса—Атертона [9], но несколько

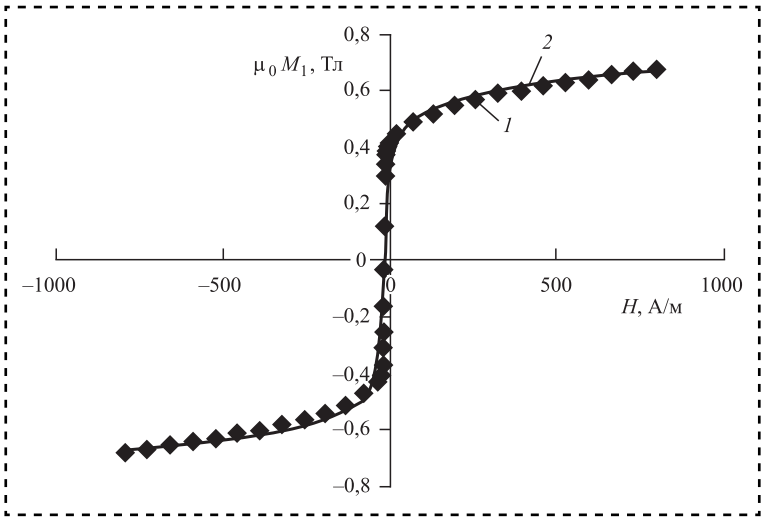



**Рис. 3. Нисходящая ветвь петли гистерезиса аморфного сплава 30КСР:**

*1* — экспериментальные точки; *2* — линия, полученная расчетом по формуле (11) с учетом необратимой и обратимой составляющих намагниченности

проще, не требует решения дифференциального уравнения, а параметры имеют более ясный физический смысл.

Результаты расчета по формуле (11) в сопоставлении с экспериментальными точками показаны на рис. 3. Использованные значения параметров приведены в табл. 2.

Использование дробно-линейной интерполяции только для необратимой составляющей намагниченности и учет обратимой составляющей намагниченности позволяет добиться неплохого соответствия экспериментальных точек и расчетной кривой. Модель статистически адекватна. Вычисленная по 42 точкам дисперсия величины $\mu_0 M_1$ составляет 0,2638 Тл$^2$, остаточная дисперсия равна 0,0157 Тл$^2$, а коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}94$.

Необходимость определения двух дополнительных подгоночных параметров ($\nu$ и $H_{rev}$) делает использование модифицированной модели более сложным, однако остальные три параметра определяют непосредственно при измерениях и их нахождение не требует подгоночных процедур.

## Заключение

Рассмотренные модели могут быть полезны для проектирования методов сборки магнитных изделий и расчетов электротехнических устройств, а также при обучении (в том числе самообучении), и при исследовании магнитных материалов.

Модели, использующие дробно-линейные функции, могут обеспечивать приемлемый уровень качества аппроксимации петель гистерезиса и довольно просты, поскольку приводят к явным выражениям для намагниченности, их применение не требует разработки сложных компьютерных программ, а параметры моделей в большинстве случаев имеют ясный физический смысл.

## Библиографический список

1. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Влияние напряженности магнитного поля и частоты перемагничивания на погрешность измерения магнитной индукции магнитопроводов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 3. С. 36—38.

2. **Борискин О.И., Благовещенский Д.И., Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Управление качеством производства аморфного кобальтового сплава // Черные металлы. 2019. № 1. С. 60—63.

3. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Динамические магнитные свойства аморфного сплава 30КСР, подвергнутого термической обработке // Наноинженерия. 2015. № 1. С. 12—14.

4. **Белоконь А.В., Скалиух А.С.** Математическое моделирование необратимых процессов поляризации. М.: Физматлит, 2010. 325 с.

5. **Постоянные** магниты: справочник / А.Б. Альтман и др.; под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1980. 488 с.

6. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А., Соколова Н.А.** Метрология свойств нанокристаллических и аморфных сплавов // Наноинженерия. 2014. № 12. С. 44—48.

7. **Chan J.H., Vladimirescu A., Gao X.-C., Liebmann P., Valainis J.** Nonlinear transformer model for circuit simulation // IEEE Transaction on computer-aided design. 1991. Vol. 10. № 4.

8. **Володин В.Я.** Гистерезисная модель нелинейной индуктивности симулятора LTspice // Силовая электроника. 2010. № 1. С. 56—60.

9. **Jiles D.C., Atherton D.L.** Theory of Ferromagnetic Hysteresis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 61. P. 48—60.

УДК 629.7.03

**Н.А. Сухова,** *канд. техн. наук*
*(Уфимский государственный авиационный технический университет)*
*E-mail: nad_suhova@mail.ru*

# Разработка механизма управления производственной технологичностью авиационных двигателей

*Рассмотрена проблема управления технологичностью авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) на ранних этапах проектирования. Представлены способы управления технологичностью авиационных ГТД, обеспечивающие рациональное использование имеющихся ресурсов предприятия, путем снижения трудоемкости и обеспечения конкурентоспособной себестоимости проектируемого двигателя. Предложен механизм управления в итерационной процедуре ситуационного анализа, обеспечивающий выбор оптимальных путей достижения директивной трудоемкости в целях рационального использования имеющихся ресурсов предприятия. Предлагаемый механизм позволяет существенно сократить объем работ по отработке изделия на технологичность в условиях высокого уровня неопределенности на ранних этапах проектирования.*

*The problem of managing the manufacturability of aircraft gas turbine engines (GTE) in the early design stages is considered. Methods of control of manufacturability of aviation gas turbine engines, ensuring the rational use of existing resources of the enterprise, by reducing the labor intensity and ensuring the competitive cost of the engine being designed are presented. The control mechanism in the iterative procedure of situational analysis is proposed providing the choice of the best ways to achieve policy labor-intensiveness with the goal of rational use of the available resources of the enterprise. The proposed mechanism will significantly reduce the amount of work on the development of the product for manufacturability in a high level of uncertainty in the early design stages.*

**Ключевые слова:** технологичность, авиационные двигатели, конкурентоспособная (директивная) трудоемкость, приведенная трудоемкость, механизм управления.

**Keywords:** manufacturability, aircraft engines, competitive (directive) labor intensity, reduced labor intensity, control mechanism.

## Введение

Современный авиационный двигатель — наукоемкий, высокотехнологичный продукт, самый сложный и дорогостоящий компонент в конструкции самолета.

В условиях жесткой конкуренции в отрасли меняются парадигмы управления проектированием высокотехнологичной продукции. Противоречие целей проектирования проявляется в необходимости достижения высоких технических показателей двигателя при снижении затрат и времени на улучшение экономических показателей двигателя как на этапе производства, так и на этапе эксплуатации. Противоречивый характер этих целей предопределяет необходимость построения системы управления технологичностью на ранних этапах проектирования по критериям технологической и экономической эффективности.

Задачи дальнейшего повышения основных показателей качества авиационных двигателей новых поколений и сокращения трудозатрат в процессе изготовления, испытаний и доводки двигателей являются приоритетными как для процессов конструкторско-технологического проектирования, так и для технологического менеджмента [1]. Один из важных резервов производства, обеспечивающий снижение трудоемкости и стоимости двигателей при достижении директивного уровня конкурентоспособности, — повышение технологичности конструкции авиационных двигателей [2].

Управление технологичностью предполагает выбор альтернативных вариантов конструкторско-технологических решений, срав-

нение и оценку вариантов по установленным критериям в целях выявления решений, обеспечивающих директивные технологические характеристики и направленных на снижение трудоемкости и себестоимости ГТД.

Процесс управления непрерывный, начинается с момента разработки эскизного проекта и продолжается на всех стадиях проектирования и изготовления изделий. При этом требования обеспечения конкурентоспособной себестоимости должны учитываться уже на этапах эскизного и технического проектирования.

Проблему управления технологичностью на всех уровнях декомпозиции ГТД рассматривали А.А. Иноземцев [2], Г.Х. Ирзаев [3], В.В. Клочков [4], В.Г. Засканов [5], Ю.Д. Амиров и многие другие исследователи. Однако известные методы управления технологичностью изделий в неполной мере учитывают технический и организационный уровень предприятия; не используют принципы комплексности и целевой направленности на обеспечение конкурентоспособной себестоимости двигателя; не ориентированы на достигнутый уровень развития организации производства и технологий [2]. Поэтому проблема повышения эффективности управления технологичностью имеет существенное значение для создания конкурентоспособного двигателя, а разработка механизма управления технологичностью на ранних этапах проектирования для предприятий по производству авиационных двигателей актуальна и может быть решена с учетом новых методологических подходов и расчетных схем.

## Разработка механизма управления технологичностью авиационных двигателей

Оценка технологичности авиационных изделий представляет собой сложную и многогранную задачу. Для проведения оценки технологичности ГОСТ 14.201—83 рекомендует использовать 11 показателей. Одна из главных задач управления технологичностью ГТД — обоснование трудоемкости его изготовления. Рассмотрим вопросы управления технологичностью в рамках концепции управления трудоемкостью на ранних этапах проектирования под конкурентоспособную (директивную) себестоимость проектируемого двигателя.

Из-за неопределенности технических и экономических показателей на ранних этапах проектирования трудоемкость изделий авиационных ГТД устанавливают различными укрупненными методами [8].

Предлагаемый механизм управления технологичностью ГТД базируется на методологическом подходе, обеспечивающем определение и анализ оценок трудоемкости деталей и узлов относительно изделия-прототипа и директивных значений, оценки вариантов возможных решений на ранних стадиях проектирования и выбора оптимального решения для конкретных условий производства.

Концепция управления технологичностью путем снижения трудоемкости на разных уровнях декомпозиции изделия направлена на сформулированные цели достижения конкурентоспособной себестоимости (директивной трудоемкости) и основана на новых понятиях и категориях. *Директивная трудоемкость* — трудоемкость изделия, обеспечивающая конкурентоспособную себестоимость проектируемого ГТД. *Приведенная трудоемкость* — трудоемкость изготовления деталей проектируемого двигателя на конкретном предприятии при существующем уровне организации производства и технологий данного предприятия. Определение приведенной трудоемкости деталей основывается на статистической информации о трудоемкости изготовления деталей-прототипов двигателя-аналога с учетом корректирующих коэффициентов.

Механизм реализации данной концепции представляет собой поэтапно итерационную процедуру определения резервов снижения трудоемкости в соответствии с заданными требованиями обеспечения директивной трудоемкости.

## Этапы итерационной процедуры

1. Определение директивной трудоемкости узлов ГТД на этапе эскизного проектирования по критерию конкурентоспособной себестоимости проектируемого двигателя [2] методами экономико-математического моделирования и сравнительно-аналоговым методом.

2. Определение директивной трудоемкости деталей узлов ГТД на этапе технического проектирования по критерию директивной трудоемкости узлов, установленной на первом этапе:

$$T_{ij}^{dir.r} = T_{ij}^{pr}\left(1 - \frac{T_{yj}^{a} - T_{yi}^{dir}}{T_{yj}^{a}}\right),$$

где $T_{ij}^{dir.r}$ — расчетная директивная трудоемкость изготовления новой $i$-й детали $j$-го узла;

$T_{ij}^{pr}$ — трудоемкость изготовления $i$-й детали-прототипа $j$-го узла;

$T_{yj}^{a}$ — трудоемкость $j$-го узла двигателя-аналога;

$T_{yi}^{dir}$ — директивная трудоемкость $j$-го узла проектируемого двигателя.

3. Определение приведенной трудоемкости $T^{pr}$ деталей проектируемого двигателя на конкретном предприятии при существующем организационно-техническом уровне производства предприятия на стадии технического проектирования более точными методами технологического нормирования [8].

4. Сравнение приведенной и директивной трудоемкости — основание для принятия решений по управлению технологичностью. Логический анализ возможных соотношений рассчитанных значений приведенной и директивной трудоемкости служит для выявления резервов снижения трудоемкости и повышения технологичности деталей:

$$T_{ij}^{dir} = \begin{cases} T_{ij}^{pr}, & \text{если} \quad T^{pr} \leqslant T_{ij}^{dir.r}; \\ T_{ij}^{dir.r}, & \text{если} \quad T^{pr} > T_{ij}^{dir.r}. \end{cases}$$

5. Управление технологичностью в целях ее повышения за счет выявленных резервов снижения трудоемкости реализуется с учетом оптимизации существующих технологических процессов, применяемых на данном предприятии. Если возникла ситуация, когда не выявлены резервы достижения директивной трудоемкости деталей и узла в целом, то рассматриваются варианты снижения трудоемкости для других деталей, входящих в узел. Тогда недостижимость директивной трудоемкости узла в целом необходимо компенсировать за счет снижения трудоемкости других деталей, входящих в узел.

Реализацию предложенного механизма управления осуществляют в режиме пошаговой корректировки значений расчетной директивной трудоемкости по всем деталям, входящим в узел, как внутренний цикл итерации (возвращение к этапу 2) и по всем узлам изделия, как внешний цикл (возвращение к этапу 1). В качестве основной расчетной схемы принята процедура простого перебора с заданным шагом изменения расчетных значений.

Механизм управления технологичностью предусматривает такую организацию процесса проектирования, которая позволяет не только снизить трудоемкость и себестоимость выпускаемой продукции, но и оптимизировать пути их обеспечения, тем самым обеспечить рациональное использование имеющихся ресурсов предприятия.

Предлагаемый механизм управления производственной технологичностью на основе последовательного определения трудоемкости деталей проектируемого ГТД предполагает анализ и оценку нескольких возможных вариантов реализации технологических процессов на предприятии. Выбор оптимального решения для конкретных условий производства осуществляется по критерию минимизации трудоемкости при условии обеспечения директивной трудоемкости.

В различных вариантах технологических процессов изготовления деталей проектируемого двигателя могут применяться различные заготовки, оборудование, технологическая оснастка и т.д., что приводит к различной трудоемкости и производительности.

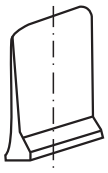
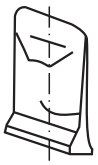
Снизить трудоемкость можно как по видам производства, так и оптимизацией технологических процессов в одном виде производства. Например, уже на стадии заготовительного производства путем совершенствования используемых заготовок, повышающих коэффициент использования материала, снижается трудоемкость последующей механической обработки.

Использование в качестве заготовки для новой лопатки не объемной штамповки, а точной изотермической штамповки позволяет сократить трудоемкость обработки профиля пера лопатки за счет снижения припусков в 4—5 раз (таблица).

При существенном усложнении конструкции лопатки сравнение значений приведенной трудоемкости решает задачу управления технологичностью путем выбора оптимального технологического процесса, обеспечивающего достижение директивной трудоемкости и конкурентоспособности проектируемого ГТД.

Предлагаемый подход отличается новизной, поскольку учитывает взаимосвязь формируемых конструкторско-технологических решений при проектировании изделия с возможностями существующей организационно-технической базы предприятия. Разработанный на базе предложенной концепции механизм управления трудоемкостью авиационных ГТД на ранних этапах проектирования представляет собой итерационную процедуру поэтапного определения резервов снижения трудоемкости в соответствии с заданными требованиями обеспечения директивной трудоемкости.

**Приведенная трудоемкость лопатки проектируемого двигателя с учетом усложнения конструкции**

| Технологический процесс | | Тип лопатки | | |
|---|---|---|---|---|
| | |  |  | |
| | | Лопатка-прототип | Лопатка проектируемого двигателя | |
| Материал | | ЭИ961 | ВТ3-1 | |
| Масса лопатки, кг | | 0,130 | 0,95 | |
| Высота лопатки, мм | | 145 | 156,8 | |
| Угол закрутки, ° | | 29 | 38 | |
| Припуски, мм | по профилю | 2,5...3,0 | 1,0...2,5 | 0,5...0,7 |
| | по полкам | 3,0...4,0 | 1,5...3,0 | 1,0...1,3 |
| | по кромкам | 4,0 | 3,0...2,0 | 1,5...2,0 |
| Масса заготовки, кг | | 0,44 | 0,697 | 0,27 |
| Вид заготовки | Объемная штамповка | ■ | ■ | — |
| | Точная штамповка | — | — | ■ |
| | Холодное вальцевание | — | — | — |
| | Точное литье | — | — | — |
| Подготовка к обработке | Распределение припуска | ■ | ■ | — |
| | Разбивка на группы | — | — | ■ |
| | Брикетирование | ■ | ■ | — |
| | Зацентровка базовых отверстий | ■ | ■ | ■ |
| | Фрезерование базового паза | — | — | — |
| Обработка хвостовика (цапф, шарниров) | Протягивание | ■ | ■ | ■ |
| | Фрезерование | ■ | ■ | ■ |
| | Точение | — | — | — |
| | Шлифование | — | — | — |
| | Слесарная | — | — | — |
| Обработка полок | Протягивание | — | — | — |
| | Фрезерование | — | — | — |
| | Точение | — | — | — |
| | Шлифование | — | — | — |
| | Слесарная | ■ | ■ | ■ |
| Обработка антивибрационных полок | Фрезерование | — | ■ | ■ |
| | Шлифование | — | ■ | ■ |
| | Полирование | — | ■ | ■ |
| | Слесарная | — | ■ | ■ |
| Обработка профиля пера | Фрезерование | ■ | ■ | ■ |
| | ЭХО | — | — | — |
| | Шлифование | — | — | — |
| | Полирование | ■ | ■ | ■ |
| | Глянцевание | ■ | ■ | ■ |
| | Виброполирование | ■ | ■ | ■ |

*Окончание таблицы*

| Технологический процесс | | Тип лопатки | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Лопатка-прототип | Лопатка проектируемого двигателя | |
| Обработка радиуса перехода пера в хвостовик | Фрезерование | ■ | ■ | ■ |
| | Шлифование | — | — | — |
| | Слесарная | ■ | ■ | ■ |
| Обработка кромок | Фрезерование | ■ | ■ | ■ |
| | Шлифование | — | — | — |
| | Полирование | ■ | ■ | ■ |
| Подбор по частоте собственных колебаний | | ■ | ■ | ■ |
| Приведенная трудоемкость, н-ч | | 4,52 | 6,55 | 5,89 |

Управление производственной технологичностью с помощью предложенного механизма обеспечивает достижение директивной трудоемкости двигателя с минимальными затратами. Методологический аппарат и итерационная процедура проведения расчетов, положенные в основу разработку механизма, отличаются от известных подходов направленностью не только на обеспечение директивной трудоемкости для конкретного предприятия, но и оптимизацию путей ее достижения в целях рационального использования имеющихся ресурсов предприятия.

Новизна предлагаемого подхода заключается также в возможности компенсации отклонения приведенной трудоемкости от директивной всего узла за счет поиска резервов снижения трудоемкости среди других деталей, входящих в этот узел или за счет поиска резервов снижения трудоемкости другого узла.

## Выводы

Решена актуальная задача разработки механизма управления производственной технологичностью авиационного двигателя. Предложена концепция согласования противоречивых критериев повышения технических характеристик двигателя при снижении материальных и трудовых затрат. Разработан механизм управления технологичностью ГТД, который реализуется при расчете трудоемкости деталей и узлов на ранних этапах проектирования. Обосновано решение по выбору оптимального технологического процесса изготовления проектируемой детали на конкретном предприятии по производству авиационного двигателя.

## Библиографический список

1. **Государственная программа** "Развитие авиационной промышленности на 2013—2025 годы".

2. **Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 1. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. М.: Машиностроение, 2008. 207 с.

3. **Ирзаев Г.Х.** Оптимизация конструкции изделия по технологичности с использованием количественных критериев // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14. № 4. С. 146—149.

4. **Клочков В.В.** Организационно-экономические механизмы повышения качества и конкурентоспособности продукции (на примере авиационного двигателестроения) // Организатор производства. 2005. № 3. С. 74—81.

5. **Засканов В.Г., Иванов Д.Ю.** Методологические аспекты повышения эффективности организации процессов проектирования, производства и эксплуатации авиационных изделий // Известия самарского научного центра российской академии наук. 2015. Т. 17. № 6—2. С. 535—539.

6. **ГОСТ 14.201—83** Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009.

7. **Исмагилова Л.А., Гилева Т.А., Галимова М.П.** Методика обоснования выбора инвестиционного проекта в инновационной экономике // Инновационная деятельность. 2015. № 1 (32). С. 63—73.

**ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 12.08.2019. Подписано в печать 03.10.2019. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.