

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2024

январь – март

№ 1 (62)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)

Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)

А. Загоскин, PhD (Великобритания)

Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)

М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)

К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.

И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.

А.О. Давидов, д-р техн. наук

Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф.

В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.

С.Л. Елистратов, д-р техн. наук

А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф.

В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.

М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф.

О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.

В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф.

В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.

А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф.

С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.

С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г.
(свидетельство ПИ № ФС 77-81374 от 30.06.2021 г.)*

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346,
телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2024 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2024

January – March

№ 1 (62)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof.
O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073,
Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ушаков И.В., Сафронов И.С., Ошоров А.Д.

Физика залечивания нанопор в конденсированном веществе
в условиях воздействия лазерного излучения и высокотемпе-
ратурной плазмы7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Бутаков Е.Б., Абдуракипов С.С., Кочергин Д.О.,

Виноградов С.В., Почтарь А.С.

Экспериментальные исследования воспламенения и горения
каменного угля с применением плазменной активации19

Ведерников Д.А., Вавилов О.А., Жарков М.А.,

Сараханова Р.Ю.

Анализ электромагнитных процессов блока возбуждения
трёхкаскадного стартер-генератора для авиационной
энергосистемы29

**Маицуров Н.Д., Комонов А.И., Мутилин С.В.,
Кичай В.Н., Яковкина Л.В.**

Формирование наноструктур из поликристаллических пленок
диоксида ванадия с помощью сканирующей зондовой
литографии.....48

**Улаханов Н.С., Москвин П.В., Мишигдоржийн У.Л.,
Семенов А.П., Воробьев М.С.**

Модификация диффузионных бор- и алюминийсодержащих
слоев электронно-пучковой обработкой.....62

**Фарахов Р.Р., Бурнашев Р.А., Насыбуллин И.А.,
Еникеев А.И., Болсуновская М.В.**

Разработка образовательной интеллектуальной системы
анализа полимерных материалов в аддитивном производстве.....76

Хайло Н.С.

Робастное обнаружение и оценивание широкополосных
сигналов90

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D.

Physics of nanopore healing in condensed matter

under the influence of laser radiation and high-temperature plasma7

TECHNICAL SCIENCES

Butakov E.B., Abdurakipov S.S., Kochergin D.O.,

Vinogradov S.V., Pochtar A.S.

Experimental studies of ignition and combustion of coal using

plasma activation.....19

Vedernikov D.A., Vavilov O.A., Zharkov M.A.,

Sarakhanova R.Y.

Analysis of electromagnetic processes in the excitation unit

of a three-stage starter generator for the aviation power system.....29

***Mantsurov N.D., Komonov A. I., Mutilin S.V.,
Kichay V.N., Yakovkina L.V.***
Formation of nanostructures from vanadium dioxide
polycrystalline films using an atomic force microscope48

***Ulakhanov N.S., Moskvin P.V., Mishigdorzhijn U.L.,
Semenov A.P., Vorobyov M.S.***
Modification of diffusion boron and aluminum containing layers
by electron beam processing62

***Farahov R.R., Burnashev R.A., Nasybullin I.A., Enikeev A.I.,
Bolsunovskaya M.V.***
Development of an educational intelligent system for analysis
of polymer materials in additive manufacturing76

Khailo N.S.
Robust detection and estimation of wideband signals.....90

УДК 538.9

**ФИЗИКА ЗАЛЕЧИВАНИЯ НАНОПОР В КОНДЕНСИРОВАННОМ
ВЕЩЕСТВЕ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ****И.В. Ушаков, И.С. Сафронов, А.Д. Ошоров***Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

В работе теоретически и экспериментально исследуется воздействие лазерного излучения и высокотемпературной плазмы на природу изменения физических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, содержащих нанопоры в тонком поверхностном слое. В настоящее время экспериментально установлена возможность одновременного повышения твердости и стойкости к растрескиванию поверхности материала в результате селективного лазерного воздействия. Экспериментальные результаты могут быть объяснены на основе модели селективного воздействия лазерного излучения на отдельные нанопоры. В работе исследована физика лазерного избирательного инициирования процессов залечивания неоднородных/дефектных областей на наноуровне. С использованием предложенной физической модели выявлена специфика избирательного прогрева областей вблизи нанопор, а также влияние наноразмерных дефектов структуры на специфику распространения изотерм. Рассмотрен процесс залечивания нанопор находящихся в неоднородно прогретом поверхностном слое материала под действием ударной нагрузки. Теоретические результаты сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что в результате селективной лазерной обработки удастся повысить микротвердость в три-четыре раза, с одновременным ростом стойкости к растрескиванию в условиях локального нагружения пирамидкой Виккерса. Полученные результаты находят объяснение в рамках представлений об избирательном лазерном залечивании нано- и микроразмерных дефектов, расположенных в поверхностном слое материала. Таким образом в работе теоретически и экспериментально изучены физико-механические свойства поверхности конденсированных материалов, находящихся в экстремальном состоянии, вызванном сильным сжатием в условиях одновременного кратковременного нагрева до высоких температур.

Ключевые слова: физика конденсированного состояния, селективное лазерное воздействие, физика залечивания нанопор, микротвердость, физическая модель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18

Введение

В работе теоретически и экспериментально исследуется воздействие лазерного излучения и высокотемпературной лазерной плазмы на изменение физико-механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, характеризующихся высокой теплопроводностью. На механические свойства материала, особенно поверхности, существенно влияют дефектные области. В ряде случаев именно дефекты определяют интегральные механические свойства конденсированных материалов. Физика селективного взаимодействия короткоимпульсного лазерного излучения с неоднородными дефектными областями в наноматериалах является перспективным направлением исследований как в области физики конденсированного состояния, так и в области физического материаловедения наноструктурных материалов. Существуют материалы, интегральные физические свойства которых определяются состоянием отдельных областей, имеющих микро- и наноразмеры [1]. Выявление физического механизма селективного взаимодей-

ствия лазерного излучения с нано- и микродефектами позволяет создать технологии управления их состоянием без изменения структуры и свойств остального «бездефектного» материала.

Физические принципы селективного лазерного воздействия существенно зависят от оптических свойств твердого материала. Из истории исследований известно, что первые работы такого рода были проведены на оптически прозрачных материалах. Особенностью селективного лазерного воздействия на такие материалы является то, что при определенных условиях лазерное излучение может воздействовать преимущественно на дефектные области [2]. При этом лазерное излучение не влияет на остальной «бездефектный» материал, не меняет его структуру и свойства.

Воздействие мощных лазерных импульсов, как правило приводит к деградации свойств дефектных областей, и как следствие – материала в целом. Вместе с тем экспериментально определены параметры селективного воздействия лазерного излучения, когда возможен перевод дефектных областей в «неопасное» состояние. Механизм селективного лазерного воздействия (как на прозрачные, так и на непрозрачные материалы) связан с релаксацией механических напряжений, частичным/полным заживлением дефектов и пр. [3, 4].

Селективное лазерное воздействие на непрозрачные материалы (например, аморфно-нанокристаллические металлические сплавы) всегда лимитировано тонким поверхностным слоем. Изменения претерпевает, как правило, только поверхностный слой [5, 6], об этом свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, посвященных изменению механических свойств поверхности наноструктурных металлических сплавов при воздействии короткоимпульсного лазерного излучения [7].

Для непрозрачных металлических сплавов были обнаружены эффекты одновременного увеличения твердости (на нано- и микроуровне), причем существенный рост твердости сопровождался увеличением пластических характеристик (например, стойкости к формированию трещин в условиях локального нагружения алмазной пирамидкой) [4]. Экспериментальные результаты были качественно описаны на основе представлений о возможности преимущественного воздействия импульсного прогрева и ударной волны на дефектные области.

Таким образом, работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию физики воздействия лазерного излучения и высокотемпературной плазмы на природу изменений физико-механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, характеризующихся высокой теплопроводностью и содержащих нанопоры в поверхностном слое.

1. Материалы и методы исследования

Исследование проводили на аморфно-нанокристаллическом металлическом сплаве $\text{Co}_{71.66}\text{V}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$ [8]. Лазерная обработка осуществлялась с использованием лазерной установки LS-2134-E4 (ELS-03): частота следования импульсов $\nu = 1\text{--}100$ Гц, длина волны излучения $\lambda = 532$ нм, энергия одиночного импульса $E \approx 15\text{--}20$ мДж, длительность воздействия одиночного импульса $\tau \approx 15\text{--}20$ нс. Плотность мощности варьировали от $141 \cdot 10^{12}$ Вт/м² до $1273 \cdot 10^{12}$ Вт/м².

Существует несколько алгоритмов селективной лазерной обработки (методики описаны в [4, 8]). Все методики селективной лазерной обработки предусматривают возможность локального нагрева материала импульсами длительностью 15–20 нс. Скорости нагрева и охлаждения должны превышать $10^{-6}\text{--}10^{-7}$ К/с,

а энергия импульса должна обеспечивать формирование ударной волны. Отметим, что общая температура образца при селективной лазерной обработке повышалась не более чем на 10 К.

Поверхностный слой твердого материала всегда имеет более высокую плотность дефектов [9]. В случае аморфных металлов/сплавов это в первую очередь поры (плотность аморфных металлических сплавов всегда меньше за счет избыточного и структурно обусловленного свободного объема) [10]. Избыточную пористость могут иметь многие аморфно-нанокристаллические материалы, получаемые при контролируемом отжиге аморфных многокомпонентных металлических сплавов. В случае «традиционных» металлических сплавов поверхность также имеет повышенную плотность дефектов, состав которых существенно зависит от технологии изготовления образца и подготовки поверхности.

Идеальная нанопора, как физический объект, обладает рядом уникальных физико-механических свойств и с точки зрения физики селективного лазерного воздействия представляет особый интерес. В идеальной поре, имеющей форму шара, отсутствуют концентраторы механических напряжений. В рамках физической модели будем также считать, что нанопора обладает околонулевой теплопроводностью. Для нанопоры отсутствует теплообмен по механизму конвекции, а также фактически запрещен теплообмен за счет излучения. Это связано с тем, что при достаточно малых размерах нанопоры теплообмен может реализовываться только за счет высокоэнергетических фотонов.

Отметим также, что поры являются распространенными дефектами, встречающимися в аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавах, в материалах, изготовленных по лазерной аддитивной технологии, и пр. [11].

В модели использовали материал, непрозрачный на длине волны лазерного излучения. Воздействие лазерного импульса с указанными выше параметрами (см. подготовка и обработка образцов) приводит к быстрому нагреву поверхности, испарению материала и формированию облака лазерной плазмы. Дальнейший нагрев материала обусловлен воздействием лазерной плазмы. В этих условиях на поверхности материала существует достаточно тонкий расплавленный слой, от которого прогревается объем образца.

Для того чтобы корректно решить данную задачу на основе механизма теплопроводности, необходимо выполнить условие однозначности. В это условие входят геометрические условия (определяющие форму и размеры расчетной области) и физические параметры материала (коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость вещества), а также граничные условия.

Решение основано на использовании нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности [12] при отсутствии внутренних источников теплоты:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad} T), \quad \{x, y\} \in G, \quad (1)$$

где $T(x, y, t)$ – температура тела, К, в точке $\{x, y\}$ в момент t ; ρ – плотность вещества, кг/м³; c – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); k – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); G – расчетная область пространства, в пределах которой решается уравнение теплопроводности, отделенная от окружающей среды граничной поверхностью Γ . В уравнении (1) единственной зависимой переменной является температура T . Размерность пространства – $2D$.

Моделировали тепловое/лазерное воздействие на аморфно-нанокристаллический металлический сплав $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$. Скорость конвекции в направлении оси X и Y равна нулю. Тепловая мощность также равна нулю.

Начальные условия: температура в объеме тела и в области теплового воздействия 293.15 К и 1943 К соответственно. Использовали граничные условия первого рода, при которых температура поверхности совпадает с температурой материала, прилегающего к поверхности.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данной работе анализировали распространение изотерм в «идеальном образце» без дефектов и распространение изотерм в образце с порами (рис. 1). Расстояние от поверхности до верхней поры 100 нм.

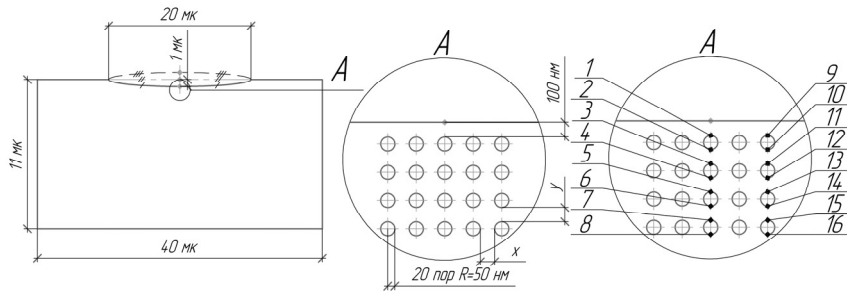


Рис. 1 – Модель образца с порами. Горизонтальные и вертикальные расстояния между границами пор 100 нм

Fig. 1 – Model of a sample with pores. Horizontal and vertical distances between pore boundaries are 100 nm

В результате компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения (FEATool Multiphysics. (date of application 07.12.2022) <https://www.featool.com/>) установлено, что, прогрев материала перед вершиной верхней поры всегда происходит быстрее, чем в бездефектном материале. Одновременно прогрев материала под данной порой замедлен в сравнении с бездефектным материалом.

На рис. 2 показана специфика снижения температуры по мере увеличения расстояния S от поверхности образца (локальной области нагрева) вдоль четырех пор, расположенных по центру. Разрывами на графике зависимости обозначено местонахождение пор с околонулевой теплопроводностью. Разность температур у верхней и нижней границы поры может достигать 500 К на начальных этапах прогрева. По мере увеличения времени локального температурного воздействия свыше 100 нс разность температур составляет 300 К.

Искажается симметрия распределения изотерм по сравнению с бездефектным материалом (рис. 3).

Установлена зависимость разности температур в точках, расположенных над порами (точки 1, 3, 5, 7) и под порами (точки 2, 4, 6, 8), ориентированными вдоль линии, проведенной из вершины. Вычисляли температуру T_1 в материале, прилегающем к верхней точке поры (например, точка «1») и температуру в нижней точке поры (например, точка «2») для случая центрального расположения пор. Определяли разность температур $\Delta T_1 = T_1 - T_2$. Аналогично рассчитывали разность температур в данных точках для случая бездефектного материала $\Delta T_2 = T_1' - T_2'$. На основании данных расчетов определен дополнительный вклад пор в величину разницы температуры Δ между точками 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, 7 и 8 (рис. 4). Разница температур Δ больше для материала с порами, чем для случая бездефектного материала (в данных условиях Δ всегда больше нуля).

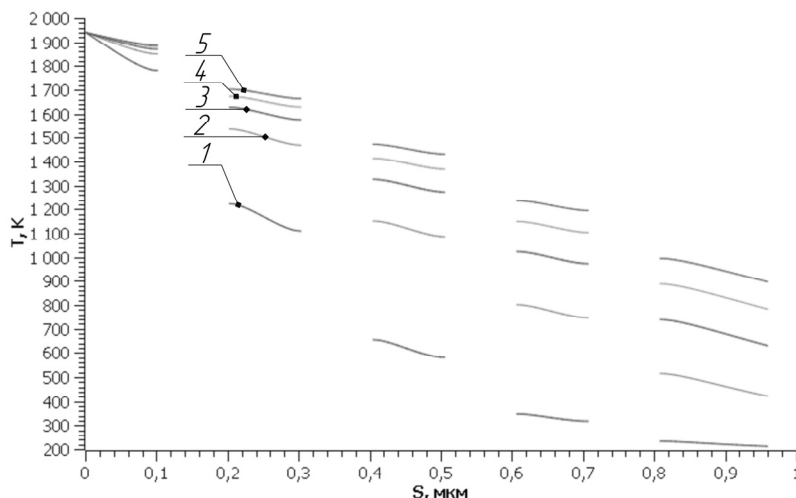


Рис. 2 – Изменения температуры на прямой вдоль четырех пор, расположенных по центру. S – расстояние до поверхности образца: кривая 1 – 10^{-8} с; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ с; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ с; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ с; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ с

Fig. 2 – Temperature changes in a straight line along four pores centered at the center. S – is distance to the surface of the sample: curve 1 – 10^{-8} s; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ s; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ s; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ s; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ s

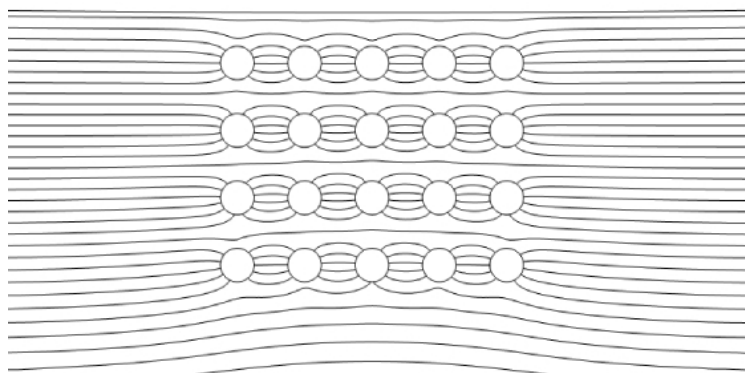


Рис. 3 – Результаты компьютерного моделирования распространения изотерм в образце

Fig. 3 – Results of computer modeling of isotherm propagation in the sample

Специфика распределения изотерм в окрестности пор существенно влияет на физику процесса частичного/полного залечивания таких дефектов при селективном лазерном воздействии. Перед верхней порой температура существенно выше, чем в бездефектном материале, а под порой ниже. В результате формируется специфическое распределение температуры, когда материал, расположенный над порой, нагрет до более высоких температур, чем материал под порой (рис. 2, 3).

Лазерное воздействие сопровождается формированием ударной волны с шокowym давлением 10^{10} Па. Это создает условие для движения нагретого материала в объем поры. Очевидно, что эффективность движения материала будет зависеть от длительности воздействия шокowego давления, характеристик нагретого материала (реологические параметры сплошной среды) и ряда других факторов.

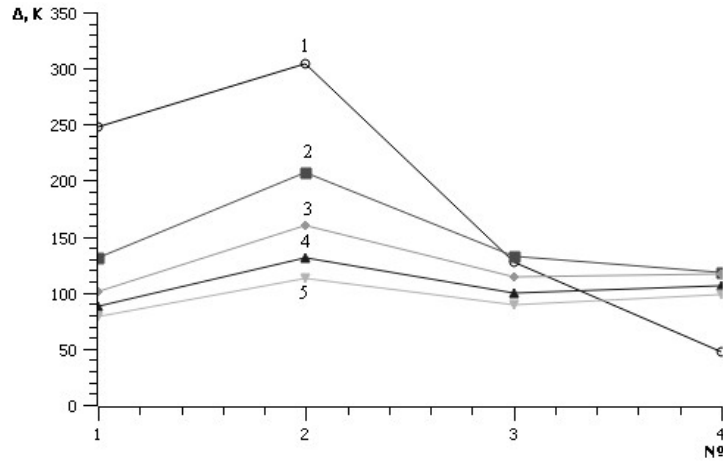


Рис. 4 – Относительная разница температур Δ для первой, второй, третьей и четвертой поры, $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$:

кривая 1 – 10^{-8} с; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ с; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ с; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ с; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ с

Fig. 4 – Relative temperature difference Δ for the first, second, third and fourth pore, $\Delta = \Delta T_1 - \Delta T_2$:

curve 1 – 10^{-8} s; 2 – $3 \cdot 10^{-8}$ s; 3 – $5 \cdot 10^{-8}$ s; 4 – $7 \cdot 10^{-8}$ s; 5 – $9 \cdot 10^{-8}$ s

Для всех пор, показанных на рис. 3, направление распространения импульса сжатия – вертикально вниз. Как следствие, можно ожидать движения пластичного нагретого материала в направлении поры. При этом с учетом разницы температур над и под порой может происходить ее заполнение нагретым материалом с последующей деформацией. С учетом предлагаемой модели (в поре отсутствуют газы) возможно ее полное схлопывание с заполнением всего пространства легкоподвижными компонентами металлического сплава.

Проведено моделирование процесса схлопывания пор под действием ударной нагрузки (FEATool Multiphysics (date of application 02.2023) <https://www.featool.com/>), с учетом распределения изотерм, показанного на рис. 3.

При моделировании пренебрегали упругой деформацией, поэтому использовали уравнения Леви–Мизеса. Так как задачу решали методом конечных элементов, использовали матричную форму записи:

$$\{\sigma'\} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} [D] \{\dot{\epsilon}\}, \quad (2)$$

где $\{\sigma'\}$ – матрица-столбец (вектор) девиатора напряжений (3); $\bar{\sigma}$ – эффективное напряжение, $\bar{\epsilon}$ – эффективная скорость деформации (интенсивность скорости деформации); $[D]$ – матрица связи (4); $\{\dot{\epsilon}\}$ – матрица-столбец скоростей деформаций (5).

$$\{\sigma'\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma_m \\ \sigma_{yy} - \sigma_m \\ \sigma_{zz} - \sigma_m \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где σ'_{ij} – девиатор напряжений; σ_m – средние напряжения,

$$[D] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\{\dot{\epsilon}\} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} \\ \dot{\epsilon}_{yy} \\ \dot{\epsilon}_{zz} \\ \dot{\epsilon}_{yz} \\ \dot{\epsilon}_{zx} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформаций.

Результат моделирования отдельных этапов заживления поры показан на рис. 5.



Рис. 5 – Основные стадии заживления исходной симметричной поры (верхняя центральная пора показанная на рис. 2) под действием сжимающей силы, инициированной лазерным импульсом/плазмой. Пора находится в поверхностном слое неравномерно нагретого материала (рис. 2–4)

Fig. 5 – Main stages of healing of the initial symmetrical pore (upper center pore, Fig. 2) under the action of a compressive force initiated by a laser pulse/plasma. The pore is located in the surface layer of the unevenly heated material (Fig. 2–4)

Разница температур ΔT_1 зависит от расстояния до поверхности образца. В общем случае распределение изотерм и величина ΔT_1 существенно зависят от места расположения пор. Очевидно, что в рамках предложенной модели чем больше температура материала и величина ΔT_1 , тем интенсивнее протекает процесс заживления поры. Кроме того, существенно, что для верхней поры совпадает направление распространения изотерм с направлением воздействия силы сжатия. Изотермы симметричны относительно данного направления.

Экспериментально установлено, что в результате селективной лазерной обработки наблюдается повышение микротвердости материала (рис. 6).

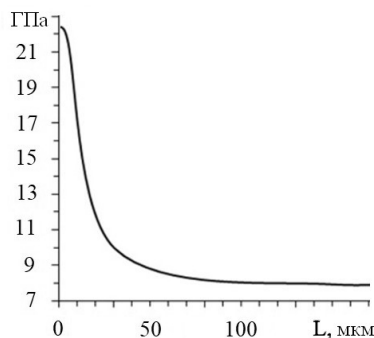


Рис. 6 – Зависимость микротвердости от расстояния L до границы лазерно обработанного участка нанокристаллического сплава $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$

Fig. 6 – Dependence of microhardness on the distance to the border of laser-treated area of nanocrystalline alloy $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$

Селективное воздействие лазерного импульса позволяет повышать прочностные характеристики аморфно-нанокристаллических металлических сплавов. Для аморфно-нанокристаллического сплава $\text{Co}_{71.66}\text{B}_{4.73}\text{Fe}_{3.38}\text{Cr}_{3.14}\text{Si}_{17.09}$ наблюдается рост микротвердости в 2–2,5 раза (рис. 6). Одновременно отмечено повышение пластических характеристик лазерно-обработанного участка. Подробно явление симультанного увеличения микротвердости и вязкости микроразрушения описано в работе [2].

Полученные в данной работе результаты позволяют описать физический механизм залечивания дефектов и пор, а также необходимость нескольких последовательных воздействий лазерных импульсов. Так, действие первых лазерных импульсов реализует селективное залечивание пор, расположенных ближе всего к поверхности. Последующее воздействие импульсов приводит к залечиванию пор, расположенных глубже. Однако эффективность залечивания пор сильно снижается по мере удаления их от поверхности из-за снижения температуры, в том числе разницы температур в верхней и нижней точках поры. Отметим также, что результат продвижения изотерм зависит от относительного расположения остальных пор. Полученные в данной работе результаты позволяют непротиворечиво объяснить экспериментальные наработки, а также предложить физическую модель селективного лазерного воздействия на нанопоры в поверхностном слое металла, при котором возможно их полное или частичное залечивание.

Заключение

1. Теоретически и экспериментально исследована физика воздействия лазерного излучения и высокотемпературной лазерной плазмы на изменения механических свойств аморфно-нанокристаллических материалов, содержащих нанопоры в тонком поверхностном слое. Предложен физический механизм селективного воздействия лазерных импульсов длительностью порядка 20 нс и энергией 15–20 мДж на нанопоры, расположенные в поверхностном слое материала. Селективное воздействие обеспечивается дополнительным прогревом материала, расположенного над нанопорой, и ее «залечивания» за счет движения нагретого материала в объем поры под действием шокового давления.

2. Экспериментально установлены изменения механических свойств поверхности конденсированных материалов после кратковременного пребывания в экстремальном состоянии, вызванном воздействием сильного сжатия и высокой температуры. При этом рост нанотвердости лазерно обработанной поверхности сопровождается увеличением ее стойкости к растрескиванию при локальном нагружении пирамидкой Виккерса. На необработанной поверхности математическое ожидание вероятности формирования трещин при локальном нагружении

составляет 0,55 при нагрузке 0,49 Н, на лазерно обработанных участках трещин при нагрузке 0,49 Н не фиксировали.

3. Физика избирательного лазерного инициирования процессов деформирования и залечивания на наноуровне определяется спецификой распространения изотерм и ударным сжатием материала, на которые влияет конфигурация нанопор. Полученные теоретические результаты и предложенная физическая модель селективного залечивания нанопор позволяют непротиворечиво объяснить имеющиеся экспериментальные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абросимова Г.Е., Аронин А.С.** Морфология поверхности деформированных аморфно-нанокристаллических материалов и образование нанокристаллов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2018. – № 5. – С. 91–97. – DOI: 10.7868/S0207352818050116.
2. **Ушаков И.В., Батомункуев А.Ю.** Моделирование комплекса процессов, протекающих в поверхностных слоях наноструктурного многокомпонентного металлического сплава под действием лазерных импульсов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 165–170. – DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-1-165-170.
3. Физика воздействия высокотемпературного импульсного нагрева на дефекты в поверхностном слое металлического сплава / И.В. Ушаков, И.С. Сафронов, А.Д. Ошоров, Z. Wang, Д.Ю. Мупрмцев // *Металлург.* – 2023. – № 7. – С. 74–79.
4. **Ушаков И.В., Сафронов И.С.** Влияние лазерной обработки на микротвердость и особенности разрушения тонких лент аморфнонанокристаллического металлического сплава // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 11–15.
5. **Капуткин Д.Е., Дураджи В.Н., Капуткина Н.А.** Ускоренное диффузионное насыщение поверхности металлов при электро-химико-термической обработке // Физика и химия обработки материалов. – 2020. – № 2. – С. 48–57. – DOI: 10.30791/0015-3214-2020-2-48-57.
6. **Kaputkina L.M., Kaputkin D.E.** Structure and phase transformations under quenching and tempering during heat and thermomechanical treatment of steels // *Materials Science Forum.* – 2003. – Vol. 426–432. – P. 1119–1126. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1119.
7. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding / Y. Lu, G. Huang, Y. Wang, H. Li, Z. Qin, X. Lu // *Materials Letters.* – 2018. – Vol. 210. – P. 46–50. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.08.125.
8. **Симонов Ю.В., Ушаков И.В.** Механические свойства поверхностных структур титанового сплава ВТ9 после многократной локальной обработки наносекундными лазерными импульсами // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. – 2020. – № 2. – С. 19–35. – DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35.
9. **Sohrabi N., Jhabvala J., Logé R.E.** Additive manufacturing of bulk metallic glasses – process, challenges and properties: a review // *Metals.* – 2021. – Vol. 11 (8). – P. 1279. – DOI: 10.3390/met11081279.
10. Влияние термобарического воздействия на нанопористость и свойства аморфных сплавов / В.И. Бетехтин, А.Г. Кадомцев, Т.В. Ларионова, М.В. Нарыкова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2014. – № 10 (712). – С. 38–42.
11. Selective laser melting of aluminum and its alloys / Z. Wang, R. Ummethala, N. Singh, S. Tang, C. Suryanarayana, J. Eckert, K.G. Prashanth // *Materials.* – 2020. – Vol. 13 (20). – P. 4564. – DOI: 10.3390/ma13204564.
12. **Gladkov S.O., Bogdanova S.B.** On the theory of nonlinear thermal conductivity // *Technical Physics.* – 2016. – Vol. 61 (2). – P. 157–164. – DOI: 10.1134/S1063784216020110.

**PHYSICS OF NANOPORE HEALING IN CONDENSED MATTER
UNDER THE INFLUENCE OF LASER RADIATION AND HIGH-
TEMPERATURE PLASMA**

Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

The paper theoretically and experimentally investigates the influence of laser radiation and high-temperature plasma on changes in the physical properties of amorphous-nanocrystalline materials with nanopores in a thin surface layer. At present, the possibility of simultaneous increase of hardness and resistance to cracking of the material surface because of selective laser action has been experimentally established. Experimental results can be explained based on the model of selective impact of laser radiation on individual nanopores. The physics of laser selective initiation of healing processes of inhomogeneous/defective areas at the nanoscale has been investigated. Using the proposed physical model, the specificity of selective heating of areas near nanopores, as well as the influence of nanoscale defects in the structure on the specificity of isotherm propagation has also been revealed. The process of healing of nanopores located in the inhomogeneously heated surface layer of the material under the action of shock loading is considered. Theoretical results are compared with experimental data. It is shown that as a result of selective laser treatment it is possible to increase microhardness by three-four times, with simultaneous growth of resistance to cracking under conditions of local loading by the Vickers pyramid. The results obtained can be explained within the framework of ideas about selective laser healing of nano- and micro-sized defects located in the surface layer of the material. Thus, the physical and mechanical properties of the surface of condensed materials in an extreme state caused by strong compression under conditions of simultaneous short-term heating to high temperatures have been studied theoretically and experimentally.

Keywords: condensed state physics, selective laser impact, physics of nanopore healing, microhardness, physical model.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18

REFERENCES

1. Abrosimova G. E., Aronin A. S. Morfologiya poverkhnosti deformirovannykh amorfno-nanokristallicheskiykh materialov i obrazovanie nanokristallov Poverkhnost' [Surface morphology of deformed amorphous-nanocrystalline materials and formation of nanocrystals]. *Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia = Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, no. 5, pp. 91–97. DOI: 10.7868/S0207352818050116.
2. Ushakov I.V., Batomunkuev A.Yu. Modelirovanie kompleksa protsessov, protekayushchikh v poverkhnostnykh sloyakh nanostrukturnogo mnogokomponentnogo metallicheskogo splava pod deistviem lazernykh impul'sov [Modelling of complex processes in surface layers of nanostructural many component metallic alloy irradiated by laser impulses]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 165–170. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-1-165-170.
3. Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D., Wang Z., Muprmtsev D.Yu. Fizika vozdeistviya vysokotemperaturnogo impul'snogo nagreva na defekty v poverkhnostnom sloe metallicheskogo splava [Physics of the effect of high-temperature pulse heating on defects in the surface layer of a metal alloy] *Metallurg = Metallurgist*, 2023, no. 7, pp. 74–79. (In Russian).
4. Ushakov I.V., Safronov I.S. Vliyanie lazernoi obrabotki na mikrotverdost' i osobennosti razrusheniya tonkikh lent amorfnonanokristallicheskogo metallicheskogo splava [Effect of laser treatment on microhardness and fracture features of thin ribbons of amorphous-nanocrystalline metal alloys]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2013, no. 2, pp. 11–15.

5. Kaputkin D.E., Duradji V.N., Kaputkina N.A. Uskorennoe diffuzionnoe nasyshchenie poverkhnosti metallov pri elektro-khimiko-termicheskoi obrabotke [Accelerated diffusion saturation of metal surface during electrochemical heat treatment]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2020, no. 2, pp. 48–57. DOI: 10.30791/0015-3214-2020-2-48-57.
6. Kaputkina L.M., Kaputkin D.E. Structure and phase transformations under quenching and tempering during heat and thermomechanical treatment of steels. *Materials Science Forum*, 2003, vol. 426–432, pp. 1119–1126. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.1119.
7. Lu Y., Huang G., Wang Y., Li H., Qin Z., Lu X. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding. *Materials Letters*, 2018, vol. 210, pp. 46–50. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.08.125.
8. Simonov Yu.V., Ushakov I.V. . Mekhanicheskie svoystva poverkhnostnykh struktur titanovogo splava VT9 posle mnogokratnoi lokal'noi obrabotki nanosekundnymi lazernymi impul'sami [Mechanical properties of surface structures of titanium alloy BT9 after multiple local processing by nanosecond laser pulses]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika = Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2020, no. 2, pp. 19–35. DOI: 10.18384/2310-7251-2020-2-19-35.
9. Sohrabi N., Jhabvala J., Logé R.E. Additive manufacturing of bulk metallic glasses – process, challenges and properties: a review. *Metals*, 2021, vol. 11 (8), pp. 1279. DOI: 10.3390/met11081279.
10. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Larionova T.V., Narykova M.V. Vliyanie termobaricheskogo vozdeistviya na nanoporistost' i svoystva amorfnykh splavov [Effect of thermobaric treatment on the nanoporosity and properties of amorphous alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2014, no. 10 (712), pp. 38–42. (In Russian).
11. Wang Z., Ummethala R., Singh N., Tang S., Suryanarayana C., Eckert J., Prashanth K.G. Selective laser melting of aluminum and its alloys. *Materials*, 2020, vol. 13 (20), p. 4564. DOI: 10.3390/ma13204564.
12. Gladkov S.O., Bogdanova S.B. On the theory of nonlinear thermal conductivity. *Technical Physics*, 2016, vol. 61 (2), pp. 157–164. DOI: 10.1134/S1063784216020110.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ушаков Иван Владимирович – родился в 1972 году, д-р техн. наук, профессор кафедры физики НИТУ МИСИС, действительный член Российской академии естественных наук. Область научных интересов: формирование свойств твердых материалов селективной лазерной обработкой неоднородных нано- и микромасштабных областей. Опубликовано 260 научных работ. (Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1. E-mail: ushakoviv@mail.ru).

Ushakov Ivan Vladimirovich (b. 1972) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Physics Department NUST MISIS, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His research interests are currently focused on formation of properties of solid materials by selective laser treatment of inhomogeneous nano- and micro-scale regions. He is the author of 260 scientific papers. (Address: 4, Leninskiy Av., NUST MISIS, Moscow, 119049, Russia. E-mail: ushakoviv@mail.ru).



Сафронов Иван Сергеевич – родился в 1989 году, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики НИТУ МИСИС. Область научных интересов: формирование физико-механических свойств аморфных и нанокристаллических металлических сплавов селективной лазерной обработкой; физико-химические свойства поверхности твердых материалов на границе различных сред. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1. E-mail: issafronov@yandex.ru).

Safronov Ivan Sergeevich (b. 1989) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), associate professor at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests include formation of physical and mechanical properties of amorphous and nanocrystalline metal alloys by selective laser treatment; physical and mechanical properties of the surface of solid materials at the boundary of various media, as well as amorphous and nanostructured materials, including the study of new substances, the development of materials and nanomaterials with specified properties and functions. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 4, Leninskiy Av., NUST MISIS, Moscow, 119049, Russia. E-mail: issafronov@yandex.ru).



Ошоров Аюр Дашеевич – родился в 1996 году, аспирант, ассистент кафедры физики, НИТУ МИСИС. Область научных интересов: металлические сплавы, механические свойства аморфных, аморфно-нанокристаллических металлов и композиционных материалов на их основе. Опубликовано 15 научных работ. (Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1.. E-mail: oshorovayur@gmail.com).

Oshorov Ayur Dashevich (b. 1996) – Master of Science, assistant professor at the Physics Department, NUST MISIS. His research interests are currently focused on metal alloys, mechanical properties of amorphous, amorphous-nanocrystalline metals and composite materials on their basis. He is the author of 15 scientific papers. (Address: 4, Leninskiy Av., NUST MISIS, Moscow, 119049, Russia. E-mail: oshorovayur@gmail.com).

*Статья поступила 21 октября 2023 г.
Received October 21, 2023*

To Reference:

Ushakov I.V., Safronov I.S., Oshorov A.D. Fizika zalechivaniya nanopor v kondensirovannom veshchestve v usloviyakh voz-deistviya lazernogo izlucheniya i vysokotemperaturnoi plazmy [Physics of nanopore healing in condensed matter under the influence of laser radiation and high-temperature plasma]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 7–18. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-7-18.

УДК 544.452.42

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
И ГОРЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИИ****Е.Б. Бутаков, С.С. Абдуракипов, Д.О. Кочергин,
С.В. Виноградов, А.С. Почтарь***Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

Данная работа представляет экспериментальные исследования перспективного способа воспламенения и горения угольного топлива с использованием плазменной активации. Экспериментальные исследования проводились на стенде тепловой мощностью до 5 МВт. В качестве экспериментальных образца был выбран каменный уголь марки ГД, отобранный после шаровой барабанной мельницы с остатком на сите R90 = 15 %. Условия были приближены к промышленным, применяемым при растопке угольных котлов. Определен рабочий диапазон скоростей пылеугольного потока в электродуговом блоке. Установлено, что стабильный процесс воспламенения и дальнейшего горения угля возможен при скоростях потока на электродуговом блоке от 6 до 13 м/с. Проведена растопка экспериментального стенда с холодного состояния до температуры 1000 °С при коэффициентах избытка воздуха a от 0,5 до 0,7, время растопки не превышало 200 с.

Ключевые слова: горение, эксперимент, плазмотрон, уголь.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-19-28

Введение

Угольные теплоэлектростанции по-прежнему вносят существенный вклад в производство энергии – 40 %. Значительная доля угольного топлива в выработке электроэнергии обусловлена большими мировыми запасами – 1055 млрд тонн, конкурентоспособными низкими ценами [1].

Одним из важнейших этапов работы угольной теплоэлектростанции является растопка котла из холодного состояния, нагрев котла до минимальной установленной рабочей мощности. Время запуска пылеугольного котла сильно зависит от конструкции котла и свойств угольного топлива, может варьироваться от 3 до 14 часов и производится несколько раз в год (до 25 пусков ежегодно на один котел). По прогнозам, в будущем количество запусков пылеугольных котлов в год будет увеличиваться, что связано с непостоянством остаточной нагрузки и увеличением возобновляемых источников энергии [2].

Для запуска пылеугольного котла применяются технологии, основанные на использовании дополнительного источника тепла [3]. Традиционной технологией запуска пылеугольных котлов является использование высокореакционного вспомогательного жидкого топлива – мазута. Для поддержания низкой вязкости мазут необходимо подогревать до температуры 80–100 °С. Подогретый мазут распыляется через форсунки в котел и поджигается дуговым запальником. Данная технология является дорогостоящей – цена мазута с каждым годом увеличивается, и трудоемкой – подготовка мазута к использованию и противопожарная безопасность. Средние мировые затраты на нагрев котла мазутом из холодного состояния составляют 2200 Р/MW установленной мощности пылеугольного котла. Кроме этого, содержание серы в мазуте выше, чем в угле, что влечет увеличение выбро-

сов токсичных оксидов серы. При сжигании мазута наблюдается высокотемпературная коррозия поверхностей нагрева, одной из причин которой, является ванадий, содержащийся в мазуте. На теплоэлектростанциях пытаются заменить устаревшие мазутные технологии. Кроме того, для современного развития мировой теплоэнергетики характерно сокращение использования дефицитного жидкого топлива, являющегося ценным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности. [4, 5]. Необходимы современные надежные технологии запуска котлов с большим сроком эксплуатации.

Одной из технологий запуска пылеугольного котла, является использование плазменной топливной системы (ПТС) [6, 7]. Основная идея технологии заключается в нагреве пылеугольного топлива высокотемпературной плазменной дугой, генерируемой плазмотроном постоянного тока [8]. Мощность плазмотронов варьируется от 100 до 350 кВт. Данная технология получило широкое применение на пылеугольных станциях США, Канады, Германии, Китая [9]. Однако, существуют некоторые недостатки эксплуатации плазмотронов постоянного тока: низкий ресурс работы электродов (составляет около 500 часов); сложностью в эксплуатации системы охлаждения плазмотрона и необходимости подведения плазмообразующего газа; громоздкостью и высокой стоимостью источников постоянного тока.

Альтернативой технологии ПТС, является плазменная система воспламенения (ПСВ), основанная на плазмотроне с переменным током. В ПСВ пылеугольное топливо вместе с окислителем пропускается через электродный блок, таким образом увеличивается время контакта высокотемпературных плазменных дуг с топливом. Плазмотрон переменного тока обладает простотой технической реализацией, малым потреблением электрической мощности от 2 до 10 кВт, длительным ресурсом непрерывной работы (исчисляется годами), отсутствием необходимости применения систем охлаждения.

Целью данной работы является исследование перспективной технологии, основанной на применении высоковольтного плазмотрона переменного тока.

2. Экспериментальные исследования и результаты

Схематично плазменная технология воспламенения угольной пыли представлено на рис. 1. Технология ПСВ позволяет заменить традиционные технологии растопки котлов и стабилизации горения, основанные на использовании резервных топлив мазут/газ. Перемешанная угольная пыль с первичным воздухом 1 поступает в электродуговой блок плазмотрона 2, в котором генерируется высокотемпературные плазменные дуги 3, являющиеся источником тепла для инициирования воспламенения и частичной газификации угля. Высокореакционная пылеугольная смесь поступает в камеру сгорания, где происходит смешение с вторичным воздухом 4 и продолжается активное горение угля в котле 5.

Основной частью ПСВ является электродуговой блок. Электродуговой блок состоит из двух пар цилиндрических медных электродов, закрепленных на восьми проходных изоляторах (рис. 2, а). Питание на электроды подается с использованием специально разработанных преобразователей частоты, состоящих из высокочастотного транзисторного инвертора, со специальной формой выходного напряжения и высокочастотный высоковольтный трансформатор оригинальной конструкции. В процессе работы на электродах генерируются две несвязанные электродные дуги (рис. 2, б).

Испытания ПСВ при сжигании угольной пыли проводились в опытной топке мощностью 5 МВт в Институте теплофизики СО РАН (рис. 3). Данный опытный стенд был выбран для изучения возможности использования ПСВ на промышленном котле.

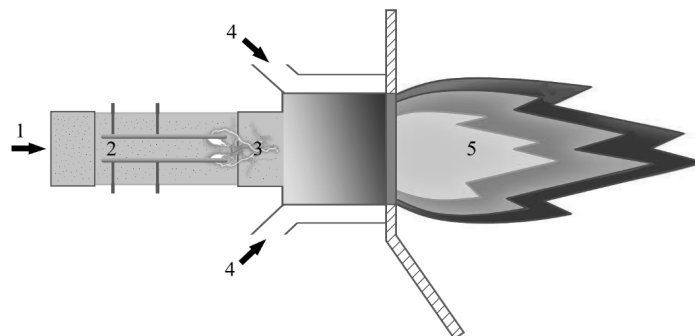


Рис. 1 – Схематическое изображения работы ПСВ:

1 – пылеугольная смесь; 2 – электродуговой блок; 3 – плазменные дуги;
4 – вторичный воздух; 5 – пылеугольное пламя

Fig. 1 – Schematic representation of the PSV operation:

1 – pulverized coal mixture; 2 – electric arc block; 3 – plasma arcs;
4 – secondary air; 5 – pulverized coal flame



a



b

Рис. 2 – Электродуговой блок:

a – схема; *b* – воспламенение пылеугольной пыли в электродуговом блоке

Fig. 2 – Electric arc unit:

a – diagram; *b* – ignition of pulverized coal dust in the electric arc unit

Опытный стенд цилиндрической формы (длина 5 м), расположен горизонтально и разделен на камеры разной длины и диаметра. Камера сгорания (внутренним диаметром 0,3 м, длина 2 м) предназначена для воспламенения и горения топлива, а также проведения визуальных наблюдений; в камере дожигания (внутренним диаметром 1 м, длина 3 м) происходит догорание топлива. Корпус топки выполнен из стали толщиной 5 мм, внутри топка теплоизолирована шамотом толщиной 125 мм. Топка может работать как с вихревой тангенциальной подачей распыленного топлива, так и в прямоточном режиме. Основными элементами топки является (рис. 3): система топливоподачи; прямоточная горелка для ПСВ, расположенная горизонтально на оси топки; камера сгорания с измерительными датчиками и смотровыми окнами; камера догорания с тангенциальной подачей вторичного воздуха; дымосос.

Топка работает следующим образом: уголь засыпается в бункер, после чего шнековым питателем подается в воздушный тракт, где смешивается с первичным воздухом ($P_{в1}$). Подвод первичного воздуха в смеситель осуществляется с воздуходувки марки MSH BL-520-670. Пылеугольная смесь поступает в электродуго-

вой блок, где инициируется воспламенение угля при прохождении плазменных дуг. Горючая смесь прямоточно подается в камеру сгорания, где смешивается с вторичным воздухом ($P_{в2}$), подаваемым через тангенциальный закручивающий аппарат. В камере сгорания протекает активное горение угольной пыли. Пройдя камеру сгорания, недогоревшее топливо поступает в камеру дожигания, где смешивается с третичным воздухом, необходимым для полного выгорания топлива. Третичный воздух подается в камеру дожигания через тангенциальный закручивающий аппарат.

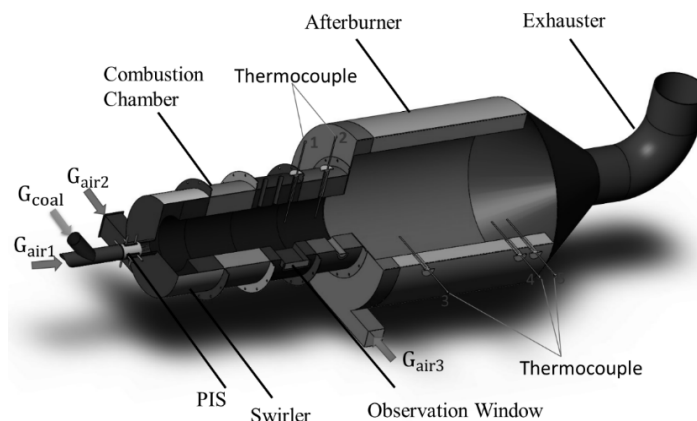


Рис. 3 – Экспериментальный полупромышленный стенд

Fig. 3 – Experimental semi-industrial stand

Температура подаваемого воздуха во всех экспериментах составляла 22 °С.

Перед проведением серии экспериментов производилась калибровка шнеково-го питателя угля и датчиков расхода воздуха. Минимальный расход воздуха определялся из условий транспортировки угольного топлива. Измерение расходов воздуха (G_{air1} , G_{air2} , G_{air3}) проводилось в течение всего эксперимента.

Таблица 1 / Table 1

Технические характеристики плазматрона переменного тока
Technical characteristics of the AC plasma torch

Мощность плазматрона, кВт	2–10
Напряжение, В	10 000
Ток дуги, А	2
Частота тока, кГц	20
Масса плазматрона, кг	15
Ресурс работы, ч	5000
Температура плазменной дуги, К	2000–3500

В настоящей работе проведены опытно-промышленные испытания ПСВ при прямоточном сжигания угольной пыли в опытной топке.

На протяжении всего эксперимента проводился визуальный контроль процесса горения угольной пыли и измерения температуры по длине стенда. В экспериментах использован каменный уголь углераза Кузнецкого бассейна марки Д, характеристики которого приведены в табл. 2.

Уголь отбирался после шаровой барабанной мельницы с остатком на сите R90 = 15 %.

Таблица 2 / Table 2

Технический и элементный анализ угля
Coal technical and elemental analysis

Технический анализ				Элементный анализ, %				
W _r , %	A _r , %	V _r , %	Q _{sr} , MJ/kg	Cr	Hr	Nr	Sr	Or
5,4	22,3	32,3	20,0	54,6	4,1	1,3	0,5	11,8

Первоначально производилось включение ПСВ и первичного воздуха, мощность, затрачиваемая на работу плазмотрона, составила 5 кВт. Включение ПСВ приводит к незначительному росту температуры воздуха, двухвального в камеру сгорания.

Для выявления характерных режимов работы технологии ПСВ эксперименты проходили в два этапа. Основной задачей первой серии экспериментов (Э₁, Э₂, Э₃) (табл. 3) являлось определение характерных режимов зажигания угольной пыли в зависимости от расхода первичного воздуха и скорости на электродуговом блоке. Расход воздуха изменялся от минимального, необходимого для транспортировки угольной пыли, до максимального, при котором происходит срыв факела в камере сгорания.

Таблица 3 / Table 3

Программа первой серии экспериментов
First series of experiments program

Параметр	Э ₁	Э ₂	Э ₃
Расход угля P _у , кг/ч	120	120	120
Расход первичного воздуха P _{в1} , м ³ /ч	114	240	330
Скорость воздуха в плазмотроне, м/с	6	13	18

В Э₁ присутствовала сепарация угольной пыли в нижней части электродного блока, несмотря на это зажигание угольной пыли было устойчивым с низкой яркостью пламени. Для прогрева стенок камеры сгорания до 900 °С потребовалось 500 с. В камере дожигания через смотровое окно наблюдались недогоревшие частички угля. В Э₂ был увеличен расход воздуха до 240 м³/ч. Уголь стабильно воспламенялся в электродуговом блоке в течение всего эксперимента, образовался факел в камере сгорания. Время выхода на температуру 900 °С составило 200 с. В случае с Э₃ при скорости на электродуговом блоке 18 м/с угольная пыль частично воспламеняется, но основная масса угля пролетает в камеру сгорания без горения.

Во второй серии экспериментов при смене режимов расход воздуха поддерживался постоянным, изменялась подача угля (табл. 3). Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания *a* уменьшался от 0,7 до 0,5.

На рис. 4–6 показаны зависимости температуры на экспериментальном полупромышленном стенде в зависимости от времени, с входными параметрами, указанными в режимах 1–3 (табл. 3).

При прохождении пылеугольной смеси через высокотемпературные плазменные дуги, генерируемые плазмотроном, наблюдалось воспламенение топлива и дальнейшее горение в камере сгорания.

Длительность экспериментов составляла около 5 мин, что достаточно для разогрева топочного пространства до температуры 1000 °С.

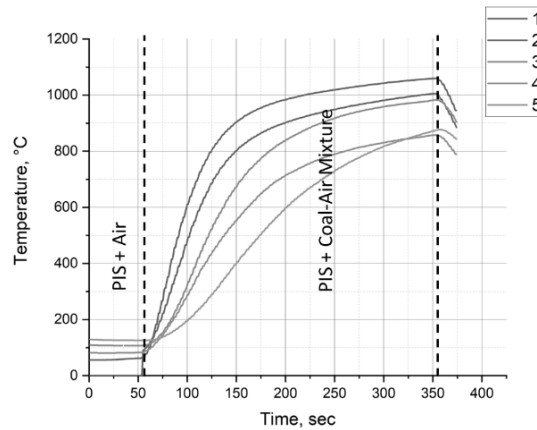


Рис. 4 – Распределение температуры по длине камеры сгорания в режиме растопки из холодного состояния с использованием ПСВ, расход угля 103 кг/ч

Fig. 4 – Temperature distribution along the length of the combustion chamber in the firing mode from a cold state using ESV, coal consumption 103 kg/h

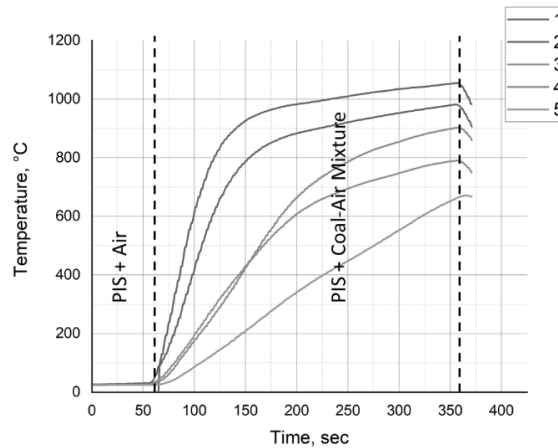


Рис. 5 – Распределение температуры по длине экспериментального стенда в режиме растопки из холодного состояния с использованием ПСВ, расход угля 122 кг/ч

Fig. 5 – Temperature distribution along the length of the experimental stand in the kindling mode from a cold state using PSV, mode 122 kg/h

Основное горение протекало в начальной зоне камеры сгорания, где расположена термопара 1 (рис. 4–6), видно, что происходит стремительный рост температуры после начала подачи угля. Во всех режимах наблюдается стабильное воспламенение и горение, в режиме 1 температура в камере дожигания растет с меньшей скоростью, чем в режимах 2 и 3. Режимы 2 и 3 схожи по скорости прогрева камеры сгорания и температурному профилю по длине экспериментального стенда. Увеличение расхода угля приводит к росту температуры в камере дожигания.

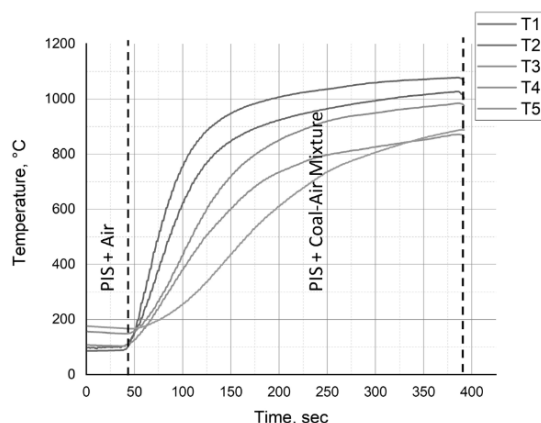


Рис. 6 – Распределение температуры по длине камеры сгорания в режиме растопки из холодного состояния с использованием ПСВ, расход угля 168 кг/ч

Fig. 6 – Temperature distribution along the length of the combustion chamber in the combustion mode from a cold state using EPS, coal consumption 168 kg/h

Во всех режимах наблюдается стабильное воспламенение и горение, в первом случае температура в начальной зоне достигает 900 °С и затем растет с меньшей скоростью, чем в режимах 2 и 3. Режимы 2 и 3 схожи по скорости прогрева камеры сгорания и температурному профилю по длине экспериментального стенда.

Таблица 4 / Table 4

Программа второй серии экспериментов
Program of the second series of experiments

Параметр	Э ₁	Э ₂	Э ₃
Расход угля P _у , кг/ч	100	125	170
Расход воздуха (P _{в1} + P _{в2} /G _{в3}), м ³ /ч	1050 (350/700)	1050 (350/700)	1050 (350/700)
a	0,4	0,55	0,65

В результате проведения экспериментов показана возможность воспламенения и горения угля с использованием ПСВ мощностью 5 кВт.

Заключение

Разработана и спроектирована новая ПСВ-технология воспламенения угольного топлива, основанная на использовании плазмотрона переменного тока мощностью от 2 до 10 кВт.

В результате экспериментов на пилотной установке установлено влияние скорости пылевоздушной смеси в электродуговом блоке на воспламенение и горение; устойчивое воспламенение угольного топлива происходит при скорости в электродуговом блоке от 6 до 13 м/с. Время выхода на режим экспериментального стенда до температуры 1000 °С при коэффициентах избытка воздуха от 0,7 до 0,5 составляло не более 200 с. С увеличением подачи угольного топлива в электродуговую установку интенсифицируется процесс воспламенения: пламя в камере

сгорания образуется мгновенно. Результаты экспериментов указывают на возможность использования технологии ПСВ для розжига и интенсификации горения угольной пыли на теплоэлектростанции.

ЛИТЕРАТУРА

1. WEC. World Energy Scenarios 2019: European regional perspectives. – URL: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-european-regional-perspectives> (accessed: 04.03.2024).
2. Annual Energy Outlook 2018 / U.S. Energy Information Administration. – URL: <https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo18/> (accessed: 04.03.2024).
3. IEA. World Energy Outlook 2017 / International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017> (accessed: 04.03.2024).
4. IEA. Coal 2019 Analysis and forecast to 2024 / International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/coal-2019> (accessed: 04.03.2024).
5. Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimization / M. Hübel, S. Meinke, M. André, C. Wedding // Applied Energy. – 2017. – Vol. 208. – P. 319–331. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.033.
6. Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses / J. Taler, P. Dzierwa, D. Taler, P. Harchut // Energy. – 2015. – Vol. 92 (1). – P. 160–170.
7. Brouwer A.S., Seebregts A., Faaij A. Operational flexibility and economics of power plants in future low-carbon power systems // Applied Energy. – 2015. – Vol. 156. – P. 107–128.
8. Han Y., Shen B., Zhang A.A. Techno-economic assessment of fuel switching options of addressing environmental challenges of coal-fired industrial boilers: an analytical work for China // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 142. – P. 3083–3087.
9. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test // Fuel. – 2014. – Vol. 126. – P. 294–300. – DOI: 10.1016/j.fuel.2014.02.047.

EXPERIMENTAL STUDIES OF IGNITION AND COMBUSTION OF COAL USING PLASMA ACTIVATION

**Butakov E.B., Abdurakipov S.S., Kochergin D.O.,
Vinogradov S.V., Pochtar A.S.**
Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS

This work presents experimental studies of a promising method of ignition and combustion of coal fuel using plasma activation. Experimental studies were carried out on a bench with a thermal power of up to 5 MW. As an experimental sample, hard coal of the GD grade was chosen selected after a ball drum mill with a sieve residue of R90 = 15%. The conditions were close to industrial ones used when lighting coal boilers. The operating range of pulverized coal flow velocities in the electric arc unit has been determined. It has been established that a stable process of ignition and further combustion of coal is possible at flow rates on the electric arc unit from 6 to 13 m/s. The experimental stand was kindled from a cold state to a temperature of 1000 °C at excess air coefficients a from 0.5 to 0.7, the kindling time did not exceed 200 seconds. Based on the experiments, CFD modeling determined whether the process conditions were met.

Keywords: combustion, experiment, plasmatron, coal.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-19-28

REFERENCES

1. WEC. World Energy Scenarios 2019: European regional perspectives. Available at: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-european-regional-perspectives> (accessed 04.03.2024).

2. U.S. EIA. *Annual Energy Outlook 2018*. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo18/> (accessed: 04.03.2024).
3. IEA. *World Energy Outlook 2017*. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017> (accessed 04.03.2024).
4. IEA. *Coal 2019. Analysis and forecast to 2024*. Available at: <https://www.iea.org/reports/coal-2019> (accessed 04.03.2024).
5. Hübel M., Meinke S., Andrén M., Wedding C. Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimization. *Applied Energy*, 2017, vol. 208, pp. 319–331. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.033.
6. Taler J., Dzierwa P., Taler D., Harchut P. Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses. *Energy*, 2015, vol. 92 (1), pp. 160–170.
7. Brouwer A.S., Seebregts A., Faaij A. Operational flexibility and economics of power plants in future low-carbon power systems. *Applied Energy*, 2015, vol. 156, pp. 107–128.
8. Han Y., Shen B., Zhang A.A. Techno-economic assessment of fuel switching options of addressing environmental challenges of coal-fired industrial boilers: an analytical work for China. *Energy Procedia*, 2017, vol. 142, pp. 3083–3087.
9. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test. *Fuel*, 2014, vol. 126, pp. 294–300. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.02.047.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бутаков Евгений Борисович – родился в 1990 году, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 53 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: e_butakov@mail.ru).

Butakov Evgenii Borisovich (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), senior researcher, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 53 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: e_butakov@mail.ru).

Абдуракипов Сергей Сергеевич – родился в 1990 году, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 47 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. Email: s.s.abdurakipov@gmail.com).

Abdurakipov Sergey Sergeevich (b. 1990) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Researcher, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 53 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: s.s.abdurakipov@gmail.com).

Кочергин Дмитрий Олегович – родился в 1994 году, инженер, ООО «КОТЭС Инжиниринг». Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано пять научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: dmitriy.kochergin@cotes-e.com).

Kochergin Dmitry Olegovich – (b. 1994) engineer, COTES Engineering LLC. His research interests are currently focused on combustion, gasification, an ignition. He has 5 scientific papers published. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: dmitriy.kochergin@cotes-e.com).

Виноградов Сергей Владимирович – родился в 2001 году, лаборант, ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано три научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: serj.vin@yandex.ru).

Vinogradov Sergey Vladimirovich (b. 2001), laboratory assistant, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He has 3 scientific papers published. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: serj.vin@yandex.ru).

Почтарь Антон Сергеевич – родился в 2001 году, лаборант, ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано три научные работы. (Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: antonpochtar01@mail.ru).

Pochtar Anton Sergeevich (b. 2001), laboratory assistant, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He has 3 scientific papers published. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: antonpochtar01@mail.ru).

*Статья поступила 15 ноября 2023 г.
Received November 15, 2023*

To Reference:

Butakov E.B., Abdurakipov S.S., Kochergin D.O., Vinogradov S.V., Pochtar A.S. Eksperimental'nye issledovaniya vosplamneniya i gorenija kamennogo uglya s primeneniem plazmennoi aktivatsii [Experimental studies of ignition and combustion of coal using plasma activation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 19–28. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-19-28.

УДК 621.314

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ БЛОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ТРЕХКАСКАДНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Д.А. Ведерников, О.А. Вавилов, М.А. Жарков, Р.Ю. Сараханова
Новосибирский государственный технический университет

В данной статье рассматривается система возбуждения трехкаскадного синхронного генератора для авиационного применения в двух отличительных режимах работы: в качестве генератора электрической энергии для бортовой системы электроснабжения и электростартера для газотурбинных двигателей летательного аппарата. В статье представлен расчет стартерного и генераторного режима работы системы возбуждения. Получены основные расчетные соотношения для схемы полупроводникового преобразователя, подтвержденные имитационным моделированием в среде PowerSIM.

Решена задача синтеза системы автоматического управления для блока возбуждения ТСГ, работающего в составе бортовой системы электроснабжения с применением методики расчета параметров регуляторов на основе метода разделения движений. Для генераторного режима работы создана двухконтурная система управления, включающая в себя ПИ- и ПИД-регуляторы с регулированием по выходному напряжению основного генерирующего каскада. Для управления блоком возбуждения в электростартерном режиме работы спроектирована одноконтурная система управления по току обмотки возбуждения с добавлением резонансной составляющей. Оценка эффективности спроектированных систем управления выполнена на основе имитационного моделирования с использованием пакетов прикладных программ PowerSIM и MATLAB/Simulink для генератора, питающего трехфазную сеть переменного тока в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54073–2017.

Результаты математического моделирования легли в основу проектирования экспериментального образца силовой части в гибридном интегральном исполнении для системы регулирования напряжения ТСГ.

Ключевые слова: синхронный генератор, возбудитель, инвертор напряжения, понижающий преобразователь постоянного тока, система автоматического управления, ПИ-регулятор, резонансный регулятор, метод разделения движений.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-29-47

Введение

В системе электроснабжения (СЭС) летательных аппаратов традиционно выделяют первичную и вторичную подсистемы. Основу первичной подсистемы составляют первичные источники электроэнергии, такие как электрогенераторы или химические источники, например, аккумуляторные батареи. Выработанная первичными источниками электроэнергия затем преобразуется полупроводниковыми преобразователями в другие виды электроэнергии [1] и поставляется во вторичную СЭС, а через нее далее – к бортовым системам летательного аппарата.

На современных летательных аппаратах чаще всего применяется комбинированная система электроснабжения, которая включает в себя все необходимые первичные источники электроэнергии [2–4]. Основным агрегатом комбинированной СЭС выступает трехкаскадный синхронный генератор (ТСГ), работающий на постоянной частоте в составе вспомогательной силовой установки (ВСУ), либо интегрированный с гидроприводом постоянных оборотов, работающий в основной системе в комплексе с маршевым двигателем [5–7].

Для системы генерирования на основе трехкаскадного синхронного генератора необходимо устройство, которое бы регулировало ток обмотки возбуждения возбудителя при изменениях тока статора основного генератора [8]. Питанием такого устройства служит напряжение подвозбудителя, которое не зависит от режима и условий работы основного генератора. Так как уровень напряжения подвозбудителя обычно выше уровня напряжения, максимально необходимого для питания обмотки возбуждения возбудителя, то для регулирования этого напряжения подойдет любой полупроводниковый преобразователь понижающего типа [9]. Рассматривая стартерный режим работы, следует учесть, что в диапазоне скоростей разгона трехкаскадного электрогенератора напряжения подвозбудителя недостаточно для устойчивой работы блока возбуждения, таким образом, необходимо организовать питание преобразователя от аккумуляторной батареи – напрямую или через повышающий преобразователь постоянного напряжения [10].

Структурная схема системы представлена на рис. 1 и включает в себя основной генерирующий каскад, возбудитель, представляющий собой расположенный на валу основного каскада шестифазный генератор, блок вращающихся выпрямителей, питающий обмотку возбуждения основного генератора постоянным током, и подвозбудитель, который также расположен на одном валу с основным генератором и возбудителем, и представляет собой трехфазную синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов.

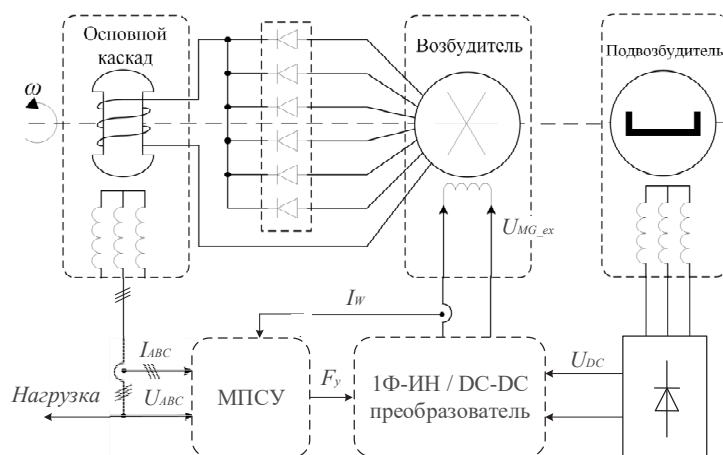


Рис. 1 – Структурная схема системы генерирования на основе трехкаскадного синхронного генератора

Fig. 1 – Block diagram of a generation system based on a three-stage synchronous generator

Здесь U_{DC} – постоянное напряжение, питающее блок системы возбуждения; I_w – ток обмотки возбуждения возбудителя; F_y – импульсы управления для силовых ключей преобразователей, генерируемые МПСУ; I_{ABC} и U_{ABC} – трехфазный выходной ток и напряжение ТСГ соответственно.

Напряжение генерируемое подвозбудителем, подается через трехфазный выпрямитель на систему возбуждения, которая в зависимости от режима работы может представлять собой однофазный инвертор напряжения (1Ф-ИН) или понижающий преобразователь постоянного тока, работающие от выпрямленного трехфазного напряжения подвозбудителя [11].

Преобразователь в свою очередь создает ток необходимого значения на обмотке возбуждения возбудителя. Таким образом электромагнитная система из возбудителя, диодного выпрямителя и обмотки возбуждения основного каскада обеспечивает необходимый уровень тока возбуждения для стабилизации статорных напряжений на заданном уровне.

Второй режим работы предлагаемой системы – двигательный режим трехкаскадного синхронного генератора. В данном режиме на обмотке возбуждения необходимо создать переменное напряжение, так как при нулевой скорости вращения вала невозможно передать электромагнитный поток от системы возбуждения до основного каскада. Для этого подходит способ трансформаторной передачи энергии, так как в состоянии покоя ТСГ можно представить обычным трансформатором. Сформированное на обмотке возбуждения переменное напряжение с коэффициентом трансформации, равным отношению числа витков индукторной и якорной обмотки, передается на якорную обмотку возбудителя, после чего оно выпрямляется и запитывает в свою очередь возбудитель основного каскада. Таким образом до создания вращающегося поля трехкаскадного генератора возможно осуществить возбуждение основного каскада для создания электромагнитного момента, необходимого для преодоления момента сопротивления вала газотурбинного двигателя и вывода системы на обороты малого газа.

1. Анализ электромагнитных процессов в системе возбуждения ТСГ

Исходя из предположения о том, что для запуска трехкаскадного генератора необходимо обеспечить полуторную перегрузку по току фазы на выходе основного генератора (ОГ), для обеспечения перегрузки необходим соответствующий ток возбуждения возбудителя. Как правило, в документации на синхронные генераторы приведена зависимость тока на фазных обмотках генератора и необходимый для этого ток возбуждения генератора. Для определения напряжения на обмотке возбуждения ОГ импеданс обмотки возбуждения примем чисто активным, поскольку в начальный момент времени вал неподвижен.

Тогда напряжение обмотки возбуждения ОГ, выраженное через ток перегрузки, примет следующий вид:

$$U_{MG_ex} = I_{MG_ex} \cdot R_{MG_ex}, \quad (1)$$

где U_{MG_ex} – напряжение; I_{MG_ex} – ток; R_{MG_ex} – активное сопротивление обмотки возбуждения ОГ. Необходимо отметить, что выражение (1) отражает среднее выпрямленное напряжение по мостовой двухполупериодной схеме.

Действующее значение напряжения фазы возбудителя на входе выпрямительной схемы рассчитывается следующим образом:

$$U_{EX_phase} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot U_{MG_ex}. \quad (2)$$

Поскольку в режиме стартера в начальный момент скорость вала равна нулю, примем обмотку возбуждения и фазные обмотки в качестве первичной и вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, коэффициент трансформации возбудителя принимает следующий вид:

$$k_T = \frac{w_2}{w_1}, \quad (3)$$

где w_1 , w_2 – количество витков обмотки возбуждения возбудителя и фазы рабочей обмотки возбудителя соответственно.

Действующее значение напряжения на обмотке возбуждения возбудителя с учетом выражений (2) и (3) рассчитывается следующим образом:

$$U_W = \frac{U_{EX_phase}}{k_T}. \quad (4)$$

Полное сопротивление обмотки возбуждения возбудителя, выраженное с помощью комплексного сопротивления обмотки возбуждения возбудителя z_W , выглядит следующим образом:

$$Z_W = \sqrt{\operatorname{Re}(z_W)^2 + \operatorname{Im}(z_W)^2}. \quad (5)$$

Действующее значение тока через обмотку возбуждения возбудителя, полученное с помощью выражений (4) и (5), представлено как

$$I_W = \frac{U_W}{Z_W}. \quad (6)$$

А. Анализ электромагнитных процессов в преобразователе напряжения в режиме стартера

В качестве преобразователя напряжения для питания обмотки возбуждения возбудителя был выбран управляемый H-мост, который способен работать как в качестве однофазного инвертора напряжения, так и выполнять роль DC/DC преобразователя. В стартерном режиме работы выпрямитель, представляющий собой трехфазный диодный мост, питаемый подвозбудителем, не используется, DC-DC преобразователь в этом режиме подключается к аккумуляторной батарее. В качестве обмотки возбуждения возбудителя выступает эквивалентная RL нагрузка. Для управления преобразователем используется блок скалярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), принцип работы которого основан на формировании импульсов управления F_y для полупроводниковых ключей в моменты сравнения двух сигналов – синусоидального модулирующего сигнала u_M с амплитудой M и одностороннего пилообразного опорного сигнала U_{REF} , описываемого следующим выражением:

$$U_{REF(max)}(t) = \frac{-2}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\omega_{ref}}{2} \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad (7)$$

где $\omega_{ref} = 2\pi f_{ref}$; f_{ref} – частота опорного сигнала, равная частоте коммутации полупроводниковых ключей.

Процесс работы ШИМ также может быть описан с помощью переключающих функций для полупроводниковых ключей, как представлено ниже:

$$F_1(t) = \begin{cases} 1, & u_{1M}(t) > u_{ref}(t), \\ 0, & u_{1M}(t) < u_{ref}(t); \end{cases} \quad (8)$$

$$F_2(t) = \begin{cases} 1, & u_{2M}(t) > u_{ref}(t), \\ 0, & u_{2M}(t) < u_{ref}(t), \end{cases} \quad (9)$$

где u_{1M} и u_{2M} – модулирующие сигналы для ключей в катодной группе первой и второй стойки H-моста соответственно, при этом ключи в анодной группе рабо-

тают в противофазе с парными для них ключами внутри каждой отдельной стойки Н-моста.

Тогда напряжение на обмотке возбуждения возбудителя, полученное с помощью выражений (8) и (9), выглядит следующим образом:

$$u_W(t) = U_{DC} (F_1(t) - F_2(t)). \quad (10)$$

Величина действующего значения напряжения на RL нагрузке может быть описана с помощью следующего выражения:

$$U_W = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_W)^2 dt} = \frac{U_{DC} M}{\sqrt{2}}, \quad (11)$$

где u_W – мгновенное значение напряжения в обмотке возбуждения; T – период напряжения на нагрузке.

Графики токов и их спектров, представленные на рис. 2, были получены с помощью математического моделирования в среде Mathcad на основе выражений (1)–(11) при частоте модулирующего сигнала 1000 Гц, опорного сигнала 30 кГц.

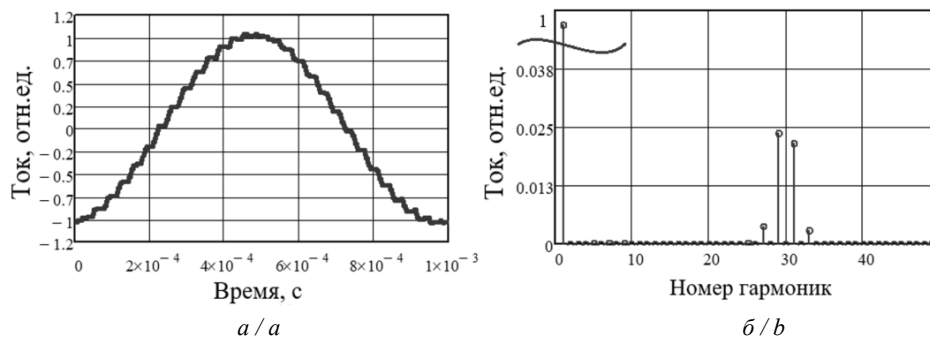


Рис. 2 – Осциллограмма тока на обмотке возбуждения возбудителя (а) и его гармонический спектр в относительных единицах (б)

Fig. 2 – Oscillogram of the excitation winding current of the exciter (a) and its harmonic spectrum in relative units (b)

Полученный в результате математического моделирования коэффициент гармонических искажений по току обмотки возбуждения составляет $THD_F = 1,16059$.

Б. Анализ электромагнитных процессов преобразователя напряжения в режиме генератора

Поскольку вал, а значит, и ротор возбудителя вращается, то в режиме генерирования на обмотку возбуждения возбудителя необходимо подать постоянный ток, достаточный для возбуждения возбудителя. Преобразователь в данном случае работает от выпрямленного напряжения подвозбудителя, генерируемого трехфазной диодной мостовой схемой. Полупроводниковые ключи рассматриваемого в работе преобразователя могут работать как в режиме мостового преобразователя постоянного тока, так и в качестве классической схемы понижающего DC-DC преобразователя. В данной работе рассматривается первый вариант, при котором преобразователь функционирует в качестве однофазного инвертора напряжения.

Выпрямленное напряжение возбудителя выражается в соответствии со следующей по формулой:

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{SUB_phase},$$

где U_{SUB_phase} – фазное напряжение на выходе подвозбудителя.

ШИМ преобразователя функционирует аналогично стартерному режиму, описанному выше (7), при этом коэффициент заполнения ШИМ выражается следующим образом:

$$M = \frac{U_W}{U_{DC}},$$

где U_W – напряжение, необходимое для возбуждения возбудителя.

Полученный график тока на обмотке возбуждения и его спектральный состав представлены на рис. 3.

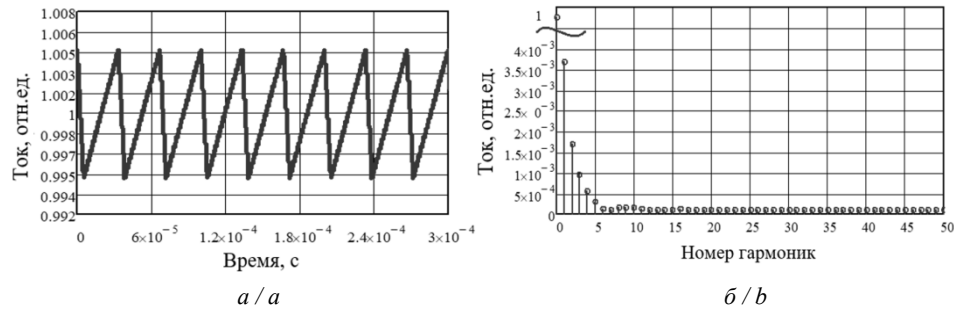


Рис. 3 – Осциллограмма тока на обмотке возбуждения возбудителя (а) и его гармонический спектр в относительных единицах (б)

Fig. 3 – Oscillogram of the excitation winding current of the exciter (a) and its harmonic spectrum in relative units (b)

2. Имитационное моделирование режимов работы системы возбуждения в среде PSIM

Моделирование проводилось в соответствии с данными, указанными в табл. 1, В качестве основного звена системы генерирования электроэнергии рассматривается синхронный генератор мощностью 90 кВт · А с частотой вращения вала 12 000 об/мин, питающий бортовую сеть переменного тока постоянной частоты 115 В/400 Гц, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54073–2017 [12].

На рис. 4 приведены спектральный состав и осциллограммы тока обмотки возбуждения для двух режимов работы, на рис. 5 – спектральный состав и кривая выходного напряжения ТСГ в генераторном режиме работы.

На основании результатов моделирования стартерного режима установлено, что расхождение с расчетом амплитуды напряжения по основной и коммутационным гармоникам, вплоть до пятой, не превысило 0,2 %. Коэффициент гармонических искажений составил $THD_F = 1,16198$, несоответствие с расчетом 0,12 %. Поскольку форма тока на обмотке возбуждения близка к синусу, имеет смысл оценивать только амплитуду гармоники на основной частоте, отличие амплитуды основной гармоники от расчета не превысило 0,1 %.

Таблица 1 / Table 1

Параметры силовой схемы
Parameters of the power circuit

Параметр	Значение
<i>Стартерный режим</i>	
Шаг счета моделирования, с	$1 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент заполнения ШИМ при разомкнутой системе управления M	0,54387
Частота выходного напряжения 1Ф-ИН (частота модулирующего сигнала ШИМ), кГц	1
Частота коммутации полупроводниковых ключей (частота опорного сигнала ШИМ), кГц	30
Напряжение U_{DC} на входе 1Ф-ИН, В	270
Сопротивление обмотки возбуждения R_w , Ом	3,85
Индуктивность обмотки возбуждения L_w , мГн	4,65
Амплитуда тока обмотки возбуждения $i_{w(ref)}$, А	4,98
<i>Генераторный режим</i>	
Напряжение U_{DC} на входе понижающего DC-DC преобразователя, В	68
Коэффициент заполнения ШИМ при разомкнутой системе управления M	0,849648
Частота коммутации полупроводниковых ключей (частота опорного сигнала), кГц	30
Действующее значение первой гармоники выходного напряжения ТСГ $u_{g(ref)}$, В	115
Частота выходного напряжения ТСГ, Гц	400
Действующее значение первой гармоники выходного тока ТСГ, А	250

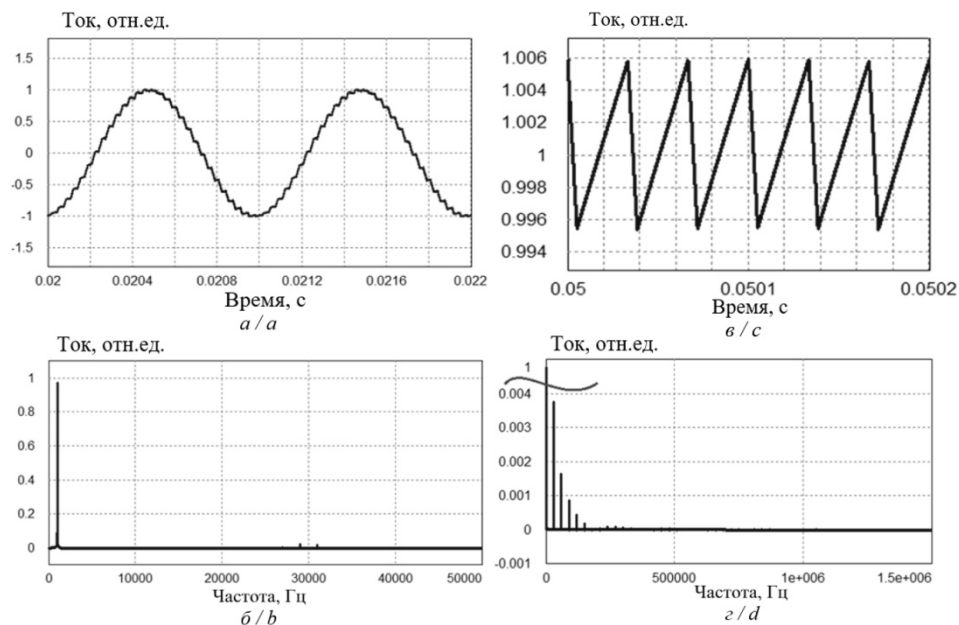


Рис. 4 – Ток через обмотку возбуждения возбудителя в стартерном (а) и генераторном (в) режиме, спектр тока в стартерном (б) и генераторном (г) режиме

Fig. 4 – Current through the excitation winding in the starter (a) and generator (b) operation modes, current harmonic spectrum in the starter (c) and generator (d) operation modes

В генераторном режиме величина первой гармоники выходного напряжения ТСГ расходитя с требуемым значением на 3 %, на коммутационной гармонике 30 кГц погрешность составила 3,66 %, коэффициент гармонических искажений фазного напряжения основного генератора составил $THD_F \approx 14$ %. Ток на обмотке возбуждения возбудителя близок к константе, коммутационные гармоники не вносят существенного вклада в среднее значение тока.

На рис. 5 представлена осциллограмма действующего значения напряжения на выходе основного генерирующего каскада, полученная в результате моделирования полной модели ТСГ с расчетным коэффициентом заполнения ШИМ для генераторного режима.

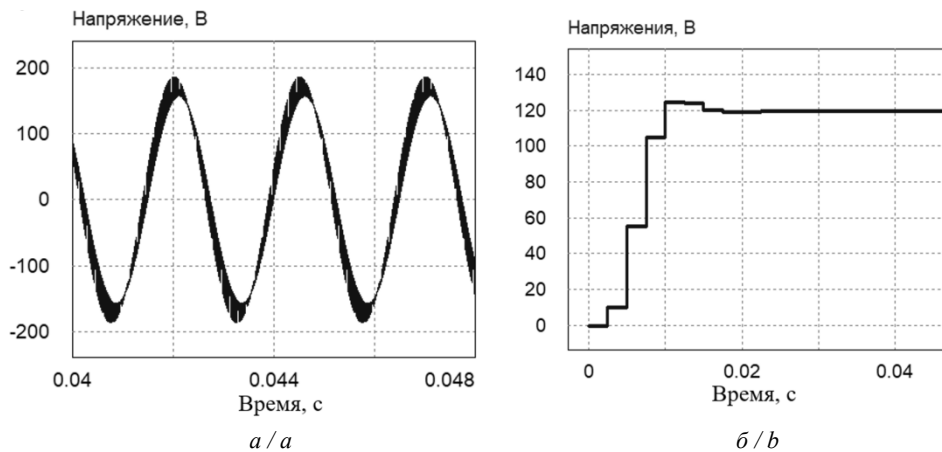


Рис. 5 – Осциллограмма мгновенного (а) и действующего (б) значения напряжения на выходе основного генерирующего каскада в генераторном режиме

Fig. 5 – Oscillogram of instantaneous (a) and effective (b) output voltage values of the main generating stage in the generator operation mode

В генераторном режиме ток на обмотке возбуждения возбудителя близок к константе, коммутационные гармоники не вносят существенного вклада в среднее значение тока, поэтому точность расчета по нулевой гармонике находится в рамках 0,2 %

3. Синтез системы управления

Исходя из результатов, полученных в разделе 2, можно заключить, что в полученной силовой схеме при разомкнутой системе управления невозможно добиться высокого качества выходных параметров и удовлетворения требования указанного стандарта для бортовых систем переменного тока [12]. Добавление системы автоматического регулирования (САР) позволит уменьшить ошибку слежения по току обмотки возбуждения в стартерном режиме и ошибку слежения по выходному напряжению в генераторном режиме, а также обеспечит грубость динамических свойств процессов в системе при существенных изменениях рабочего режима и устойчивость рассматриваемой системы в динамических режимах при соблюдении требований ГОСТ [12] на характеристики переходных процессов.

Для системы возбуждения в генераторном режиме, работающей в конфигурации понижающего преобразователя, построена двухконтурная САР, представлен-

ная на рис. 6. В ее состав входит пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор по току обмотки возбуждения возбудителя во внутреннем контуре, и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор по выходному трехфазному напряжению ТСГ во внешнем контуре регулирования.

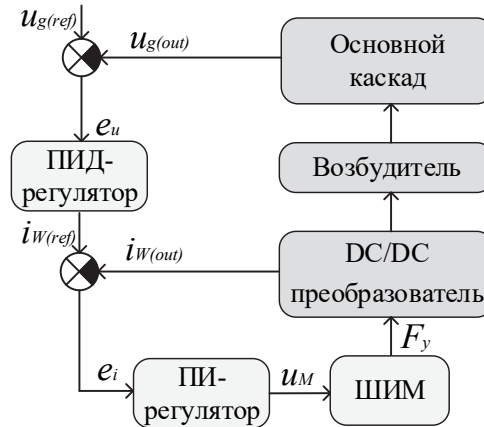


Рис. 6 – Структурная схема системы управления возбудителя в генераторном режиме работы

Fig. 6 – Block diagram of the exciter control system in the generator operation mode

Здесь $i_{W(ref)}$ и $i_{W(out)}$ – задание на ток обмотки возбуждения и фактическое значение этого тока; $u_{g(ref)}$ и $u_{g(out)}$ – задание на выходное напряжение ТСГ для одной из фаз (фазы A) и фактическое значение этого напряжения; e_u и e_i – ошибки слежения по выходному напряжению и току обмотки; u_M – управляющее воздействие, поступающее с выхода регулятора на вход ШИМ (модулирующий сигнал), где затем формируется последовательность управляющих импульсов F_y для силовых ключей преобразователя.

В данной работе для расчета параметров регулятора используется метод разделения движений (МРД), обеспечивающий грубость динамических свойств процессов в системе управления по отношению к существенным изменениям режимов работы преобразователя при простой процедуре синтеза регуляторов [13, 14]. Также, как показано в работе [15], данный метод позволяет проводить независимый расчет резонансных и основных составляющих регулятора.

Передаточная функция (ПИ) регулятора и ее вид, адаптированный под расчет с использованием МРД [14], выглядят следующим образом:

$$W_{PI}(s) = k_P + \frac{k_I}{s} = k_1 \frac{s + T_1^{-1}}{\mu_1 s}, \quad (12)$$

где k_P и k_I – пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора; k_1 – коэффициент усиления, рассчитываемой на основе МРД; μ_1 – постоянная времени подсистемы быстрых движений (ПБД); T_1 – постоянная времени подсистемы медленных движений (ПМД).

В качестве регулятора во внешнем контуре САР для понижающего преобразователя предлагается использовать (ПИД) регулятор:

$$W_{PID}(s) = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s = k_2 \frac{(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2})}{\mu_2^2 s^2 + d_2 \mu_2 s}, \quad (13)$$

где k_D – дифференциальный коэффициент регулятора; k_2 – коэффициент усиления регулятора; d_2 – коэффициент демпфирования.

Процессы в понижающем DC-DC преобразователе могут быть описаны с помощью следующей системы уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{dI_W}{dt} = -\frac{R_W}{L_W} I_W + \frac{U_{DC}}{L_W} u_M; \\ I_{OUT} = I_W, \end{cases} \quad (14)$$

где R_W – сопротивление обмотки возбуждения; L_W – индуктивность обмотки возбуждения; I_{OUT} – выходной ток преобразователя.

Соответственно, передаточная функция по току, полученная на основе математической модели DC-DC преобразователя (14) с помощью преобразования Лапласа, выглядит следующим образом:

$$W_1(s) = \frac{I_W(s)}{u_M(s)} = \frac{U_{DC}}{L_W s + R_W}. \quad (15)$$

Передаточная функция объекта управления для внешнего контура включает в себя компоненты, отражающие параметры возбудителя и основного генератора, и выглядит следующим образом:

$$W_2(s) = \frac{1}{T_{ST1}s + 1} \cdot \frac{1}{\frac{L_{WG}}{R_{WG}}s + 1} \cdot \frac{1}{T_{ST2}s + 1}, \quad (16)$$

где T_{ST1} – постоянная времени обмотки статора возбудителя; T_{ST2} – постоянная времени обмотки статора основного генератора; R_{WG} и L_{WG} – сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения основного генератора.

Структурная схема для системы возбуждения в стартерном режиме работы представлена на рис. 7.



Рис. 7 – Структурная схема системы управления возбудителя в стартерном режиме работы

Fig. 7 – Block diagram of the exciter control system in the starter operation mode

В этом режиме работы рассматривается одноконтурная система управления, включающая в себя ПИ-регулятор с резонансной компонентой, которая позволяет

удовлетворить требованию асимптотического стремления к нулю ошибки регулирования $e_i(t)$:

$$W_{PIR}(s) = k_3 \frac{s + T_3^{-1}}{\mu_3 s} \left(1 + \frac{k_{RES} s}{s^2 + \omega_0^2} \right), \quad (17)$$

здесь ω_0 – частота заданного гармонического воздействия; k_{RES} – коэффициент усиления резонансной составляющей регулятора, рассчитываемые следующим образом:

$$k_{RES}(s) = 2d\omega_0 = 2d2\pi f_0, \quad (18)$$

где коэффициент демпфирования выбирается из условия $d > 0$, например $d = 1$.

Ток в обмотке возбуждения, подключенной в качестве нагрузки к выходу однофазного инвертора, может быть описан с помощью следующего выражения:

$$\frac{dI_W}{dt} = \frac{1}{L_W} U_{DC} - \frac{R_W}{L_W} I_W. \quad (19)$$

Учитывая, что в обеих САР присутствует контур регулирования тока обмотки возбуждения, передаточная функция однофазного инвертора по этому току аналогична передаточной функции для DC-DC преобразователя (15). Полученные передаточные функции для объекта управления и регуляторов (12)–(17) используются далее для синтеза САР и расчета параметров регуляторов.

А. Стартерный режим работы

На первом этапе с помощью передаточной функции для резонансного регулятора (17) и передаточной функции для объекта управления (15) получена передаточная функция для замкнутой системы для внутреннего контура по току с единичной обратной связью следующего вида:

$$W_{\Pi}(s) = \frac{W_1(s)W_{PIR}(s)}{1 + W_1(s)W_{PIR}(s)}, \quad (20)$$

$$W_{\Pi}(s) = \frac{k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} (s^2 + k_{RES} s + \omega_0^2) (s + T_3^{-1})}{A_2(s)}. \quad (21)$$

Для характеристического полинома передаточной функции (21) введена следующая замена:

$$A_2(s) = \mu_3 s^4 + \left(\mu_3 \frac{R_W}{L_W} + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} \right) s^3 + \left(\mu_3 + k_3 k_{RES} \frac{U_{DC}}{L_W} + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} T_3^{-1} \right) s^2 + \left(\mu_3 \frac{R_W}{L_W} \omega_0^2 + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} \omega_0^2 + k_3 k_{RES} \frac{U_{DC}}{L_W} T_3^{-1} \right) s + \left(k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} T_3^{-1} \omega_0^2 \right). \quad (22)$$

Для анализа условий устойчивости замкнутой системы и получения расчетных соотношений параметров ПИ-регулятора необходимо рассмотреть данный характеристический полином, при этом необходимо отметить наличие малого положи-

тельного параметра μ_3 в его составе, что приводит к формированию быстрых и медленных процессов в замкнутой системе. Для выделения этих процессов и анализа корней данного полинома можно использовать метод разделения движений, описанный в [13, 14]. Так, характеристический полином ПМД можно получить из выражения (22) при $\mu_3 \rightarrow 0$:

$$A_{I(SMS)}(s) = k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} (s^2 + k_{RES}s + \omega_0^2) (s + T_3^{-1}). \quad (23)$$

Принимая во внимание устойчивость полинома в числителе передаточной функции (21), устойчивость процессов в подсистеме медленных движений обеспечивается выбором $T_3 > 0$. Данную постоянную времени можно рассчитать исходя из требований на время переходных процессов по току I_W , используя следующее соотношение:

$$t_{settle} = (3...4)T_1, \quad (24)$$

где t_{settle} – время переходного процесса по току.

Для получения полинома ПБД необходимо выполнить в полиноме (22) замену $s = p / \mu_3$ и умножить полученное выражение на μ_3^3 . Затем, устремив $\mu_3 \rightarrow 0$, было получено следующее выражение:

$$\lim_{\mu_3 \rightarrow 0} \left(A_I \left(\frac{p}{\mu_3} \right) \mu_3^3 \right) = p^4 + p^3 k_3 \frac{U_{DC}}{L_W}. \quad (25)$$

После умножения (25) на p^{-3} и выполнения замены $p = \mu_3 s$ для полинома подсистемы быстрых движений можно записать:

$$A_{I(FMS)}(s) = s\mu_3 + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W}. \quad (26)$$

Исходя из выражения для ПБД (25) при постоянной времени $\mu_3 > 0$ устойчивость быстрых процессов будет обеспечиваться условием $(k_3 U_{DC} / L_W) > 0$. Для простоты расчета можно выбрать коэффициент регулятора k_3 равным L_W / U_{DC} . Из выражения (23) следует, что темп медленных процессов определяется постоянными времени T_3 и $\tau = 1 / \sqrt{\omega_0^2}$. Тогда постоянную времени μ_3 можно рассчитать, используя следующее соотношение:

$$\mu_3 = \min\{\tau, T_3\} \eta^{-1}, \quad (27)$$

где η – степень разделения быстрых и медленных движений, которую рекомендуется задавать из условия $\eta \geq 10$ [14]. На практике для импульсных преобразователей расчет данного параметра можно упростить, опираясь на частоту коммутации силовых ключей преобразователя, как будет показано далее.

Б. Генераторный режим работы

Процедура расчета параметров ПИ-регулятора для внутреннего контура САР на рис. 2 аналогична расчету, проведенному в предыдущем подразделе. Используя передаточную функцию ПИ-регулятора (12) и передаточную функцию объекта

управления (24), получена передаточная функция для замкнутой системы по внутреннему контуру:

$$W_{I2}(s) = \frac{W_1(s)W_{PI}(s)}{1 + W_1(s)W_{PI}(s)}. \quad (28)$$

На основе анализа характеристического полинома данной передаточной функции и выделения полиномов подсистем быстрых и медленных движений получены следующие соотношения для расчета параметров ПИД-регулятора во внутреннем контуре двухконтурной САР:

$$k_1 = U_{DC} / L_W, \quad (29)$$

$$\mu_1 = 1 / f_s, \quad (30)$$

$$T_1 = \mu_1 \eta, \quad (31)$$

где f_s – частота коммутации силовых ключей. При таком подходе к расчету параметров постоянные времени T и μ автоматически принимают достаточно малые значения, чтобы удовлетворять требованиям на время переходного процесса при сохранении достаточного запаса устойчивости.

Синтез регулятора во внешнем контуре также аналогичен проведенным ранее процедурам. Используя передаточные функции для объекта управления (16) и ПИД-регулятора (13), при условии, что все переходные процессы во внутреннем контуре закончились, была получена передаточная функция для замкнутой системы по внутреннему контуру:

$$W_U(s) = \frac{W_2(s)W_{PID}(s)}{1 + W_2(s)W_{PID}(s)}, \quad (32)$$

$$W_U(s) = \frac{k_2(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2})}{A_{CO}(s)(\mu_2^2 s^2 + d_2 \mu_2 s + k_2(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2}))}, \quad (33)$$

где введена замена:

$$A_{CO}(s) = (T_{ST1}s + 1) \left(\frac{L_{WG}}{R_{WG}} s + 1 \right) (T_{ST2}s + 1). \quad (34)$$

Анализируя характеристический полином системы (33) аналогично проведенным в предыдущем разделе процедурам, были получены полиномы подсистем быстрых и медленных движений:

$$A_{U(SMS)}(s) = k_2(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2}), \quad (35)$$

$$A_{U(FMS)}(s) = s^2 \mu_2^2 T_{ST1} T_{ST2} \frac{L_{WG}}{R_{WG}} + s \mu_2 T_{ST1} T_{ST2} \frac{L_{WG}}{R_{WG}} d_2. \quad (36)$$

Учитывая полученные выражения (33)–(36), на основе метода разделения движений и при соблюдении условий $\mu_2 > 0$ и $d_2 = 1$, коэффициенты ПИД-регулятора можно рассчитать следующим образом:

$$k_2 = T_{ST1} T_{ST2} \frac{L_{WG}}{R_{WG}}, \quad (37)$$

$$\mu_2 = T_1, \quad (38)$$

$$T_2 = \mu_2 \eta. \quad (39)$$

Здесь постоянные времени подсистем быстрых и медленных движений μ_2 и T_2 для внешнего контура рассчитаны на основе быстродействия внутреннего контура.

4. Результаты моделирования

Для экспериментальной проверки эффективности синтезированной САР и предлагаемого регулятора было проведено имитационное моделирование системы возбуждения с помощью ПО PowerSIM и среды MATLAB/Simulink.

Параметры регуляторов, рассчитанные в соответствии с указанными выше параметрами силовых схем и полученными выражениями (30)–(32), (34)–(36), (37)–(39), указаны в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры регуляторов в системе автоматического управления
Parameters of controllers in the automatic control system

Коэффициент	ПИР-регулятор	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
k_{RES}	12566	–	–
k	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$6,85 \cdot 10^{-5}$	$5,57 \cdot 10^{-9}$
μ	$3,333 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$
T	$3,333 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
η	10	7	7

На рис. 8 приведены осциллограммы тока обмотки возбуждения в стартерном режиме, на рис. 9 – осциллограммы фазы A выходного напряжения ТСГ в генераторном режиме работы в статическом режиме и при изменении мощности нагрузки от 100 до 160 % от номинального значения.

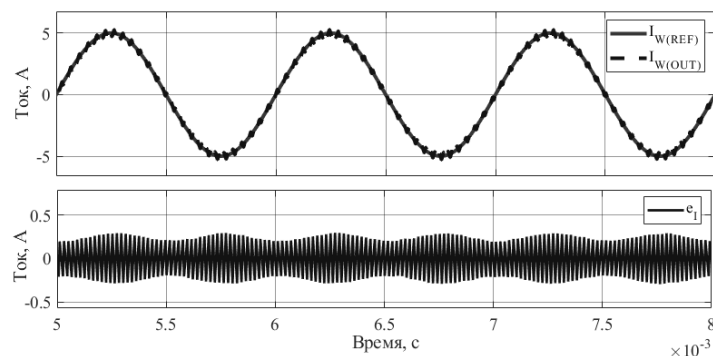


Рис. 8 – Осциллограммы тока обмотки возбуждения возбудителя в стартерном режиме работы

Fig. 8 – Oscillograms of the exciter field winding current in the starter operation mode

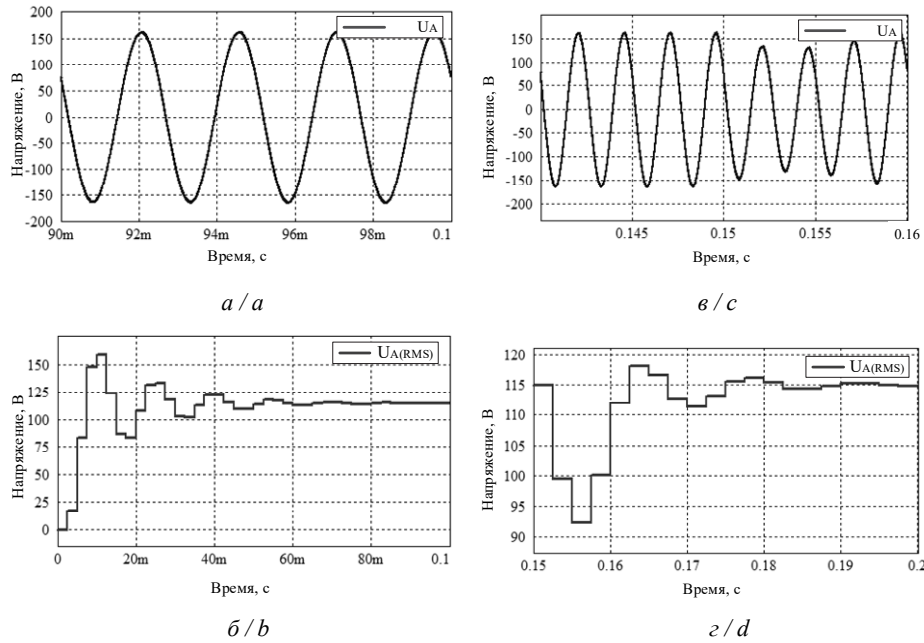


Рис. 9 – Осциллограммы одной фазы выходного напряжения ТСГ в статическом (а), (б) и динамическом (в), (г) режимах работы

Fig. 9 – Oscillograms of one phase of the generator output voltage in static (a), (b) and dynamic (c), (d) operating modes

Как видно из полученных осциллограмм, в стартерном режиме относительная ошибка слежения по току для САР с регулятором (17) составляет $e_f \approx 4\%$, а коэффициент гармонических искажений по току обмотки возбуждения составляет $THD_F = 0,04$, что полностью соответствует предъявляемым требованиям на точность и существенно улучшает результаты, полученные для разомкнутой системы управления из раздела 2.

Для генераторного режима ошибка по величине первой гармоники (400 Гц) составляет менее 1% при коэффициенте нелинейных искажений $THD \approx 0,3\%$, что в несколько раз меньше аналогичных результатов, полученных при моделировании разомкнутой системы в разделе 3. Время переходного процесса при набросе мощности нагрузки составляет около 0,05 с.

По результатам данного раздела можно заключить, что полученные при имитационном моделировании синтезированной САР результаты полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 54073–2017 для бортовых систем переменного тока с постоянной частотой.

Заключение

В данной работе показана возможность создания стартер-генераторной системы двигателя самолета на основе трехкаскадного синхронного генератора и полупроводникового преобразователя. Предложена система возбуждения, основанная на H-мосте, которая позволяет использовать трехкаскадный синхронный генератор не только в режиме генерирования, но и как стартерную систему. Преимущество предложенной топологии для стартерного режима состоит в возможности как форсирования тока, так и в быстром уменьшении потока возбуждения за счет

изменения направления протекания тока в обмотке возбуждения. Используя трансформаторный эффект, становится возможным создание потока возбуждения при нулевой скорости вала генератора.

Представлена процедура синтеза системы автоматического регулирования для системы возбуждения трехкаскадного синхронного генератора. Подробно рассмотрен расчет параметров регуляторов на основе метода разделения движений для двух режимов работы системы возбуждения, результаты имитационного моделирования демонстрируют эффективность синтезированной САР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машиностроение. Т. IV-21. Самолеты и вертолеты. Кн. 2. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов / ред.-сост. А.М. Матвеевко. – М.: Машиностроение, 2004. – 752 с.
2. Mathematical modeling of operation modes of the starter-generator / N.M. Maksimov, G.A. Savosteenko, D.H. Yu, N.V. Savosteenko // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia. – IEEE, 2021. – P. 1009–1013. – DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396286.
3. Design of power hardware-in-the-loop simulations for integrated starter-generator systems / L. Zhu, D. Jiang, R. Qu, L.M. Tolbert, Q. Li // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2019. – Vol. 5 (1). – P. 80–92. – DOI: 10.1109/TTE.2018.2881052.
4. **Díez-Maroto L., Rouco L., Fernández-Bernal F.** Modeling, sizing, and control of an excitation booster for enhancement of synchronous generators fault ride-through capability: experimental validation // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2016. – Vol. 31 (4). – P. 1304–1314. – DOI: 10.1109/TEC.2016.2575004.
5. Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 2. Элементы и системы электрооборудования – приемники электрической энергии / С.А. Грузков, В.А. Морозов, В.И. Нагайцев [и др.]. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 552 с.
6. **Грузков С.А.** Электрооборудование летательных аппаратов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
7. **Zharkov M.A., Sarakhanova R.Yu.** Analysis of current state of the starting device for aircraft gas turbine engines // Proceedings of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – IEEE, 2020. – P. 383–388. – DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216243.
8. Performance Investigation of a brushless synchronous machine with additional harmonic field windings / F. Yao, Q. An, L. Sun, T.A. Lipo // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Vol. 63 (11). – P. 6756–6766. – DOI: 10.1109/TIE.2016.2581759.
9. Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability / Z. Chen, C. Mao, D. Wang, J. Lu, Y. Zhou // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52 (4). – P. 2778–2788. – DOI: 10.1109/TIA.2016.2543685.
10. The analysis of the reactive launch of three-stage synchronous generator for aviation starter-generator device / M.A. Zharkov, S.A. Kharitonov, V.E. Sidorov, R.Y. Dubkova // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia. – IEEE, 2019. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949881.
11. **Харитонов С.А.** Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.
12. ГОСТ Р 54073–2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2018. – 35 с.
13. **Yurkevich V.D.** PIR controller design based on the time-scale separation method and internal model principle for harmonic disturbance suppression // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Vol. 57 (4). – P. 363–370. – DOI: 10.3103/S8756699021040130.
14. **Юркевич В.Д.** Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем с разнометровыми процессами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 182 с.

15. Вавилов О.А., Юркевич В.Д., Коробков Д.В. Методика синтеза резонансного регулятора на основе метода разделения движений для инвертора напряжения // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 63. – С. 4–15. – DOI: 10.17223/19988605/63/1.

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE EXCITATION UNIT OF A THREE-STAGE STARTER GENERATOR FOR THE AVIATION POWER SYSTEM

Vedernikov D.A., Vavilov O.A., Zharkov M.A., Sarakhanova R.Y.
Novosibirsk State Technical University

This article discusses the excitation system of a three-stage synchronous generator for aviation use in two distinctive modes of operation: as an electric power generator for an on-board power supply system and an electric starter for gas turbine engines of the aircraft. The article presents the calculation of the starter and generator operating modes of the excitation system. The basic design relations for the semiconductor converter circuit have been obtained and confirmed by simulation modeling in the PowerSIM environment.

The problem of synthesizing an automatic control system for the TSG excitation unit operating as part of an on-board power supply system using a method for calculating the parameters of regulators based on the motion separation method has been solved. A two-circuit control system has been created for the generator mode of operation, including PI and PID regulators with output voltage regulation of the main generating stage. To control the excitation unit in the electric starter mode of operation, a single-circuit control system for the current of the excitation winding with the addition of a resonant component has been designed. The evaluation of the efficiency of the designed control systems was carried out on the basis of simulation modeling using PowerSIM and MATLAB/Simulink application software packages for a generator feeding a three-phase AC network in accordance with the requirements of GOST R 54073-2017.

The results of mathematical modeling formed the basis for the design of an experimental sample of the power unit in a hybrid integrated design for the TSG voltage regulation system.

Keywords: synchronous generator, exciter, voltage inverter, DC step-down converter, automatic control system, PI controller, resonant controller, motion separation method.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-29-47

REFERENCES

1. Matveenko A.M., ed. *Mashinostroenie*. T. IV-21. *Samolety i vertolety*. Kn. 2. *Proektirovanie, konstruksii i sistemy samoletov i vertoletov* [Mechanical engineering. Vol. IV-21. Airplanes and helicopters. Bk. 2. Design, construction and systems of airplanes and helicopters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 752 p.
2. Maksimov N.M., Savosteenko G.A., Yu D.H., Savosteenko N.V. Mathematical modeling of operation modes of the starter-generator. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 1009–1013. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396286.
3. Zhu L., Jiang D., Qu R., Tolbert L.M., Li Q. Design of power hardware-in-the-loop simulations for integrated starter-generator systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, vol. 5 (1), pp. 80–92. DOI: 10.1109/TTE.2018.2881052.
4. Díez-Maroto L., Rouco L., Fernández-Bernal F. Modeling, sizing, and control of an excitation booster for enhancement of synchronous generators fault ride-through capability: experimental validation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, vol. 31 (4), pp. 1304–1314. DOI: 10.1109/TEC.2016.2575004.
5. Gruzkov S.A., Morozov V.A., Nagaitsev V.I., et. al. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov*. T. 2. *Elementy i sistemy elektrooborudovaniya – priemniki elektricheskoi energii* [Electrical equipment of aircraft. Vol. 2. Elements and systems of electrical equipment – receivers of electrical energy]. Moscow, MPEI Publ., 2008. 552 p.

6. Gruzkov S.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov* [Electrical equipment of aircraft]. Moscow, MPEI Publ., 2005. 568 p.
7. Zharkov M.A., Sarakhanova R.Yu. Analysis of current state of the starting device for aircraft gas turbine engines. *Proceedings of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. IEEE, 2020, pp. 383–388. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216243.
8. Yao F., An Q., Sun L., Lipo T.A. Performance investigation of a brushless synchronous machine with additional harmonic field windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63 (11), pp. 6756–6766. DOI: 10.1109/TIE.2016.2581759.
9. Chen Z., Mao C., Wang D., Lu J., Zhou Y. Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52 (4), pp. 2778–2788. DOI: 10.1109/TIA.2016.2543685.
10. Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Sidorov V.E., Dubkova R.Y. The analysis of the reactive launch of three-stage synchronous generator for aviation starter-generator device. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Ufa, Russia, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949881.
11. Kharitonov S.A. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniya elektricheskoi energii dlya avtonomnykh ob'ektov* [Electromagnetic processes in electric power generation systems for autonomous objects]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 536 p.
12. GOST R 54073–2017. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* [State Standard R 54073–2017. Electric power supply systems of airplanes and helicopters. General requirements and norms of quality of electric energys]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 35 p.
13. Yurkevich V.D. PIR controller design based on the time-scale separation method and internal model principle for harmonic disturbance suppression. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, vol. 57 (4), pp. 363–370. DOI: 10.3103/S8756699021040130.
14. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineinykh sistem s raznotemповыми процессами* [Multi-input-multi-output control systems. Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 182 p.
15. Vavilov O.A., Yurkevich V.D., Korobkov D.V. Metodika sinteza rezonansnogo regulyatora na osnove metoda razdeleniya dvizhenii dlya invertora napryazheniya [Resonant controller design by time-scale separation method for a voltage inverter]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2023, no. 63, pp. 4–15. DOI: 10.17223/19988605/63/1. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ведерников Дмитрий Александрович – родился в 2000 году, магистрант, НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, преобразователи электрической энергии. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vedernikovdmitriy2@gmail.com).

Vedernikov Dmitry Alexandrovich (b. 2000) – master student, NSTU. His research interests cover power electronics, aviation generation systems, and power converters. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vedernikovdmitriy2@gmail.com).



Вавилов Олег Андреевич – родился в 1998 году, аспирант кафедры автоматизации, младший научный сотрудник Центра технологического превосходства, НГТУ. Область научных интересов: системы автоматического управления, силовые преобразователи, инверторы напряжения, широтно-импульсная модуляция, синтез регуляторов, автоматизация. Опубликовано пять научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vavilov.oleg.rp462@gmail.com).

Vavilov Oleg Andreevich (b. 1998) – postgraduate student of the Automation Department, junior researcher, NSTU. Research interests: power electronics, automation, power engineering, intelligent control systems, control theory. Author of 5 published research papers. (Address: 20, Karl Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vavilov.oleg.rp462@gmail.com).



Жарков Максим Андреевич – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭЭ, заместитель директора Института силовой электроники НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, электропривод. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).

Zharkov Maksim Andreevich (b. 1988) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the Department of EE, Deputy Director of the Institute of Power Electronics of NSTU. His research interests include power electronics, aviation generation systems, and electric drives. More than 50 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).



Сараханова Регина Юрьевна – родилась в 1991 году, младший научный сотрудник, Институт силовой электроники, НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sarakhanova_nstu@mail.ru).

Dubkova Regina Yurievna (b. 1991) – engineer, Institute of power electronics, NSTU. Her research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, direct frequency converters. She is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sarakhanova_nstu@mail.ru).

Статья поступила 01 ноября 2023 г.

Received November 01, 2023

To Reference:

Vedernikov D.A., Vavilov O.A., Zharkov M.A., Sarakhanova R.Y. Analiz elektromagnitnykh protsessov bloka vzbuzhdeniya trekhkaskadnogo starter-generatora dlya aviatsionnoi energosistemy [Analysis of electromagnetic processes in the excitation unit of a three-stage starter generator for the aviation power system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 29–47. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-29-47.

УДК 538.911+53.086

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ВАНАДИЯ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЛИТОГРАФИИ**Н.Д. Манцуров^{1,2}, А.И. Комонов²,
С.В. Мутилин², В.Н. Кичай³, Л.В. Яковкина³**¹ *Новосибирский государственный технический университет*² *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук*³ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт неорганической химии им. А.В. Николаева
Сибирского отделения Российской академии наук*

Диоксид ванадия (VO_2) – материал, испытывающий обратимый фазовый переход полупроводник-металл первого порядка вблизи комнатной температуры, сопровождаемый структурным фазовым переходом. Фазовый переход вызывает резкие изменения электрических и оптических свойств, что перспективно для практических применений. Наноструктуры на основе VO_2 за счет малых размеров обладают значительной стойкостью к механическим деформациям, возникающим во время структурного перехода, а также демонстрируют яркие характеристики фазового перехода. Получение наноструктур VO_2 является крайне востребованной задачей. В данной работе сообщается об использовании метода сканирующей зондовой литографии для наноструктурирования поликристаллических пленок VO_2 . Настоящее исследование сосредоточено на модификации пленок VO_2 при приложении положительного смещения на образец. Проанализировано влияние величины и длительности приложенного напряжения, относительной влажности воздуха на качество формируемого нанолитографического рисунка. Определен механизм окисления. Установлено, что в результате локального анодного окисления формирующиеся оксидные структуры, состоящие из пентаоксида ванадия (V_2O_5), полностью растворяются в воде. Таким образом, сплошная поликристаллическая пленка VO_2 разделяется на отдельные наноструктуры со строго заданными размерами. Представленный способ формирования наноструктур из кристаллических пленок VO_2 перспективен для нанопотоники и наноэлектроники.

Ключевые слова: нанолитография, диоксид ванадия, химическое осаждение из газовой фазы, атомно-силовая микроскопия, сканирующая зондовая литография.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-48-61

Введение

Диоксид ванадия (VO_2) является оксидом переходного металла, в котором при температуре 68 °С наблюдается обратимый фазовый переход первого рода полупроводник-металл [1]. Помимо температурного воздействия, фазовый переход в VO_2 можно инициировать приложением значительного электрического поля, оптическим возбуждением, внесением достаточно больших механических напряжений и пр. [2–5]. При этом происходит обратимый структурный переход кристаллической решетки от моноклинной к тетрагональной. Данный переход

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 21-19-00873.

© 2024 Манцуров Н.Д., Комонов А.И., Мутилин С.В., Кичай В.Н., Яковкина Л.В.

сопровождается изменением зонной структуры вблизи уровня Ферми, в результате чего происходит переход из полупроводникового состояния в металлическое [1, 6]. Во время фазового перехода основные физические характеристики материала, такие как постоянная решетки [7], показатель преломления [8, 9] и удельное сопротивление [10], претерпевают значительные и резкие изменения. Так, например, под действием температуры происходит мартенситное превращение, сопровождаемое резким изменением электропроводности, вплоть до 10^5 раз. Из-за таких необычных свойств VO_2 рассматривается как основа для многих новых функциональных устройств, таких как резистивные переключатели, резистивные элементы памяти, тепловые переключатели, голографические носители записи, перестраиваемые отражающие зеркала, энергоэффективные окна и многое другое [11–14].

До недавнего времени в основном синтезировались и исследовались поликристаллические пленки VO_2 . Формирование структур и устройств на основе пленок VO_2 имеет ряд существенных ограничений. Например, из-за структурного фазового перехода, когда кристаллическая решетка VO_2 трансформируется из моноклинной (M) полупроводниковой в тетрагональную (R) металлическую фазу, происходит изменение постоянной решетки почти на 1 %, что приводит к появлению сильных механических напряжений на границе раздела с подложкой и последующему образованию трещин в структурах VO_2 [15]. Совсем недавно количество переключений, которое выдерживали пленки из-за возникающих механических напряжений, не превышало 10^6 раз. В связи с этим в последние годы наблюдается всплеск интереса к наноразмерным структурам VO_2 , в частности к нанокристаллам. Такие объекты имеют малую площадь контакта с подложкой и большое отношение поверхности к объему, поэтому при фазовом переходе возникающие механические напряжения оказываются ниже предела упругости в них. Это существенным образом улучшает их стабильность и долговечность при многократных переключениях. Показано, что отдельные кристаллиты VO_2 выдерживают более 10^{11} циклов переключения без существенного ухудшения своих свойств [16], что чрезвычайно важно для практических применений. Хотя наноструктуры VO_2 имеют большие перспективы для практических применений, в настоящий момент отсутствует технология формирования высококачественных упорядоченных массивов наноструктур VO_2 .

Известно два подхода формирования наноструктур – сверху-вниз и снизу-вверх [17, 18]. Первый основывается на формировании наноструктур за счет разделения объемного материала на составные части, отдельные наноструктуры [19]. Второй – за счет самосборки наноструктур из атомов или молекул благодаря соблюдению принципа минимизации энергии системы [20]. В работе [16] описан перспективный метод синтеза упорядоченного массива нанокристаллов диоксида ванадия на вершинах острых кремниевых пирамид. Однако отсутствуют методы формирования упорядоченных массивов нанокристаллов VO_2 с заранее заданной геометрией и свойствами из сплошных поликристаллических пленок VO_2 .

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет формировать прецизионные наноструктуры с помощью сканирующей зондовой литографии (СЗЛ) [21]. При этом формируемые наноструктуры обладают предельно малыми размерами, и формируются в строго заданных местах. Зондовое электрохимическое окисление является процессом анодного окисления, локализованным в водяном мениске между иглой АСМ и поверхностью образца, который образуется под действием

капиллярных сил в нормальных атмосферных условиях. Большой вклад в процесс окисления вносит электрическое поле: оно способствует диссоциации молекулы воды на анионы и катионы и отвечает за их миграцию к поверхности образца для последующего окисления. Этот поток заряженных ионов между острием АСМ-зонда и образцом связан с фарадеевским током, который экспериментально измерялся на уровне единиц пикоампер [22–24]. Сверхвысокое электрическое поле, формирующееся в процессе электрохимической реакции, составляет порядка 10^9 – 10^{10} В/м вблизи острия зонда, что позволяет за счет сильной локализации формировать объекты с латеральными размерами менее 5 нм [25]. Таким образом, с помощью СЗЛ возможно формирование упорядоченных массивов наноструктур, в том числе одиночных нанокристаллов из кристаллических пленок.

В данной работе впервые сообщается о проведении АСМ-нанолитографии тонких поликристаллических пленок диоксида ванадия, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы. Настоящее исследование сосредоточено на модификациях поверхностей пленок VO_2 при приложении положительного напряжения к исследуемым образцам. Проанализировано влияние величины и длительности приложенного напряжения, скорости перемещения АСМ-зонда, относительной влажности воздуха на качество нанолитографического рисунка. Показано, что в области контакта АСМ-зонда с поверхностью пленок VO_2 формируются выпуклые области, состоящие из пентаоксида ванадия (V_2O_5). Полученные окисленные структуры, полностью растворяясь в воде, разделяют сплошную поликристаллическую пленку VO_2 на отдельные наноструктуры с четко заданными размерами. Данный способ перспективен для создания упорядоченных массивов нанокристаллов VO_2 из поликристаллических пленок для нанофотоники и нанoeлектроники.

1. Описание эксперимента

Поликристаллические пленки VO_2 были сформированы на проводящих подложках п-кремния ($0,001 \dots 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) методом химического осаждения из газовой фазы (CVD) с использованием кремний-органического прекурсора ацетилацетоната ванадила ($\text{VO}(\text{acac})_2$) 98 % (Aldrich, США) [26]. Использовался двухзонный горизонтальный реактор при давлении 2 торр. Пары прекурсора вводились в реактор с потоком аргона. Окислителем был кислород. Температура синтеза составляла $500 \text{ }^\circ\text{C}$, длительность – один час. Характеризация полученных пленок проводилась с использованием дифракционных измерений в θ - 2θ режиме на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония). Электрические измерения пленок VO_2 при разных температурах были проведены при помощи стандартного двухконтактного метода измерений. Омические контакты были сформированы при помощи прижимных вольфрамовых игл. В качестве нагревательного элемента использовался элемент Пельтье. Исследования морфологии и СЗЛ проводились на атомно-силовом микроскопе Solver P47 Pro (NT – MDT, Россия) в контактном режиме. Контроль остроты и проводимости кантилеверов осуществлялся на калибровочных образцах. В экспериментах использовались кремниевые зонды $\text{HA_C/W}_2\text{C}$ (жесткость балок – $0,26$ и $0,65 \pm 20 \text{ \% Н/м}$) с проводящим покрытием из карбида вольфрама (TipsNano, Россия). Радиус закругления игл кантилеверов с учетом проводящего покрытия составлял не более 35 нм.

2. Результаты и обсуждение

АСМ-изображение поверхности синтезированных пленок приведено на рис. 1, *а*. Средний размер кристаллов составляет 100 нм, шероховатость пленки составляет около 80 нм. Все синтезированные пленки были исследованы методом рентгеноструктурного анализа, типичный результат показан на рис. 1, *б*. Как видно из этого рисунка, в спектре пленки, выращенной на Si-подложке, присутствуют рефлексы только М-фазы с характерными пиками (011), (200) и (022). Для определения параметров фазового перехода полупроводник-металл в пленках VO₂ были измерены температурные зависимости сопротивления в интервале от 30 до 90 °С, как показано на рис. 1, *в*. Измерения сопротивления проводились двухзондовым методом. Схема измерений приведена на врезке в рис. 1, *в*. Температура фазового перехода составляет 72 °С. Отношение сопротивлений до и после фазового перехода $R_1 / R_2 = 30$. Ширина гистерезиса оказалась равной 6 °С. Причина низкого отношения сопротивлений при температурном фазовом переходе связана с последовательным сопротивлением проводящей кремниевой подложки. Полученные результаты свидетельствуют о высоком качестве синтезированных пленок VO₂, содержащих только одну кристаллическую фазу.

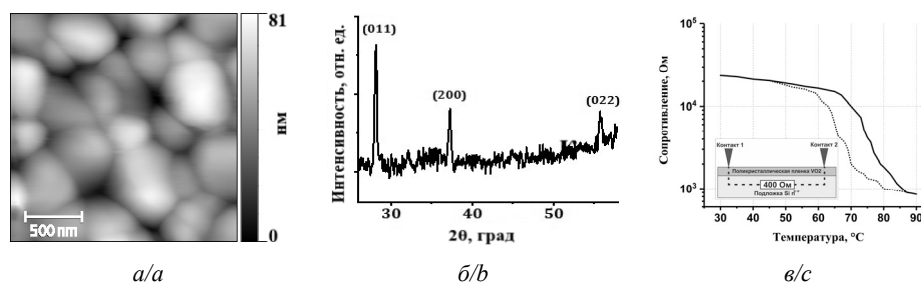


Рис. 1 – Описание исследуемых поликристаллических пленок VO₂:

a – типичное АСМ – изображение исследуемого образца; *б* – спектр рентгеновской дифракции образца; *в* – график зависимости сопротивления от температуры, демонстрирующий фазовый переход в исследуемой пленке, на вставке под графиком показана схема измерения

Fig. 1 – Characterization of the investigated polycrystalline VO₂ films:

a – Typical AFM image of the sample surface; *b* – XRD spectrum of the sample; *c* – Temperature-resistance plot indicating the phase transition in the examined film. The inset shows the measurement scheme of plot 1c

Для проведения наноструктурирования поликристаллических пленок диоксида ванадия использовалась СЗЛ. При этом между АСМ-зондом и поверхностью образца подавалась разность потенциалов. Известно, что при нормальных условиях между вершиной АСМ-зонда и поверхностью образца образуется водяной мениск [27]. В результате возникает наноэлектролитическая ячейка и происходит электрохимическое окисление, как показано на рис. 2. Молекулы воды, образующие мениск между вершиной АСМ-зонда и поверхностью пленки VO₂, под действием электрического поля диссоциируют на анионы и катионы. Кроме того, электрическое поле стимулирует их перемещение к поверхности образца, где они вступают в реакцию с атомами ванадия на поверхности пленки VO₂. Поток ионов между вершиной АСМ-зонда и образцом образует фарадеевский ток.

Происходящие окислительно-восстановительные реакции описываются следующими уравнениями:

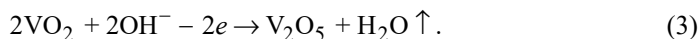
Полное уравнение:



Катод (игла):



Анод (образец):



В результате СЗЛ в местах контакта АСМ-зонда с поверхностью пленки возникают выпуклые области размером от нескольких единиц до нескольких сотен нанометров.

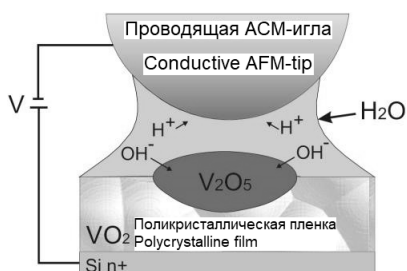


Рис. 2 – Схематичное изображение нанозлектролитической ячейки, возникающей в процессе электрохимической зондовой литографии между вершиной АСМ-иглы и поликристаллической пленкой VO₂

Fig. 2 – Schematic view of the nanoelectrolyte cell created in the process of electrochemical probe lithography taking place between the AFM tip and the polycrystalline VO₂ film

Далее будут рассмотрены основные факторы, влияющие на СЗЛ поликристаллических пленок VO₂, такие как относительная влажность воздуха, напряжение и длительность прикладываемого импульса напряжения. Ранее, в случае аморфных пленок VO_x, было установлено, что чем меньше ванадия V⁺⁵ в пленке VO_x, тем сильнее проявляется эффект окисления [28]. Поэтому ожидается, что наблюдаемый эффект локального анодного окисления будет более значительным в пленках, содержащих только VO₂. В ходе экспериментов было обнаружено, что с увеличением приложенного напряжения увеличиваются высота и поперечный размер наноструктур, образующихся в процессе окисления. Существенное влияние на процесс окисления оказывает относительная влажность воздуха. Например, на рис. 3 представлена серия вертикальных наноструктур, сформированных локальным анодным окислением в зависимости от величины приложенного напряжения.

В процессе литографии скорость перемещения зонда составляла 0,6 мкм/с, длительность импульса – 2000 мс; относительная влажность воздуха в случае рис. 3, а составляла 50 %, в случае рис. 3, б – 70 %. При относительной влажности менее 50 % окислительная реакция не наблюдалась. Пороговое напряжение для окислительной реакции при влажности 50 % составляло 5 В, а высота наноструктур – 30 нм. При увеличении напряжения наблюдается незначительное увеличение высоты. На рис. 3, в показана графическая зависимость высоты окисленной области от величины напряжения при относительной влажности воздуха 50 % и 70 %, соответственно. При относительной влажности воздуха 70 % реакция окисления протекает при более низких напряжениях, и наблюдаемый эффект многократно усиливается при одинаковых значениях напряжения.

Для исследования влияния длительности прикладываемого импульса напряжения на процесс СЗЛ была проведена серия экспериментов с изменением длительности импульса в диапазоне от 100 до 2000 мс при напряжении 10 В и отно-

сительной влажности воздуха 70 %. На рис. 4 представлена зависимость высоты образованных окисленных структур от длительности прикладываемого импульса напряжения. Полученная зависимость аппроксимируется логарифмическим законом, что соответствует модели Кабрера–Мотта [29].

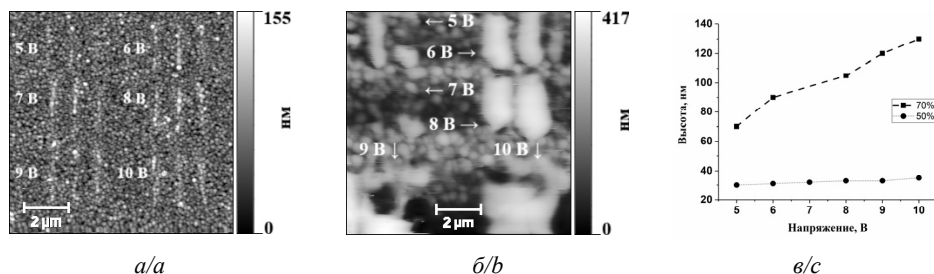


Рис. 3 – АСМ-изображения вертикальных литографических линий при напряжении от 5 до 10 В и относительной влажности воздуха:

a – 50 %; *б* – 70 %; *в* – график зависимости высоты сформированных наноструктур от напряжения при влажности 50 и 70 %

Fig. 3 – AFM images of the vertical lithographic lines at voltages ranging from 5 to 10 V and relative humidity:

a – 50 %; *b* – 70 %; *c* – plot of the height dependence of the formed nanostructures on the voltage at humidity of 50 and 70 %

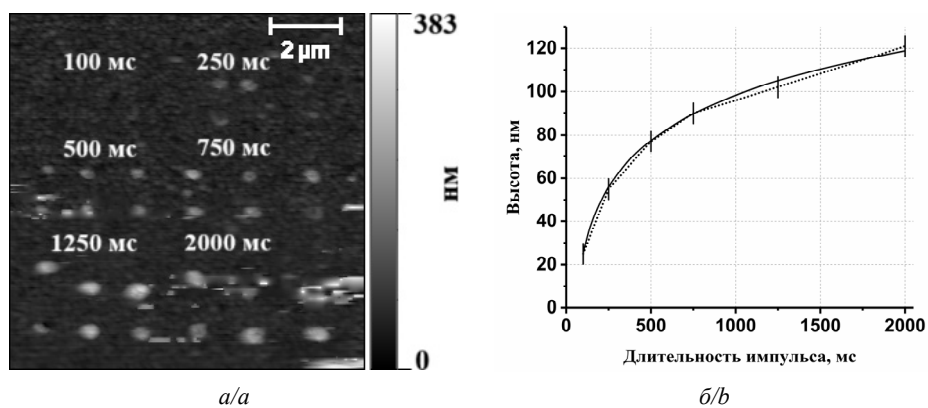


Рис. 4 – Влияние длительности импульса приложенного напряжения на размеры окисленных областей:

a – АСМ-изображение массива литографических точек при длительности импульса от 100 до 2000 мс; *б* – зависимость высоты сформированных наноструктур от длительности импульса. Сплошная кривая представляет собой логарифмическую аппроксимацию

Fig. 4 – Influence of the applied voltage pulse duration on sizes of oxidized areas:

a – AFM-image of lithographic dot array with pulse duration ranging from 100 to 2000 ms; *b* – dependence of the formed nanostructures height on the pulse duration. Full line is a logarithmic approximation

Эта модель рассматривает влияние электронного и ионного токов в процессе окисления, меньший из которых является лимитирующим. При достижении существенной толщины выращенного оксида h_c сопротивление для электронного тока становится значительным, и он больше не может компенсировать положительный диффузионный ионный ток. Впоследствии изменение толщины окисленной области h от длительности импульса описывается по логарифмическому закону:

$$h = h_c \ln\left(\frac{t}{t_0}\right), \quad (4)$$

где t_0 – минимальная длительность импульса для окисления структуры; t – действительное значение. Из данного уравнения мы можем получить кинетику роста окисленной области:

$$\frac{dh}{dt} = v_0 \exp\left(-\frac{h}{h_c}\right), \quad (5)$$

где v_0 – начальная скорость окисления, выражающаяся формулой

$$v_0 = \frac{h_c}{t_0}, \quad (6)$$

высота окисленной области h_c вычисляется по формуле

$$h_c = \hbar(8mE_a)^{-1/2}, \quad (7)$$

где E_a – энергия, необходимая для начала процесса локального анодного окисления.

Согласно модели Кабрера–Мотта были определены критическая толщина оксида ($h_c = 32$ нм), начальная скорость окисления ($v_0 = 0,64$ нм/мс) и энергия активации процесса окисления ($E_a = 0,7$ мэВ). Малое значение E_a объясняется высокой скоростью процесса окисления, обусловленной высоким значением относительной влажности (~70 %) и сильным электрическим полем вблизи вершины АСМ-зонда.

Кроме того, было показано, что при СЗЛ на поликристаллической пленке VO_2 возможно формирование наноструктур заданной формы. Для демонстрации возможностей метода был сформирован литографический рисунок, состоящий из квадратов с длиной стороны 12, 10 и 8 мкм. Внутри самого маленького квадрата располагался двумерный массив нанопроволок длиной 2 мкм. Наноструктурирование происходило при следующих параметрах СЗЛ: величина и длительность прикладываемого импульса напряжения – 10 В и 2000 мс соответственно, скорость перемещения зонда – 0,6 мкм/с, температура окружающей среды – 25 °С, относительная влажность воздуха – 70 %. Во время перемещения АСМ-зонда по поверхности образца величина и длительность прикладываемого импульса напряжения оставались неизменными. В результате проведенной зондовой нанолитографии на поверхности поликристаллической пленки VO_2 были получены три квадрата с различной длиной сторон и восемь линий длиной 2 мкм. Минимальная высота полученных структур составила 20 нм, а максимальная – 140 нм. Известно, что высшая форма оксида ванадия V_2O_5 является водорастворимой [30].

Предполагая, что при СЗЛ происходит процесс окисления, мы провели эксперимент по удалению предельного оксида с помощью воды. Для этого образец погружали в деионизированную воду на 2 мин. Наблюдаемое полное удаление образовавшихся окисленных наноструктур с поверхности поликристаллической пленки на рис. 5 подтвердило наше предположение. Образование канавок в окисленных областях после травления свидетельствует о том, что процесс окисления происходит как на поверхности, так и внутри оксидной структуры. На рис. 5, а и б приведены АСМ-изображения сформированных окисленных областей до и после травления V_2O_5 . На профилях из рис. 5, в и г видно, что высоты наноструктур, сформированных в результате проведения зондовой нанолитографии, лежат в диапазоне от 30 до 140 нм, а глубины наноканавок, сформированных в результате

травления в воде, лежат в диапазоне от 30 до 60 нм. При этом латеральные размеры наноканавок совпадают с размерами окисленных областей. Плотность V_2O_5 на 40 % меньше плотности VO_2 . Поэтому объем окисленной структуры должен был увеличиться примерно в 1,5 раза. Однако, по нашим расчетам, объем окисленной области увеличился до двух раз. Мы считаем, что избыточный объем образующегося V_2O_5 связан с пористостью формируемых структур.

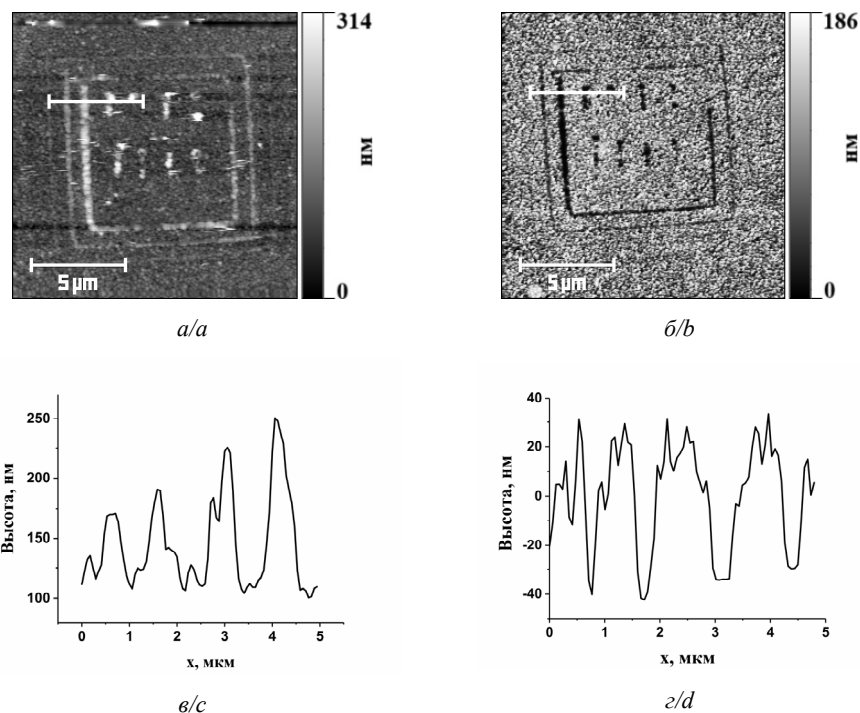


Рис. 5 – Формирование наноструктур на поликристаллической пленке VO_2 :
 а – АСМ-изображение окисленных областей, полученных методом СЗЛ; б – АСМ-изображение сформированных наноструктур после травления V_2O_5 в деионизированной воде; в, г – профили поперечных сечений, измеренные вдоль белых отрезков на рис. 5, а и б

Fig. 5 – Nanostructures formation on polycrystalline VO_2 film:

а – AFM image of oxidized regions by scanning probe lithography; б – AFM image of formed nanostructures after etching V_2O_5 in deionized water; в, г – Cross-section profiles measured along the white lines in Fig. 5, а, б

Заключение

Впервые проведена нанолитография поликристаллических пленок диоксида ванадия с помощью сканирующей зондовой литографии. В результате локальной модификации поликристаллической пленки с помощью АСМ-зонда ионы ванадия V^{+4} переходят в высшее состояние окисления V^{+5} . При этом происходит локальное увеличение объема пленки примерно в 2 раза. Процесс окисления поликристаллической пленки происходит только при относительной влажности воздуха более 50 %. Геометрические размеры формируемых литографических рисунков возрастают с ростом относительной влажности воздуха, а также величины и длительности прикладываемого напряжения. Процесс локального анодного окисле-

ния с хорошей точностью описывается моделью Кабрера–Мотта. Латеральные размеры формируемых структур сильно зависят от локализации поля и, следовательно, от формы и радиуса кривизны АСМ-зонда. Формируемые окисленные структуры V_2O_5 полностью растворяются в воде и разделяют сплошную поликристаллическую пленку VO_2 на отдельные наноструктуры со строго заданными размерами. Данный способ эффективен для формирования наноструктур и упорядоченных массивов нанокристаллов из кристаллических пленок VO_2 . Описанный метод перспективен для формирования базовых элементов нанопотоники и наноэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Morin F.J.** Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature // *Physical Review Letters*. – 1959. – Vol. 3. – P. 34–36. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.3.34.
2. **Stefanovich G., Pergament A., Stefanovich D.** Electrical switching and Mott transition in VO_2 // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2000. – Vol. 12. – P. 8837–8845. – DOI: 10.1088/0953-8984/12/41/310.
3. Femtosecond laser excitation of the semiconductor-metal phase transition in VO_2 / M.F. Becker, A.B. Buckman, R.M. Walser, T. Lépine, P. Georges, A. Brun // *Applied Physics Letter*. – 1994. – Vol. 65. – P. 1507–1509. – DOI: 10.1063/1.112974.
4. Measurement of a solid-state triple point at the metal–insulator transition in VO_2 / J.H. Park, J.M. Coy, T.S. Kasirga, C. Huang, Z. Fei, S. Hunter, D.H. Cobden // *Nature*. – 2013. – Vol. 500. – P. 431–434. – DOI: 10.1038/nature12425.
5. Effect of lattice misfit on the transition temperature of VO_2 thin film / H. Koo, S. Yoon, O.J. Kwon, K.E. Ko, D. Shin, S.H. Bae, S.H. Chang, C. Park // *Journal of Materials Science*. – 2012. – Vol. 47. – P. 6397–6401. – DOI: 10.1007/s10853-012-6565-1.
6. Control of the metal–insulator transition in vanadium dioxide by modifying orbital occupancy / N.B. Aetukuri, A.X. Gray, M. Drouard, M. Cossale, L. Gao, A.H. Reid, R. Kukreja, H. Ohldag, C.A. Jenkins, E. Arenholz, K.P. Roche, H.A. Dürr, M.G. Samant, S.S.P. Parkin // *Nature Physics*. – 2013. – Vol. 9. – P. 661–666. – DOI: 10.1038/nphys2733.
7. **Kittiwatanakul S., Wolf S.A., Lu J.** Large epitaxial bi-axial strain induces a Mott-like phase transition in VO_2 // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 105. – P. 073112. – DOI: 10.1063/1.4893326.
8. Thermally tunable optical constants of vanadium dioxide thin films measured by spectroscopic ellipsometry / J.B. Kana Kana, J.M. Ndjaka, G. Vignaud, A. Gibaud, M. Maaza // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 28. – P. 807–812. – DOI: 10.1016/j.optcom.2010.10.009.
9. **Sun J., Pribil G.K.** Analyzing optical properties of thin vanadium oxide films through semiconductor-to-metal phase transition using spectroscopic ellipsometry // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 421. – P. 819–823. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.09.125.
10. **Schlag H.J., Scherber W.** New sputter process for VO_2 thin films and examination with MIS-elements and C–V-measurements // *Thin Solid Films*. – 2000. – Vol. 366. – P. 28–31. – DOI: 10.1016/S0040-6090(00)00711-2.
11. **Yang Z., Ko C., Ramanathan S.** Oxide electronics utilizing ultrafast metal-insulator transitions // *Annual Review of Materials Research*. – 2011. – Vol. 41. – P. 337–367. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-062910-100347.
12. Infrared-sensitive electrochromic device based on VO_2 / M. Nakano, K. Shibuya, N. Ogawa, T. Hatano, M. Kawasaki, Y. Iwasa, Y. Tokura // *Applied Physics Letters*. – 2013. – Vol. 103. – P. 153503. – DOI: 10.1063/1.4824621.
13. Vanadium dioxide as a natural disordered metamaterial: perfect thermal emission and large broadband negative differential thermal emittance / M.A. Kats, R. Blanchard, S. Zhang, P. Genevet, C. Ko, S. Ramanathan, F. Capasso // *Physical Review X*. – 2013. – Vol. 3. – P. 041004. – DOI: 10.1103/PhysRevX.3.041004.

14. On-chip photonic memory elements employing phase-change materials / C. Rios, P. Hosseini, C.D. Wright, H. Bhaskaran, W.H.P. Pernice // *Advanced Materials*. – 2013. – Vol. 26. – P. 1372–1377. – DOI: 10.1002/adma.201304476.
15. CMOS and beyond: logic switches for terascale integrated circuits / ed. by T.-J.K. Liu, K. Kuhn. – Cambridge: Cambridge University Press, 2015. – 420 p. – DOI: 10.1017/CBO9781107337886.
16. A new approach to the fabrication of VO₂ nanoswitches with ultra-low energy consumption / V.Y. Prinz, S.V. Mutilin, L.V. Yakovkina, A.K. Gutakovskii, A.I. Komonov // *Nanoscale*. – 2020. – Vol. 12. – P. 3443–3454. – DOI: 10.1039/C9NR08712E.
17. New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques / B.D. Gates, Q. Xu, M. Stewart, D. Ryan, C.G. Willson, G.M. Whitesides // *Chemical Reviews*. – 2005. – Vol. 105. – P. 1171–1196. – DOI: 10.1021/cr030076o.
18. Advances in top-down and bottom-up surface nanofabrication: techniques, applications & future prospects / A. Biswas, I.S. Bayer, A.S. Biris, T. Wang, E. Dervishi, F. Faupel // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2012. – Vol. 170. – P. 2–27. – DOI: 10.1016/j.cis.2011.11.001.
19. **Chen Y.** Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: a review // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – Vol. 135. – P. 57–72. – DOI: 10.1016/j.mee.2015.02.042.
20. **Zinkle S.J., Busby J.T.** Structural materials for fission & fusion energy // *Materials Today*. – 2009. – Vol. 12. – P. 12–19. – DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70294-9.
21. Scanning probe lithography: state-of-the-art and future perspectives / P. Fan, J. Gao, H. Mao, Y. Geng, Y. Yan, Y. Wang, X. Luo // *Micromachines*. – 2022. – Vol. 13. – P. 228. – DOI: 10.3390/mi13020228.
22. Faradaic current detection during anodic oxidation of the H passivated p-Si (001) surface with controlled relative humidity / H. Kuramochi, F. Pérez-Murano, J.A. Dagata, H. Yokoyama // *Nanotechnology*. – 2003. – Vol. 15. – P. 297. – DOI: 10.1088/0957-4484/15/3/012.
23. 23 In situ detection of faradaic current in probe oxidation using a dynamic force microscope / H. Kuramochi, K. Ando, T. Tokizaki, H. Yokoyama // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 84. – P. 4005–4007. – DOI: 10.1063/1.1748842.
24. Measurement of faradaic current during AFM local oxidation of magnetic metal thin films / Y. Takemura, Y. Shimada, G. Watanabe, T. Yamada, J.I. Shirakashi // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2007. – Vol. 61. – P. 1147. – DOI: 10.1088/1742-6596/61/1/227.
25. **Martinez J., Martinez R.V., Garcia R.** Silicon nanowire transistors with a channel width of 4 nm fabricated by atomic force microscope nanolithography // *Nano Letters*. – 2008. – Vol. 8. – P. 3636–3639. – DOI: 10.1021/nl801599k.
26. MOCVD growth and characterization of vanadium dioxide films / L.V. Yakovkina, S.V. Mutilin, V.Y. Prinz, T.P. Smirnova, V.R. Shayapov, I.V. Korol'kov, N.D. Volchok // *Journal of Materials Science*. – 2017. – Vol. 52. – P. 4061–4069. – DOI: 10.1007/s10853-016-0669-y.
27. **Garcia R., Knoll A.W., Riedo E.** Advanced scanning probe lithography // *Nature Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 9. – P. 577–587. – DOI: 10.1038/nnano.2014.157.
28. Nanolithography of amorphous vanadium oxide films using an atomic force microscope / A.I. Komonov, N.D. Mantsurov, S.V. Mutilin, B.V. Voloshin, V.A. Seleznev // *Proceedings of IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. – IEEE, 2022. – P. 20–24. – DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855164.
29. **Cabrera N., Mott N.F.** Theory of the oxidation of metals // *Reports on Progress in Physics*. – 1949. – Vol. 12. – P. 163. – DOI: 10.1088/0034-4885/12/1/308.
30. **Trypuć M., Kielkowska U., Chalát M.** Solubility investigations in the NaCl + V₂O₅ + H₂O system from 293 K to 323 K // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2002. – Vol. 4. – P. 765–767. – DOI: 10.1021/je010212r.

**FORMATION OF NANOSTRUCTURES FROM VANADIUM DIOXIDE
POLYCRYSTALLINE FILMS USING AN ATOMIC FORCE MICROSCOPE****Mantsurov^{1,2} N.D., Komonov² A. I., Mutilin² S.V.,
Kichay³ V.N., Yakovkina³ L.V.**¹*Novosibirsk State Technical University*²*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS*³*Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS*

Vanadium dioxide (VO₂) undergoes a reversible first-order metal-insulator phase transition near room temperature, accompanied by a structural phase transition. This causes a significant change in its electrical and optical properties, making it useful for practical applications. VO₂-based nanostructures exhibit notable mechanical resistance to structural transition caused by their small size and demonstrate vivid properties during the phase transition. Obtaining VO₂ nanostructures is an extremely demanded objective. This research study presents the use of scanning probe lithography techniques to fabricate nanostructures on polycrystalline VO₂ films. The present study focuses on the modification of VO₂ films when a positive bias is applied to the sample. The effect of the value and duration of the applied voltage, relative humidity on the quality of the formed nanolithographic pattern was analyzed. The oxidation mechanism was determined. It was found that as a result of local anodic oxidation the formed oxide structures consisting of vanadium penta-oxide (V₂O₅) completely dissolve in water. This process leads to the separation of the continuous polycrystalline VO₂ film into individual nanostructures with precise dimensions. The presented method of forming nanostructures from crystalline VO₂ films is promising for nanophotonics and nanoelectronics.

Keywords: vanadium dioxide, atomic force microscopy, nanolithography, chemical vapor deposition, scanning probe lithography.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-48-61

REFERENCES

1. Morin F.J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. *Physical Review Letters*, 1959, vol. 3, pp. 34–36. DOI: 10.1103/PhysRevLett.3.34.
2. Stefanovich G., Pergament A., Stefanovich D. Electrical switching and Mott transition in VO₂. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2000, vol. 12, pp. 8837–8845. DOI: 10.1088/0953-8984/12/41/310.
3. Becker M.F., Buckman A.B., Walser R.M., Lépine T., Georges P., Brun A. Femtosecond laser excitation of the semiconductor-metal phase transition in VO₂. *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 65, pp. 1507–1509. DOI: 10.1063/1.112974.
4. Park J.H., Coy J.M., Kasirga T.S., Huang C., Fei Z., Hunter S., Cobden D.H. Measurement of a solid-state triple point at the metal–insulator transition in VO₂. *Nature*, 2013, vol. 500, pp. 431–434. DOI: 10.1038/nature12425.
5. Koo H., Yoon S., Kwon O.J., Ko K.E., Shin D., Bae S.H., Chang S.H., Park C. Effect of lattice misfit on the transition temperature of VO₂ thin film. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, pp. 6397–6401. DOI: 10.1007/s10853-012-6565-1.
6. Aetukuri N.B., Gray A.X., Drouard M., Cossale M., Gao L., Reid A.H., Kukreja R., Ohldag H., Jenkins C.A., Arenholz E., Roche K.P., Dürr H.A., Samant M.G., Parkin S.S.P. Control of the metal–insulator transition in vanadium dioxide by modifying orbital occupancy. *Nature Physics*, 2013, vol. 9, pp. 661–666. DOI: 10.1038/nphys2733.
7. Kittiwatanakul S., Wolf S.A., Lu J. Large epitaxial bi-axial strain induces a Mott-like phase transition in VO₂. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, p. 073112. DOI: 10.1063/1.4893326.
8. Kana Kana J.B., Ndjaka J.M., Vignaud G., Gibaud A., Maaza M. Thermally tunable optical constants of vanadium dioxide thin films measured by spectroscopic ellipsometry. *Optics Communications*, 2011, vol. 284, pp. 807–812. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.10.009.

9. Sun J., Pribil G.K. Analyzing optical properties of thin vanadium oxide films through semiconductor-to-metal phase transition using spectroscopic ellipsometry. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 421, pp. 819–823. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.09.125.
10. Schlag H.J., Scherber W. New sputter process for VO₂ thin films and examination with MIS-elements and C–V-measurements. *Thin Solid Films*, 2000, vol. 366, pp. 28–31. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)00711-2.
11. Yang Z., Ko C., Ramanathan S. Oxide electronics utilizing ultrafast metal-insulator transitions. *Annual Review of Materials Research*, 2011, vol. 41, pp. 337–367. DOI: 10.1146/annurev-matsci-062910-100347.
12. Nakano M., Shibuya K., Ogawa N., Hatano T., Kawasaki M., Iwasa Y., Tokura Y. Infrared-sensitive electrochromic device based on VO₂. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, p. 153503. DOI: 10.1063/1.4824621.
13. Kats M.A., Blanchard R., Zhang S., Genevet P., Ko C., Ramanathan S., Capasso F. Vanadium dioxide as a natural disordered metamaterial: perfect thermal emission and large broadband negative differential thermal emittance. *Physical Review X*, 2013, vol. 3, p. 041004. DOI: 10.1103/PhysRevX.3.041004.
14. Rios C., Hosseini P., Wright C.D., Bhaskaran H., Pernice W.H.P. On-chip photonic memory elements employing phase-change materials. *Advanced Materials*, 2013, vol. 26, pp. 1372–1377. DOI: 10.1002/adma.201304476.
15. Liu T. J. K., Kuhn K., eds. *CMOS and beyond: logic switches for terascale integrated circuits*. Cambridge University Press, 2015. 420 p. DOI: 10.1017/CBO9781107337886.
16. Prinz V.Y., Mutilin S.V., Yakovkina L.V., Gutakovskii A.K., Komonov A.I. A new approach to the fabrication of VO₂ nanoswitches with ultra-low energy consumption. *Nanoscale*, 2020, vol. 12, pp. 3443–3454. DOI: 10.1039/C9NR08712E.
17. Gates B.D., Xu Q., Stewart M., Ryan D., Willson C.G., Whitesides G.M. New approaches to nanofabrication: molding, printing, and other techniques. *Chemical Reviews*, 2005, vol. 105, pp. 1171–1196. DOI: 10.1021/cr030076o.
18. Biswas A., Bayer I.S., Biris A.S., Wang T., Dervishi E., Faupel F. Advances in top–down and bottom–up surface nanofabrication: techniques, applications & future prospects. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2012, vol. 170, pp. 2–27. DOI: 10.1016/j.cis.2011.11.001.
19. Chen Y. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: a review. *Micro-electronic Engineering*, 2015, vol. 135, pp. 57–72. DOI: 10.1016/j.mee.2015.02.042.
20. Zinkle S.J., Busby J.T. Structural materials for fission & fusion energy. *Materials Today*, 2009, vol. 12, pp. 12–19. DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70294-9.
21. Fan P., Gao J., Mao H., Geng Y., Yan Y., Wang Y., Luo X. Scanning probe lithography: State-of-the-art and future perspectives. *Micromachines*, 2022, vol. 13, p. 228. DOI: 10.3390/mi13020228.
22. Kuramochi H., Pérez-Murano F., Dagata J.A., Yokoyama H. Faradaic current detection during anodic oxidation of the H passivated p-Si (001) surface with controlled relative humidity. *Nanotechnology*, 2003, vol. 15, p. 297. DOI: 10.1088/0957-4484/15/3/012.
23. Kuramochi H., Ando K., Tokizaki T., Yokoyama H. In situ detection of faradaic current in probe oxidation using a dynamic force microscope. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 84, pp. 4005–4007. DOI: 10.1063/1.1748842.
24. Takemura Y., Shimada Y., Watanabe G., Yamada T., Shirakashi J.I. Measurement of faradaic current during AFM local oxidation of magnetic metal thin films. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, vol. 61, p. 1147. DOI: 10.1088/1742-6596/61/1/227.
25. Martinez J., Martinez R.V., Garcia R. Silicon nanowire transistors with a channel width of 4 nm fabricated by atomic force microscope nanolithography. *Nano Letters*, 2008, vol. 8, pp. 3636–3639. DOI: 10.1021/nl801599k.
26. Yakovkina L.V., Mutilin S.V., Prinz V.Y., Smirnova T.P., Shayapov V.R., Korol'kov I.V., Volchok N.D. MOCVD growth and characterization of vanadium dioxide films. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 4061–4069. DOI: 10.1007/s10853-016-0669-y.
27. Garcia R., Knoll A.W., Riedo E. Advanced scanning probe lithography. *Nature Nanotechnology*, 2014, vol. 9, pp. 577–587. DOI: 10.1038/nnano.2014.157.
28. Komonov A.I., Mantsurov N.D., Mutilin S.V., Voloshin B.V., Seleznev V.A. Nanolithography of amorphous vanadium oxide films using an atomic force microscope. *Proceedings of*

- IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. IEEE, 2022, pp. 20–24. DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855164.
29. Cabrera N., Mott N.F. Theory of the oxidation of metals. *Reports on Progress in Physics*, 1949, vol. 12, p. 163. DOI: 10.1088/0034-4885/12/1/308.
30. Trypuć M., Kielkowska U., Chałat M. Solubility investigations in the NaCl + V₂O₅ + H₂O system from 293 K to 323 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2002, vol. 4, pp. 765–767. DOI: 10.1021/jc010212r.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Манцуров Никита Дмитриевич – родился в 2000 году, магистрант второго года обучения НГТУ. Инженер в лаборатории физики и технологии трехмерных наноструктур ИФП СО РАН. Область научных интересов: атомно-силовая микроскопия, оксиды ванадия, наноструктуры, сканирующая зондовая литография. Опубликовано две научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: zimos.sr@gmail.com).

Mantsurov Nikita Dmitriyevich (b. 2000) – 2nd year master's student at NSTU, engineer at the Laboratory of Physics and Technology of Three-Dimensional Nanostructures at the Institute of Semiconductor Physics SB RAS. His research interests cover atomic-force microscopy, vanadium oxides, nanostructures, and scanning probe lithography. He has published 2 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: zimos.sr@gmail.com).



Комонов Александр Иванович – родился в 1985 году. Окончил факультет радиотехники и электроники НГТУ в 2010 году. Инженер в лаборатории физики и технологии трехмерных наноструктур ИФП СО РАН. Область научных интересов: атомно-силовая микроскопия, сканирующая зондовая литография, графен, графеноподобные материалы, тонкие пленки, вертикальные ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, оксиды ванадия, наноструктуры VO₂. Опубликовано 22 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13. E-mail: komonov@isp.nsc.ru).

Komonov Aleksandr Ivanovich (b. 1985) Graduated from the Faculty of Radio Engineering and Electronics of NSTU in 2010, PhD (Phys. & Math.), engineer at the Laboratory of Physics and Technology of Three-Dimensional Nanostructures at the Institute of Semiconductor Physics, SB RAS. His research interests include atomic force microscopy, scanning probe lithography, graphene, graphene-like materials, thin films, vertical van der Waals heterostructures, vanadium oxides, and VO₂ nanostructures. He has published 22 scientific papers. (Address: 13, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: komonov@isp.nsc.ru).



Мутилин Сергей Владимирович – родился в 1986 году. Окончил физический факультет НГУ в 2009 году. Канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории физики и технологии трехмерных наноструктур ИФП СО РАН. Область научных интересов: нейроморфные системы, материалы с фазовым переходом, электрические и оптические модуляторы, нанокристаллы VO₂. Опубликовано 26 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13. E-mail: mutilin@isp.nsc.ru).

Mutilin Sergey Vladimirovich (b. 1986) Graduated from the Faculty of Physics of NSU in 2009. Candidate of Sciences (Phys. & Math.), researcher at the Laboratory of Physics and Technology of Three-Dimensional Nanostructures at the Institute of Semiconductor Physics SB RAS. His research interests include neuromorphic systems, phase change materials, electrical and optical modulators, and VO₂ nanocrystals. He has published 26 scientific papers. (Address: 630090, 13, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: komonov@isp.nsc.ru).

Кичай Вадим Николаевич – родился в 1966 году. Ведущий инженер в лаборатории функциональных пленок и покрытий ИНХ СО РАН. Область научных интересов: химическое осаждение из газовой фазы, наноструктуры VO₂. Опубликовано 30 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 3. E-mail: kichay@niic.nsc.ru).

Kichay Vadim Nikolaevich (b. 1966), leading engineer at the Laboratory of Functional Films and Coatings at the Institute of Inorganic Chemistry SB RAS. His research interests include CVD and VO₂ nanostructures. He has published 30 scientific papers. (Address: 13, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kichay@niic.nsc.ru).



Яковкина Любовь Владимировна – родилась в 1950 году, Окончила факультет естественных наук НГУ в 1974 году. Канд. хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональных пленок и покрытий ИНХ СО РАН. Область научных интересов: химическое осаждение из газовой фазы, наноструктуры VO₂. Опубликовано 80 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 3. E-mail: yakovk@niic.nsc.ru).

Yakovkina Lyubov Vladimirovna (b. 1950) Graduated from the Faculty of Natural Sciences of NSU in 1974. Candidate of Sciences (Chem.), senior researcher at the Laboratory of Functional Films and Coatings at the Institute of Inorganic Chemistry SB RAS. Her research interests include CVD and VO₂ nanostructures. She has published 80 scientific papers. (Address: 13, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: yakovk@niic.nsc.ru).

*Статья поступила 17 февраля 2024 г.
Received February 17, 2024*

To Reference:

Mantsurov N.D., Komonov A.I., Mutilin S.V., Kichay V.N., Yakovkina L.V. Formirovanie nanostruktur iz polikristallicheskih plenok dioksida vanadiya s pomoshch'yu skaniruyushchei zondovoi litografii [Formation of nanostructures from vanadium dioxide polycrystalline films using an atomic force microscope]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 48–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-48-61.

УДК 536.42:539.25:538.331

**МОДИФИКАЦИЯ ДИФфуЗИОННЫХ БОР-
И АЛЮМИНИЙСОДЕРЖАЩИХ СЛОЕВ
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ****Н.С. Улаханов¹, П.В. Москвин^{2,1}, У.Л. Мишигдоржийн¹,
А.П. Семенов¹, Н.Н. Коваль², М.С. Воробьев²**¹*Институт физического материаловедения СО РАН*²*Институт сильноточной электроники СО РАН*

В статье представлены результаты электронно-пучковой обработки диффузионных слоев на основе бора и алюминия на примере стали 20, на базе модернизированного источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Введенный контур обратной связи по ионному току в ускоряющем промежутке плазменного источника электронов позволяет повысить управляемость генерации пучка и электрическую прочность ускоряющего промежутка и тем самым обеспечить обработку поверхности образцов стали до заданной температуры. Для обеспечения стабильности процесса электронно-пучковой обработки предлагается предварительный прогрев поверхности до температуры 400–700 °С импульсами воздействия с контролируемым током разряда. На основном этапе электронно-пучковой обработки температура поверхности диффузионных слоев составляет ~1900 °С. Для обеспечения данного диапазона температуры ток разряда регулируется в пределах 20–150 А в течение импульса длительностью 950 мкс, количество импульсов – три (интервал между импульсами 3 с). Обработка электронным пучком при данных режимах приводит к структурной трансформации диффузионного слоя на глубину более 150 мкм и к существенному повышению значений микротвердости. Отработанный режим электронно-пучковой обработки может быть рекомендован как дополнительный метод в технологиях комбинированной модификации диффузионных слоев на основе бора и алюминия.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, бороалитирование, импульсная электронно-пучковая обработка, микротвердость, источник электронов, плазменный катод, регулировка мощности электронного пучка.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-62-75

Введение

Развитие технологий, направленных на повышение эксплуатационных свойств поверхности деталей машин и инструмента, предпочтительно в комбинировании различных подходов модификации поверхности методами термической, химико-термической, электрохимической и электронно-пучковой обработки, ультразвукового деформирования, плазменного и лазерного воздействия.

Повышенный интерес представляет обработка импульсным электронным пучком поверхности стали, модифицированной диффузионными слоями, с применением источника электронов с сеточным плазменным катодом на основе дуги низкого давления, обеспечивающим управление плотностью мощности импульсного пучка электронов диаметром ~30 мм в диапазоне от десятков до сотен кВт/см² непосредственно в течение импульса миллисекундной и субмиллисекундной длительности. Плазменные источники электронов обладают малой инерционностью

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

© 2024 Улаханов Н.С., Москвин П.В., Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П.,
Коваль Н.Н., Воробьев М.С.

и устойчиво работают в условиях газовой выделенности и испарения с обрабатываемой поверхности.

Уникальное оборудование на основе плазменных источников электронов разработано в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), в лаборатории плазменной эмиссионной электроники [1–4]. Перспективность применения таких источников неоднократно продемонстрирована для модификации поверхности, в частности титановых сплавов [5–8] и инструментальных сталей [9–13], свойства которых в ряде случаев улучшаются кратно, подтверждая перспективность развития технологии электронно-пучковой обработки.

Цель данной работы – отработка режимов электронно-пучковой обработки диффузионных слоев на основе бора и алюминия на примере стали 20.

1. Методика эксперимента

Электронно-пучковую обработку (ЭПО) проводили на образцах из стали 20 после химико-термической обработки (ХТО), проведенной в насыщающей пасте следующего состава: 80 % В₄С + 16 % Al + 4 % NaF (вес) [14] при температуре 1050 °С в течение двух часов. В работе [14] описаны свойства диффузионных слоев, получаемых на поверхности углеродистых и штамповых сталей. Несмотря на преимущества диффузионных слоев на основе бора и алюминия, полученных ХТО, данный тип покрытий имеет ряд серьезных недостатков, таких как высокая хрупкость, недостаточное качество морфологии поверхности, зачастую нуждающееся в последующей механической обработке, малая толщина модифицированного слоя. В связи с чем прогнозируется перспективность комбинирования диффузионного бороалитирования с последующим высокоэнергетическим воздействием на диффузионный слой ускоренным пучком электронов.

Электронно-пучковую обработку диффузионного слоя проводили в экспериментальной установке «СОЛЮ» (рис. 1, а) на базе источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [15]. Особенностью плазменных источников электронов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы является возможность независимо и в широких пределах изменять ток пучка, его длительность и энергию электронов. Ток пучка определяется током разряда плазменного катода и вторичными процессами на эмиттерном электроде [16]. В нашем случае около половины тока разряда I_d извлекается через ячейки сетки в укоряющий промежуток, где в зазоре между катодной 1 и анодной 5 электроны приобретают энергию, соответствующую ускоряющему напряжению U_g (рис. 1, б).

Эмиссионная сетка 2 и периферийная часть эмиттерного электрода 3 источника подвержены бомбардировке ускоренными ионами, поступающими с границы анодной плазмы. Коэффициент вторичной эмиссии в течение импульса тока пучка не изменяется. Концентрация анодной плазмы и как следствие, величина ионного тока и тока вторичных электронов не постоянны. Изменения в основном вызваны десорбцией газа, испарением насыщающего состава с поверхности металлического образца в результате термического воздействия пучка электронов. Таким образом, доля вторичных электронов в токе пучка находилась в зависимости от плотности мощности пучка, времени воздействия и состояния обрабатываемой поверхности. Установка «СОЛЮ» входит в комплекс уникальных электрофизических установок России «УНИКУМ» [17] и дооснащена специализированным блоком питания, который позволяет изменять ток разряда плазменного катода в течение импульса субмилли- и миллисекундной длительности [18,19].

Изменяя ток разряда, регулировали плотность мощности термического воздействия при ЭПО. Дуговой разряд позволяет изменять ток малоинерционно, ско-

рость его изменения была ограничена системами электропитания на уровне ~ 20 А/мкс (фронт импульса) и ~ 100 А/мкс (срез импульса). Однако ионизованные пары материала образцов распространялись к эмиттерному электроду со скоростью до $(10^5\text{--}10^6)$ см/с и затрудняли управление током пучка. Тем не менее в таких условиях удалось подобрать форму тока разряда $I_d(t)$, при которой ток в ускоряющем промежутке $I_g(t)$ в разные моменты будет содержать разное количество ионного тока и тока вторичных электронов, но при этом сгенерируется необходимая для поддержания постоянной температуры поверхности образца плотность мощности.

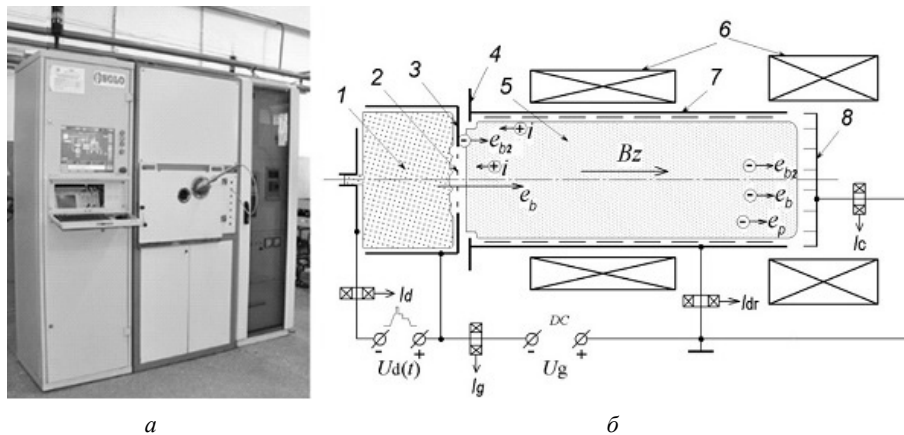


Рис. 1 – Установка «СОЛО» [17]; а – внешний вид; б – схема источника электронов:

1 – катодная плазма; 2 – стабилизирующая сетка; 3 – эмиттерный электрод; 4 – ускоряющий электрод; 5 – анодная плазма; 6 – соленоиды; 7 – труба дрейфа; 8 – калориметр

Fig. 1 – SOLO installation [17]; a is its appearance; b is a diagram of the electron source:

1 – is cathode plasma; 2 – is a stabilizing grid; 3 – is an emitter electrode; 4 – is an accelerating electrode; 5 – is anode plasma; 6 – is solenoids; 7 – is a drift pipe; 8 – is a calorimeter

Исследования по управлению температурой поверхности металлического образца после ХТО при ее облучении модулированным электронным пучком выполняли в среде аргона при давлении в вакуумной камере 25 мПа в ведущем магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 25 кэВ, диаметр пучка электронов составлял ~ 3 см.

Температуру поверхности образцов при ЭПО измеряли яркостным инфракрасным пирометром Kleiber KGA 740-LO с временем отклика 6 мкс. Коэффициент излучения поверхности определяли на контрольном образце до и после облучения. Для этого теплоизолированный образец объемно нагревали пучком электронов до температуры 500–600 °С, сравнивали показания пирометра и термпары К типа. Коэффициент излучения ϵ составил $\sim 0,7$.

Для измерения распределения плотности энергии электронного пучка по сечению у поверхности образца использовался секционированный калориметр (рис. 2), состоящий из девяти линейно расположенных датчиков, соединенных с терморезисторами и системой автоматического считывания их показаний непосредственно после импульса электронного воздействия.

Управляемое изменение температуры и повторяемость результата обеспечили тремя подходами.

1. Десорбция газа с поверхности образца перед ЭПО. На этом этапе электронно-пучковой обработки воздействие на образец оказывал пучок с «щающимися»

параметрами ($T \approx 700$ °С), не приводящими к модификации материала и существенному (рис. 3), нагреву поверхности в течение 10–15 импульсов. Затем перед основным этапом ЭПО происходило остывание образцов в среде аргона. Такой подход позволил уменьшить газовыделение с поверхности при первом «рабочем» импульсе и контролировать начальную температуру образцов. Осциллограмма предварительного прогрева образцов представлена на рис. 3.

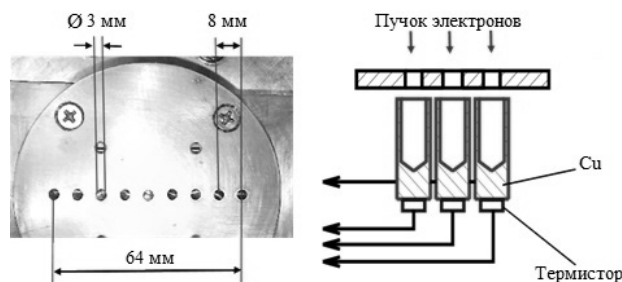


Рис. 2 – Калориметр

Fig. 2 – Calorimeter

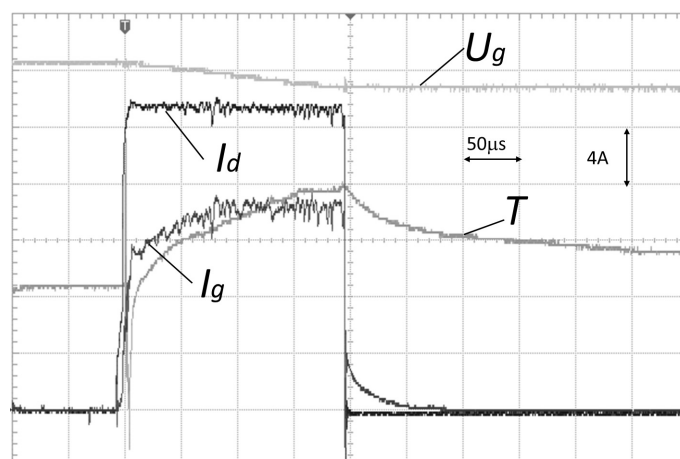


Рис. 3 – Осциллограмма предварительного прогрева образцов:

1 – I_d , 4 А/деление; 2 – I_g , 4 А/деление; 3 – T [°С] = $300 + 100 \times N_{\text{кв}}$;
масштаб U_g – 1 кВ/деление, развертка – 50 мкс/деление

Fig. 3 – Oscillogram of sample preheating:

1 – is I_d , 4 A/division; 2 – is I_g , 4 A/division; 3 – is T [°С] = $300 + 100 \times N_{\text{cells}}$;
 U_g scale is 1 kV/division, sweep is 50 μ s/division

2. Искусственно увеличили фронт температуры в ходе основного этапа ЭПО до 200 мкс. Такой подход позволил уменьшить вероятность электрического пробоя ускоряющего промежутка.

3. Необходимую зависимость тока разряда от времени для поддержания температуры в заданных пределах подбирали заранее на тестовом образце. Требуется упреждающее уменьшение плотности мощности пучка для предотвращения переупреждения на 250-й микросекунде импульса. Хорошая повторяемость режимов воздействия от импульса к импульсу после предварительного нагрева позволила применять подобранный режим для обработки однотипных образцов без каких-либо изменений.

Ток разряда изменяли в течение импульса длительностью 1 мс, в пределах 40–90 А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 200 мкс после начала воздействия удерживалась около 1700–1900 °С. Данная температура выбрана экспериментальным путем из диапазона 1300–2200 °С, при которой облучаемая поверхность диффузионного слоя подвергается переплаву без дефектов (кратерообразование, высокая шероховатость и др.). Исследуемую область образцов подвергали трем финишным импульсам воздействия (общее число импульсов – 12), интервал времени между импульсами составлял 3 с. Осциллограмма обработки образцов представлена на рис. 4.

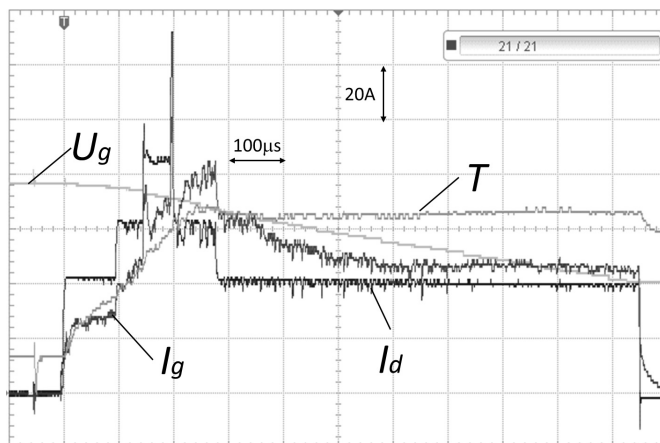


Рис. 4 – Осциллограмма обработки образцов:
 I_d , 20 А/деление, I_g , 20 А/деление, T [°С] = $333 + 410 \times N_{\text{кв}}$; масштаб U_g – 5 кВ/деление, развертка – 100 мкс/деление

Fig. 4 – Sample processing oscillogram:
 I_d , 20 A/division, I_g , 20 A/division, T [°С] = $333 + 410 \times N_{\text{cells}}$, U_g scale is 5 kV/division, sweep is 100 µs/division

После завершения импульса тока разряда в течение 100–200 мкс может наблюдаться спадающий ток в ускоряющем промежутке, обусловленный эмиссией ионов из распадающейся анодной плазмы и соответствующим током вторичных электронов. Остывание поверхности от 1900 до 300 °С происходит более 500 мкс.

Распределение плотности вводимой энергии в образцы при данных параметрах тока пучка и ускоряющего напряжения для обеспечения на облучаемой поверхности температуры 1900 °С показано на рис. 5 и составляет около 50 Дж/см² в центральной области.

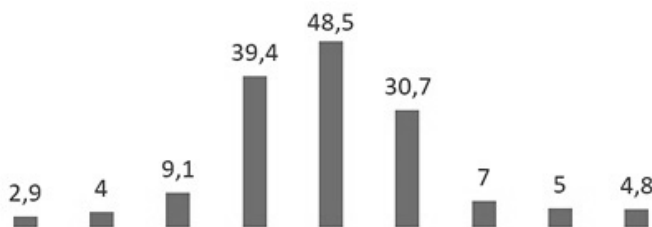


Рис. 5 – Гистограмма распределения плотности энергии по сечению электронного пучка

Fig. 5 – Histogram of energy density distribution over an electron beam cross section

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 6 представлен общий вид образцов в рабочей камере установки «СОЛО» после ЭПО диффузионного слоя.

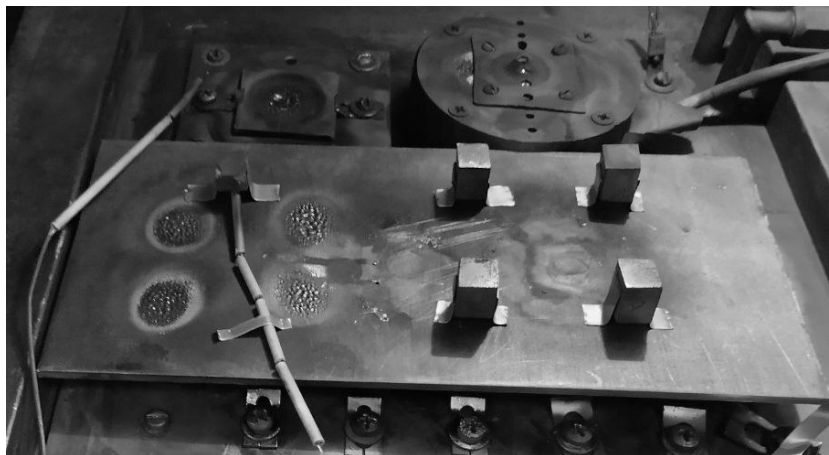


Рис. 6 – Образцы после ЭПО

Fig. 6 – Samples after EBP

Воздействие на поверхность диффузионного слоя (рис. 7) высокой плотности энергии до $0,5 \text{ МВт/см}^2$ вызывает высокоскоростное плавление поверхностного слоя и кристаллизацию после прекращения воздействия за счет теплопроводности вглубь слоя.

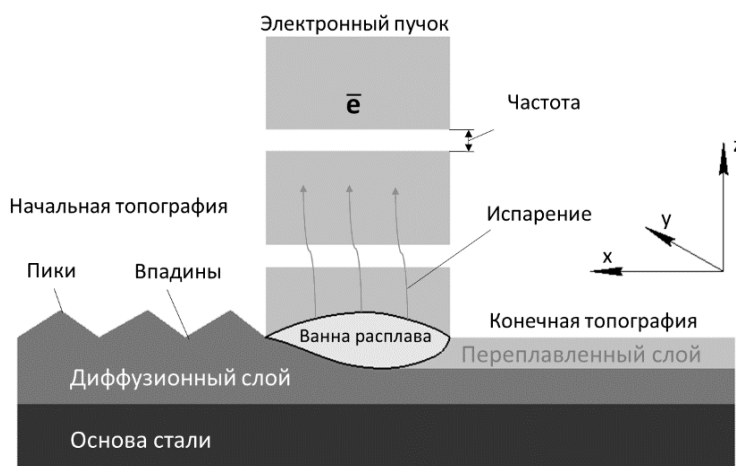


Рис. 7 – Схема импульсной электронно-лучевой обработки диффузионного слоя

Fig. 7 – Scheme of pulsed electron beam diffusion layer processing

Глубина диффузионного слоя после ХТО составляет $\sim 620 \text{ мкм}$ (рис. 8). Подробно свойства таких слоев рассмотрены в работах [20, 21]. Видно, что поверхность диффузионного слоя имеет пористую структуру, топография поверхности имеет нерегулярный профиль с высокими параметрами шероховатости (рис. 9).

ЭПО приводит к переплаву поверхности диффузионного слоя на глубину приблизительно до 170 мкм. Характерной особенностью переплавленного слоя является измельченная структура ячеистой формы. Действие электронного пучка составляет несколько микросекунд, что оказывает тепловое воздействие на небольшую глубину.

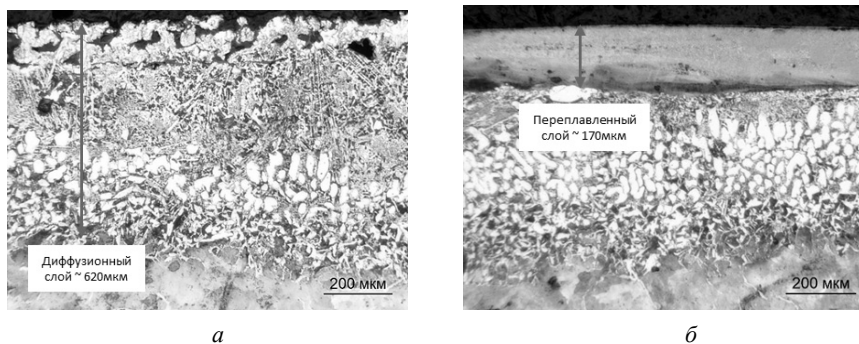


Рис. 8 – Микроструктура слоя:

a – после ХТО; *б* – после ЭПО

Fig. 8 – Layer microstructure:

a – is after TCT; *б* – is after EBP

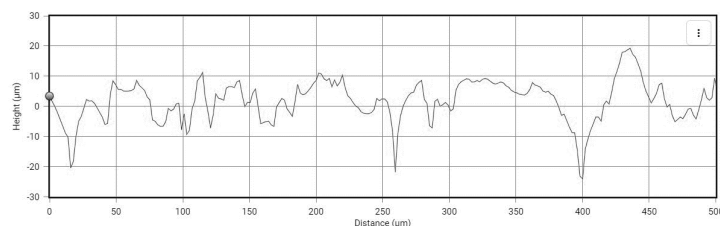


Рис. 9 – Топография поверхности стали после ХТО

Fig. 9 – Topography of the steel surface after TCT

Так, после ХТО значение R_a составляет 3,398 мкм, максимальное значение выступов R_{max} составляет 29,33 мкм. ЭПО диффузионного слоя сопровождается плавлением и испарением высот микронеровностей. Процесс сопровождается движением расплава под действием сил поверхностного натяжения и заполнением пор. Шероховатость снижется до $R_a = 0,110$ мкм, максимальное значение R_{max} не превышает 0,613 мкм (рис. 10, таблица). Топография поверхности после ЭПО имеет более однородную структуру с регулярным профилем.

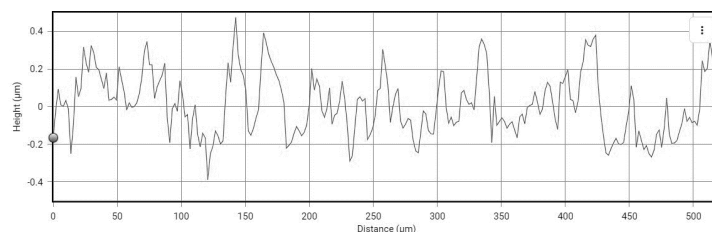


Рис. 10 – Топография поверхности стали после ЭПО

Fig. 10 – Topography of steel surface after EBP

Параметры шероховатости поверхностей опытных образцов
Surface roughness parameters of prototypes

ХТО / ТСТ			ЭПО / ЕВР		
Ra , мкм, μm	Rz , мкм, μm	R_{max} , мкм, μm	Ra , мкм, μm	Rz , мкм, μm	R_{max} , мкм, μm
3,398	20,05	29,33	0,110	0,586	0,613

Измерение микротвердости показало (рис. 11), что ЭПО приводит к увеличению микротвердости на поверхности в зоне переплава. Так, максимальное значение микротвердости после ХТО составляет 620 HV на поверхности, после ЭПО твердость повышается приблизительно до 940 HV на всей глубине модифицированного диффузионного слоя.

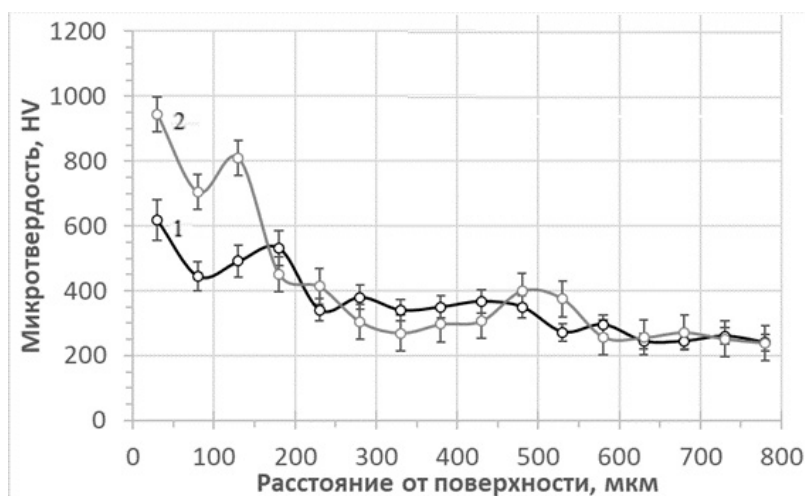


Рис. 11 – Распределение микротвердости по глубине слоя:

1 – химико-термическая обработка; 2 – электронно-пучковая обработка

Fig. 11 – Microhardness distribution over the layer depth:

1 is chemical-thermal treatment; 2 is electron beam treatment

Заключение

Диффузионный слой после химико-термической обработки имеет склонность к образованию паров металла в результате высокотемпературного испарения, повышающих риск электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка в плазменном источнике электронов. Однако введенный контур обратной связи по ионному току в ускоряющем промежутке в модернизированном источнике позволяет повысить управляемость генерации пучка и электрическую прочность ускоряющего промежутка и тем самым обеспечить обработку поверхности образцов до заданной температуры. Для обеспечения стабильности процесса электронно-пучковой обработки предлагается предварительный прогрев поверхности до температуры ~ 700 °C импульсами воздействия с контролируемым током. Обработка электронным пучком диффузионного слоя приводит к его структурной трансформации и к существенному повышению значений микротвердости. Отработанный режим электронно-пучковой обработки, заключающийся в удержании на поверхности диффузионного слоя температуры ~ 1900 °C может быть рекомендован как способ комбинированной модификации, приводящий к улучшению

эксплуатационных свойств (снижение шероховатости поверхности, увеличение микротвердости, износостойкости) за счет структурно-фазовой трансформации. В дальнейшем планируется исследовать перечисленные свойства с применением тонких методов исследования поверхности для объяснения механизмов структурно-фазовой трансформации диффузионных слоев в результате электронно-пучкового воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams / V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval // *Laser and Particle Beams*. – 2003. – Vol. 21 (2). – P. 243–248. – DOI: 10.1017/S026303460321212X.
2. Электронно-пучковая установка «СОЛО-М» для модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов // С.В. Григорьев, В.Н. Девятков, А.В. Миков, П.В. Москвин, А.Д. Тересов // *Известия вузов. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 11-3. – С. 58–62.
3. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering / V.N. Devyatkov, Yu.F. Ivanov, O.V. Krysina, N.N. Koval, E.A. Petrikova, V.V. Shugurov // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 143. – P. 464–472. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
4. Широтная и амплитудная модуляция тока пучка для управления его мощностью в течение импульса субмиллисекундной длительности / В.И. Шин, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.Н. Девятков, В.В. Яковлев, Н.Н. Коваль, М.С. Торба, Р.А. Картавцов, С.А. Воробьев // *Известия вузов. Физика*. – 2022. – Т. 65, № 11. – С. 176–184. – DOI: 10.17223/00213411/65/11/176.
5. Структура, фазовый состав и свойства титана после комплексных упрочняющих технологий / под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – 306 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-7806-0428-0.
6. Модификация поверхности технически чистого титана VT1-0 после различных видов обработки / А.В. Ионина, Е.А. Будовских, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, И.А. Панченко, В.Е. Громов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 21–31. – DOI: 10.21869/2223-1528-2023-13-1-21-31.
7. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру технически чистого титана, подвергнутого усталостному разрушению / С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, А.М. Глезер, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С. Чэнь // *Деформация и разрушение материалов*. – 2019. – № 9. – С. 42–48. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-9-42-48.
8. Формирование и эволюция структуры и фазового состава титана VT1-0 при электронно-пучковой обработке, токовым импульсным воздействием и многоциклового усталости / И.А. Комиссарова, С.В. Коновалов, Д.А. Косинов, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов // *Антология прочности и пластичности металлов и сплавов при внешних энергетических воздействиях* / под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2018. – С. 62–81.
9. Структура и свойства твердых тел, подвергнутых высокоинтенсивному воздействию (к 65-летию профессора Ю.Ф. Иванова) / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и В.Е. Громова. – Новокузнецк: Полиграфист, 2020. – 337 с. – ISBN 978-5-91797-285-5.
10. Усталостная долговечность стали мартенситного класса, модифицированной высокоинтенсивными электронными пучками / Ю.Ф. Иванов, Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Н.Н. Коваль. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 259 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-905647-01-7.
11. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Горбунов, Д.А. Бессонов, В.В. Сизов, С.В. Коновалов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 403 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-905647-02-4.
12. Повышение усталостной выносливости рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / К.В. Волков, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.А. Гришунин. – Новокузнецк:

- Интер-Кузбасс, 2013. – 225 с. – (Фундаментальные проблемы современного материаловедения). – ISBN 978-5-905647-06-2.
13. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams / V.E. Gromov, Y.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov. – Cambridge: Cambridge International Science Publ., 2015. – 272 p. – ISBN 978-1-907343-53-7.
 14. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-Al-слоев химико-термической обработкой / Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн, А.Г. Тихонов, А.И. Шустов, А.С. Пятых // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17, № 12 (204). – С. 557–564. – DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
 15. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 63 (10). – P. 1651–1660. – DOI: 10.1007/s11182-021-02219-3.
 16. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode / N.N. Koval, S.V. Grigoryev, V.N. Devyatkov, A.D. Teresov, P.M. Schanin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2009. – Vol. 37 (10). – P. 1890–1896. – DOI: 10.1109/TPS.2009.2023412.
 17. Комплекс уникальных электрофизических установок для эффективной электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий «УНИКУУМ» // Портал НТИРФ: сайт. – URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216/> (дата обращения: 06.03.2024).
 18. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode / M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.I. Shin, T.V. Koval, V.N. Devyatkov, S.Y. Doroshkevich, N.N. Koval, M.S. Torba, K.T. Ashurova // Technical Physics. – 2022. – Vol. 67 (6). – P. 747–752. – DOI: 10.21883/TP.2022.06.54422.14-22.
 19. Патент № 2746265 С1 Российская Федерация, МПК H05H 15/00, H01J 37/00, H01J 37/06. Способ генерации электронного пучка для электронно-пучковой обработки поверхности металлических материалов: № 2020137779; заявл. 18.11.2020; опубл. 12.04.2021 / М.С. Воробьев, Т.В. Коваль, Н.Н. Коваль [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.
 20. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhiiyn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // Lubricants. – 2020. – Vol. 8 (3). – DOI: 10.3390/lubricants8030026.
 21. Mishigdorzhiiyn U., Sizov I. The influence of boroaluminizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels // Materials Performance and Characterization. – 2018. – Vol. 7 (3). – P. 252–265. – DOI: 10.1520/MPC20170074.

MODIFICATION OF DIFFUSION BORON AND ALUMINUM CONTAINING LAYERS BY ELECTRON BEAM PROCESSING

Ulakhanov N.S.¹, Moskvina P.V.^{2,1}, Mishigdorzhiiyn U.L.¹,
Semenov A.P.¹, Koval N.N.², Vorobyov M.S.²

¹*Institute of Physical Materials Science SB RAS*

²*Institute of High Current Electronics SB RAS*

The article presents testing results of electron beam processing (EBP) modes applied on the diffusion layers based on boron and aluminum produced on the surface of steel 20. An ion current feedback loop in the accelerating gap in a modernized plasma electron source allows increasing the beam generation control and the electrical strength of the accelerating gap. This ensures sample surface processing at a specified temperature. In order to ensure the EBP process stability, it is proposed to preheat the surface to a temperature range of 400-700°C by pulses with a controlled current. Further modification of the diffusion layers is conducted on the surface at a temperature of around 1900°C. Ensuring this temperature range demands the discharge current within the range of 20 - 150A during a single pulse with a duration of 950 μs. The total number of pulses is three and the interval between them is 3 seconds. These processing modes lead to a structural

transformation of the diffusion layer to a depth of more than 150 μm and to a significant microhardness increase. The approved EBP modes can be recommended as a promising alternate approach of the combined modification technologies of diffusion layers based on boron and aluminum.

Keywords: thermal-chemical treatment, boroaluminizing, pulsed electron beam processing, microhardness, electron source, plasma cathode, electron beam power adjustment.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-62-75

REFERENCES

1. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams. *Laser and Particle Beams*, 2003, vol. 21 (2), pp. 243–248. DOI: 10.1017/S026303460321212X.
2. Grigoriev S.V., Devyatkov V.N., Mikov A.V., Moskvin P.V., Teresov A.D. Elektronno-puchkovaya ustanovka «SOLO-M» dlya modifikatsii poverkhnosti metallicheskikh i metal-lokeramicheskikh materialov [E-beam installation "SOLO-M" for surface modification metallic and cermet materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2014, vol. 57, no. 11-3, pp. 58–62.
3. Devyatkov V.N., Ivanov Yu.F., Krygina O.V., Koval N.N., Petrikova E.A., Shugurov V.V. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering. *Vacuum*, 2017, vol. 143, pp. 464–472. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
4. Shin V.I., Vorob'ev M.S., Moskvin P.V., Devyatkov V.N., Yakovlev V.V., Koval' N.N., Torba M.S., Kartavtsov R.A., Vorob'ev S.A. Shirot'naya i amplitud'naya modulyatsiya toka puchka dlya upravleniya ego moshchnost'yu v techenie impul'sa submillisekundnoi dlitel'nosti [Latitude and amplitude modulation of the beam current for controlling its power during a submillisecond pulse]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2022, vol. 65, no. 11, pp. 176–184. DOI: 10.17223/00213411/65/11/176.
5. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., eds. *Struktura, fazovyi sostav i svoystva titana posle kompleksnykh uprochnyayushchikh tekhnologii* [Structure, phase composition and properties of titanium after complex hardening technologies]. Novokuznetsk, SibSIU Publ., 2015. 306 p. ISBN 978-5-7806-0428-0.
6. Ionina A.V., Budovskikh E.A., Konovalov S.V., Ivanov Y.F., Panchenko I.A., Gromov V.E. Modifikatsiya poverkhnosti tekhnicheskii chistogo titana VT1-0 posle razlichnykh vidov obrabotki [Modification of the surface of technically pure titanium VT1-0 after various types of processing]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2023, vol. 13 (1), pp. 21–31. DOI: 10.21869/2223-1528-2023-13-1-21-31.
7. Konovalov S.V., Chen X., Gromov V.E., Komissarova I.A., Gleser A.M., Ivanov Y.F. Vliyanie elektronno-puchkovoi obrabotki na strukturu tekhnicheskii chistogo titana, podvergnutogo ustalostnomu razrusheniyu [Effect of electron-beam treatment on the structure of commercial-purity titanium subjected to fatigue failure]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 9, pp. 42–48. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-9-42-48. (In Russian).
8. Komissarova I.A., Konovalov S.V., Kosinov D.A., Feoktistov A.V., Ivanov Y.F., Gromov V.E. Formirovanie i evolyutsiya struktury i fazovogo sostava titana VT1-0 pri elektronno-puchkovoi obrabotke, tokovom impul'snom vozdeystvii i mnogotsiklovoi ustalosti [Formation and evolution of the structure and phase composition of titanium VT1-0 during electron beam processing, current pulse exposure and high-cycle fatigue]. *Antologiya prochnosti i plastichnosti metallov i splavov pri vneshnikh energeticheskikh vozdeystviyakh* [Anthology of strength and ductility of metals and alloys under external energy influences]. Novokuznetsk, SibSIU Publ., 2018, pp. 62–81.
9. Koval N.N., Gromov V.E., eds. *Struktura i svoystva tverdykh tel, podvergnutykh vysokointensivnomu vozdeystviyu (k 65-letiyu professora Yu.F. Ivanova)* [Structure and properties of solids subjected to highly intense impact (to the 65th anniversary of Professor Yu.F. Ivanov)]. Novokuznetsk, Polygraphist Publ., 2020. 337 p. ISBN 978-5-91797-285-5.
10. Ivanov Y.F., Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Konovalov S.V., Koval N.N. *Ustalost'naya dolgovechnost' stali martensitnogo klassa, modifitsirovannoi vysokointensivnymi elektronnyimi puchkami* [Fatigue durability of martensitic steel modified with high-intensity electron beams]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2011. 259 p. ISBN 978-5-905647-01-7.

11. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Bessonov D.A., Sizov V.V., Konovalov S.V. *Uсталost' stali, modifitsirovannykh vysokointensivnymi elektronnyimi puchkami* [Fatigue of steels modified with high-intensity electron beams]. / V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, S. V. Vorobyov [etc.]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2012. 403 p. ISBN 978-5-905647-02-4.
12. Volkov K.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Grishunin V.A. *Povyshenie ustalostnoi vynoslivosti rel'sovoi stali elektronno-puchkovoii obrabotkoi* [Increasing the fatigue endurance of rail steel by electron beam processing]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2013. 225 p. ISBN 978-5-905647-06-2.
13. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Borobiev S.V., Konovalov S.V. *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge, Cambridge International Science Publ., 2015. 272 p. ISBN 978-1-907343-53-7.
14. Ulahanov N.S., Mishgidorzhyn U.L., Tihonov A.G., Shustov A.I., Pyatyih A.S. Modifikatsiya poverkhnostnogo sloya shtampovykh stali sozdaniem B-Al-sloev khimiko-termicheskoi obrabotkoi [Surface modification of die steels with B–Al-layers by thermal-chemical treatment]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening technologies and coatings*, 2021, vol. 17, no. 12 (204), pp. 557–564. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
15. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 63 (10), pp. 1651–1660. DOI: 10.1007/s11182-021-02219-3.
16. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, vol. 37 (10), pp. 1890–1896. DOI: 10.1109/TPS.2009.2023412.
17. Kompleks unikal'nykh elektrofizicheskikh ustanovok dlya effektivnoi elektronno-ionno-plazmennoi modifikatsii poverkhnosti materialov i izdelii «UNIKUUM» [Complex of unique electrophysical installations for effective electron-ion-plasma modification of the surface of materials and products “UNICUUM”]. *NTIRF Portal*. (In Russian). Available at: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216/> (accessed 06.03.2024).
18. Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S., Ashurova K.T. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode. *Technical Physics*, 2022, vol. 67 (6), pp. 747–752. DOI: 10.21883/TP.2022.06.54422.14-22.
19. Vorobev M.S., Koval T.V., Koval N.N., et al. *Sposob generatsii elektronno-puchkoi obrabotki poverkhnosti metallicheskh materialov* [Electron beam generation method for electron beam treatment of metal materials surface]. Patent RF, no. 2746265 C1, 2021.
20. Mishgidorzhyn U., Chen Y., Ulahanov N., Liang H. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing. *Lubricants*, 2020, vol. 8 (3). DOI: 10.3390/lubricants8030026.
21. Mishgidorzhyn U., Sizov I. The influence of boroaluminizing temperature on microstructure and wear resistance in low-carbon steels. *Materials Performance and Characterization*, 2018, vol. 7 (3), pp. 252–265. DOI: 10.1520/MPC20170074.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Улаханов Николай Сергеевич – родился в 1990 году, мл. науч. сотр. лаборатории физического материаловедения ИФМ СО РАН. Область научных интересов: технология машиностроения, упрочняющие технологии, химико-термическая обработка, обработка концентрированными потоками энергии. Опубликовано 55 научных работ. (Адрес: 670047, Россия, Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: nulahanov@mail.ru).

Ulakhanov Nikolay Sergeevich – (b. in 1990), junior researcher, at the laboratory of Physical Materials Science of the Institute of Physics and Mathematics SB RAS. His scientific interests include mechanical engineering technology, hardening technologies, chemical-thermal treatment, and treatment with concentrated energy flows. He has published 55 scientific papers. (Address: 6, Sakhyanova St., Ulan-Ude, 670047, Buryatia, Russia. E-mail: nulakhanov@mail.ru).



Москвин Павел Владимирович – родился в 1986 году, мл. науч. сотр. лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Область научных интересов: генерация и применение плазмы, пучков электронов. Опубликовано 74 научные работы. (634050, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: pavelmoskvin@mail.ru).

Moskvin Pavel Vladimirovich (b. 1986) – junior researcher at the plasma emission electronics laboratory of HCEI SB RAS. His research interests are currently focused on generation and application of plasma and electron beams. He is the author of 74 scientific papers. (Address: 2/3, Academicheskyy Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: pavelmoskvin@mail.ru).



Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович – родился в 1984 году, канд. техн. наук, зав. лабораторией физического материаловедения ИФМ СО РАН. Область научных интересов: металловедение, химико-термическая обработка; композиционные материалы; покрытия; диффузионные слои; термоциклическая обработка; бороалитирование; углеродистые стали; жаростойкость; износостойкость; металлография; термодинамика; электронно-лучевая обработка; лазерная обработка; электронная микроскопия. Опубликовано 91 научная работа. (Адрес: 670047, Россия, Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: druh@mail.ru).

Mishigdorzhiiyn Undrakh Lkhagvasurenovich – (b. in 1984), Candidate of Sciences (Eng.), Head of the Physical Materials Science Laboratory of the Institute of Physics and Mathematics SB RAS. His scientific interests cover metallurgy, thermal-chemical treatment; composite materials; coatings; diffusion layers; thermal cycling treatment; boroalitation; carbon steels; heat resistance; wear resistance; metallography; thermodynamics; electron beam processing; laser processing; and electron microscopy. He is the author of 91 scientific papers published. (Address: 6, Sakhyanova Street, Ulan-Ude, 670047, Buryatia, Russia. E-mail: druh@mail.ru).



Семенов Александр Петрович – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения ИФМ СО РАН. Область научных интересов: физика газовых разрядов, эмиссия и формирование пучков электронов и ионов из газоразрядной плазмы, физическое материаловедение, получение покрытий полифункционального назначения пучками заряженных частиц и газоразрядной плазмой. Опубликовано 497 научных работ. (Адрес: 670047, Россия, Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru).

Semenov Alexander Petrovich – (b. in 1951), Doctor of Sciences (Eng.), professor, chief researcher at the Laboratory of Physical Materials Science at the Institute of Physics and Mathematics SB RAS. His scientific interests include physics of gas discharges, emission and formation of beams of electrons and ions from gas-discharge plasma, physical materials science, production of coatings for multifunctional purposes using beams of charged particles and gas-discharge plasma. He has 497 scientific papers published. (Address: 6, Sakhyanova Street, Ulan-Ude, 670047, Buryatia, Russia. E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru).



Коваль Николай Николаевич – родился в 1948 году, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Область научных интересов: Физика вакуумного разряда, плазменная эмиссионная электроника, генерация низкотемпературной плазмы, электронные, ионные, плазменные источники, электронно-ионно-плазменная модификация поверхности, физика сильноточных электронных пучков, физика плазмы, физика поверхности, микро- и наноструктура, фазовый состав, эксплуатационные свойства. Опубликовано более 400 научных работ. (634050, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru).

Koval Nikolai Nikolaevich – (b. in 1948), Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Chief Researcher of plasma emission electronics laboratory of HCEI SB RAS. Area of scientific interests: Vacuum discharge physics, plasma emission electronics, low-temperature plasma generation, electron, ion, plasma sources, electron-ion-plasma surface modification, physics of high-current electron beams, plasma physics, surface physics, micro- and nanostructure, phase composition, performance properties. More than 400 scientific papers have been published. (Address: 2/3, Academicheskyy Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: koval@opee.hcei.tsc.ru)



Воробьёв Максим Сергеевич – родился в 1986 году, д-р техн. наук. ст. науч. сотр. лаборатории плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН. Область научных интересов: генерация и применение плазмы, пучков электронов. Опубликовано более 100 научных работ. (Адрес: 634050, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3. E-mail: vorobyovms@yandex.ru).

Vorobyov Maxim Sergeevich (b. in 1986). He received the M.S. degree from Tomsk Polytechnic University in 2009 and his Doctor of Sciences (Eng.), degree from the Institute of High Current Electronics, Tomsk, in 2022. Now he works as a senior researcher and supervisor of several scientific projects there. His research interests include arc discharge and other low pressure gaseous discharges, plasma-cathode electron sources and accelerators, and applications of electron beams. He is the author or coauthor of more than 40 papers in basic phenomena in low-pressure gaseous discharges and vacuum arc plasmas, charged particle emission from low temperature plasma, ion sources and plasma electron guns, and a range of plasma applications. (Address: 2/3, Academicheskyy Av., Tomsk, 634050, Russia. E-mail: vorobyovms@yandex.ru).

*Статья поступила 15 января 2024 г.
Received January 15, 2024*

To Reference:

Ulakhanov N.S., Moskvina P.V., Mishigdorzhyn U.L., Semenov A.P., Koval N.N., Vorobyov M.S. Modifikatsiya diffuzionnykh bor- i alyuminii sodержashchikh sloev elektron-no-puchkovoi obrabotkoi [Modification of diffusion boron and aluminum containing layers by electron beam processing]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 62–75. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-62-75.

УДК 004.891

**РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ****Р.Р. Фарахов¹, Р.А. Бурнашев¹, И.А. Насыбуллин¹
А.И. Еникеев¹, М.В. Болсуновская²**¹*Казанский (Приволжский) Федеральный Университет*²*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

В работе представлена обучающая интеллектуальная система «Эксперт Полимер» для идентификации частиц, пригодных для 3D-печати. Программный комплекс предназначен для анализа изображений полимерных материалов на производственной площадке с помощью оптики. Планируется, что данная интеллектуальная система будет использоваться в качестве учебного комплекса программ для студентов высших учебных заведений, а также для биоинженеров и материаловедов в научно-производственных целях. В исследовании использовались технологии Интернета вещей (IoT) для получения изображений с оптических измерительных устройств (электронный микроскоп и др.) от пользователей системы и отправки им результатов анализа изображений. Путем взаимодействия электронного микроскопа с созданным программным комплексом выполнялась задача определения количества всех частиц и количества частиц, удовлетворяющих алгоритму 3D-печати. На основании этих данных эксперт принимает решение о возможности использования полимерных частиц для последующей 3D-печати. Для реализации системы использовались современные библиотеки языка программирования Python, а именно Pandas, Direction2 и YOLOv5 и другие.

Ключевые слова: OpenCV, экспертные системы, база знаний, полимеры, 3D-печать, IoT.
DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-76-89

Введение

В последнее время получило широкое распространение решение многих задач обработки информации с помощью интеллектуальных систем. Эти системы были интегрированы в современное общество и его огромное разнообразие видов деятельности. Однако интеллектуальные системы способны работать не только с вычислительными задачами. Их также можно использовать для детального анализа физических и химических явлений, классификации объектов различной формы и характера. Эта классификация объектов включает в себя распознавание их изображений, например фотографий или видеоизображений из источников. Данные получают оптическими измерительными приборами [1]. Кроме того, необходимы технологии для получения образцов с удаленных измерительных приборов. В связи с этим для обработки источников применяются различные интеллектуальные информационные системы, такие как экспертные системы и нейронные сети, а также технологии Интернета вещей для получения выборочных данных непосредственно из источников и отправки результатов анализа проб заказчиком.

В современном обществе, где требуется решение сложных задач, точное и быстрое получение результатов также представляется весьма актуальным.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

© 2024 Фарахов Р.Р., Бурнашев Р.А., Насыбуллин И.А., Еникеев А.И., Болсуновская М.В.

Поэтому была разработана так называемая экспертная система (ЭС). ЭС подразумевает под собой информационную систему, полностью или частично замещающую человека как специалиста в определенной области его профессиональной деятельности [2, 3]. Использование ЭС чрезвычайно велико и очевидно в различных социальных сферах, например в социальных сетях, от медицины (особенно для психоанализа) до космических программ. Считается, что результаты, полученные с помощью ЭС, более точны и позволяют сэкономить время, чем результаты, представленные экспертом. Широкое практическое использование экспертных систем повышает эффективность и достоверность принятия решений профильным специалистом. В последнее время большую актуальность приобрели экспертные системы, основанные на нечеткой логике, которые совершенствуют механизм логического вывода и позволяют принимать решения в неясных ситуациях при работе с неполными данными.

Нейронные сети играют не менее важную роль в интеллектуальных системах. Нейронная сеть представляет собой математическую модель, напоминающую по своему функционированию нейронную сеть живого организма [4, 5]. Эта математическая модель позволяет автоматизировать процессы классификации, прогнозирования и идентификации; управления и декодирования информации; аппроксимации зависимости и др.

Комбинирование различных методов искусственного интеллекта значительно повышает качество принятия решений. Данные знаний ЭС основаны на символических представлениях умений, знаний и опыта человека (т.е. явном представлении знаний), тогда как в нейронных сетях знания не могут существовать без преобразований в форме, понятной любому человеку. Однако, обладая знаниями для решения сложных задач, нейронная сеть не может объяснить, почему было получено именно это решение [6].

ЭС и нейронные сети можно комбинировать друг с другом. Обученные нейронные сети способны быстро выполнять вычисления и выдавать результаты для плохо формализуемых задач. Полученный вывод может быть использован экспертной системой для повышения эффективности принятия решений.

Эта комбинация ЭС и нейронной сети включает «Анализ полимеров», прототип программного обеспечения, созданного нами и предназначенного для того, чтобы помочь биоинженерам идентифицировать полимерные частицы, подходящие для 3D-печати в рамках определенного алгоритма [7, 8]. Однако при разработке программы-прототипа выявляются определенные недостатки в получении более качественного и корректного результата идентификации полимерных частиц [9]. Для получения качественного изображения частиц необходимо, на наш взгляд, обратиться к технологиям, именуемым Интернетом вещей.

Интернет вещей [10] представляет собой концепцию сети передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащенными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Мы предполагаем, что такие сети способствуют реструктуризации экономических и социальных процессов и устранению необходимости частичного участия человека в действиях и операциях. Измерительные инструменты, обеспечивающие преобразование данных в машиночитаемые данные и тем самым наполняющие вычислительную среду значимой информацией, имеют большое значение в Интернете вещей.

В настоящее время используется широкий класс измерительных приборов, включающий как простейшие датчики (температуры, давления, освещенности), приборы учета потребления (интеллектуальные счетчики), так и сложные интегрированные измерительные системы. В рамках концепции Интернета вещей

основополагающей является интеграция в сеть измерительных приборов (таких как беспроводные сетевые датчики, измерительные комплексы), благодаря чему можно разрабатывать системы межмашинного взаимодействия.

Более того, Интернет вещей включает в себя класс оптических измерительных устройств, таких как электронный микроскоп. Это прибор, позволяющий получать изображения объекта с максимальным разрешением до 106 раз, который, в отличие от оптического микроскопа с его световым потоком, формирует пучок электронов с полной энергией 200 эВ – 400 кэВ и более (например, высокоразрешающие трансмиссионные электронные микроскопы с ускоряющим напряжением 1 МВ).

Чтобы начать это исследование, мы разработали программное приложение посредством интеграции алгоритмов нечеткой логики.

1. Методы исследования

Для достижения вышеуказанной цели можно наметить следующий алгоритм:

- анализ тематики SLS 3D-печати;
- сформировать и спроектировать UML-диаграмму;
- разработать базу знаний экспертной системы по правилам нечеткого вывода;
- создать и обучить нейронную сеть, идентифицирующую частицы порошка по отдельности;
- сформулировать концепцию передачи данных и изображений из электронного микроскопа в программное обеспечение и наоборот;
- внедрить программный компонент, определяющий характеристики одиночных частиц;
- интеграция и взаимосвязь внедренных программных компонентов в единую программную платформу.

В первую очередь, для изучения основных физико-механических свойств полимерных частиц, необходимых для данного исследования, мы обратились к научному опыту, представленному в работах специалистов различной тематики, просмотрели и проанализировали соответствующую научно-техническую литературу. Также, чтобы узнать мнение экспертов, мы провели ряд бесед, рассмотрели все различные предложенные ими решения и соответственно изучили свойства полимеров, отмеченных как наиболее значимые.

Во-вторых, для обработки изображений и текста использовался современный язык программирования Python. Для создания клиент-серверной части обработки изображений полимерных частиц использовался фреймворк Django. Современные библиотеки языка программирования Python широко используются в большинстве сложных проектов, таких как компьютерное зрение, искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение и т. д. Также одним из основных положительных моментов языка Python является его кроссплатформенность (совместимость с разными операционными системами).

И в заключение: обнаружение полимерных частиц (объектов) на графическом изображении выполняется с использованием современных библиотек Detectron2 и OpenCV [11]. Библиотека включает самые совершенные алгоритмы обнаружения, идентификации и сегментации объектов с элементами компьютерного зрения.

Для формулировки концепции получения данных с электронного микроскопа были рассмотрены и исследованы технологии Интернета вещей, а именно микроконтроллер Arduino, электронные микроскопы с детектированием LiDAR (Light Detecting and Ranging) и встроенные в них измерительные датчики. Для передачи данных между устройствами будет использоваться протокол MQTT (message

queuing telemetry transport) (рис. 1). Это упрощенный сетевой протокол, работающий поверх TCP/IP и ориентированный на обмен сообщениями между устройствами на основе шаблона издатель–подписчик (pub/sub).

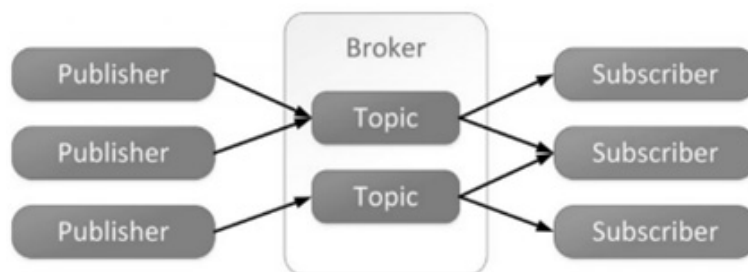


Рис. 1 – Схема MQTT

Fig. 1 – MQTT scheme

2. Подготовка к исследованию

Анализ области знаний SLS 3D-печати. На первом этапе было проведено исследование метода 3D-печати селективного лазерного спекания (SLS) со специалистами в данной области.

Селективное лазерное спекание (SLS) представляет собой процесс аддитивного производства, относящийся к широкому спектру методов синтеза на подложке [12]. В SLS лазер избирательно спекает частицы полимерного порошка, сплавляя их друг с другом и тем самым создавая слой за слоем. В качестве конструкционного материала используются гранулированные термопластичные полимеры.

Основная задача текущего проекта – идентифицировать частицы, подходящие для 3D-печати. Задача детектирования частиц имеет прямое практическое применение – необходимо оптимизировать ресурсы, затрачиваемые в 3D-печати на построение некоторых материалов, а не печатать их, если материалы (в данном случае полимеры) не обладают свойствами, пригодными для дальнейшей их эксплуатации. Сложность задачи заключается в том, что по неформализованным данным, представляющим собой изображения полимерных частиц, полученные с помощью электронного микроскопа, необходимо определить количество всех частиц и количество частиц, удовлетворяющих алгоритму 3D-печати, и на основании этих данных принять решение о возможности использования частиц для 3D-печати.

В результате анализа (изучения соответствующей литературы [12–14] и обсуждения проблем со специалистами предметной области) были выявлены следующие свойства полимерных частиц, влияющие на процесс спекания:

- дисперсность (размер частиц) полимеров;
- шероховатость поверхности частиц;
- округлость частиц;
- температура спекания.

Эти основные свойства необходимо учитывать при составлении результата работы программы, т. е. рекомендаций по печати изделия.

Поясним вышеперечисленные факторы, влияющие на процесс спекания. Большинство лазеров работает по методологии спекания полимерных частиц в процессе 3D-печати. Мощность лазеров чаще всего фиксирована (задействован

определенный алгоритм), т. е. определенное количество энергии выделяется лазером за определенный промежуток времени:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \text{const} \Rightarrow \{\Delta t = \text{const} P = \text{const} \Rightarrow \Delta Q\}. \quad (1)$$

Энергия тратится на процесс спекания полимеров, и так образуются материалы. Можно предположить, что чем больше размер частиц полимеров одинаковой молекулярной массы, тем больше энергии требуется для нагрева частиц до определенной температуры спекания: $Q \propto m$, $m \propto V$, $M = \text{const}$. Таким образом, крупные частицы могут не успеть нагреться до определенной температуры спекания, поэтому качество материала, созданного с помощью 3D-печати, может заметно отличаться от ожидаемого результата в худшую сторону. Поэтому важно оценить примерное количество полимерных частиц, не соответствующих конфигурациям 3D-печати, чтобы можно было принять решение о возможности использования выбранных полимеров.

3. Модель и реализация

В качестве основного языка программирования был выбран Python, так как он является кроссплатформенным, гибким и имеет богатый набор готовых решений в виде библиотек и фреймворков, в частности в области нейронных сетей и компьютерного зрения (рис. 2).

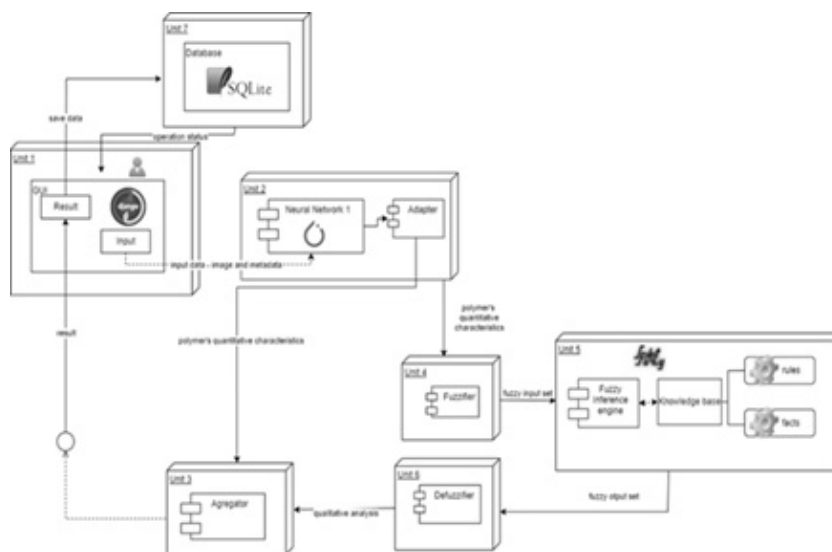


Рис. 2 – Схема модуля

Fig. 2 – Module diagram

Формирование и построение UML-диаграммы. Разработка базы знаний экспертной системы с нечеткими правилами вывода состоит из следующих модулей.

Unit 1 состоит из графического интерфейса пользователя, с которым может взаимодействовать пользователь; в зависимости от действий Unit 1 может получить доступ как к Unit 8, так и к Unit 2. Unit 1 написан с использованием фреймворка Django – облегченного фреймворка для создания веб-приложений с возможностью стилизации GUI.

Unit 2 состоит из нейронной сети № 1 и программного компонента адаптера. Нейронная сеть № 1 принимает черно-белое изображение, полученное с электронного микроскопа пользователя системы полимерных частиц, и дополнительные метаданные, необходимые для распознавания частиц. Обнаруженные частицы обрабатываются адаптером, и на выходе адаптера формируется набор обнаруженных характеристик для каждой частицы, который подается на вход Unit 3 и Unit 1. Для создания нейросети используется фреймворк для PyTorch.

Unit 3 – модуль агрегатора данных – агрегирует данные, полученные от нейросетевого адаптера (изображение с распознанными частицами, количество распознанных частиц и количество частиц, удовлетворяющих требованию дисперсии) и от модуля экспертной системы (значение качества для всех частиц).

Unit 4–6 представляют собой экспертную систему с базой знаний и правилами вывода; реализовано через библиотеку scikit-fuzzy [4].

Unit 7 представляет собой модуль базы данных, в котором хранятся результаты расчетов и пользовательские данные. Для этой цели была выбрана легковесная встроенная реляционная база данных SQLite.

Далее осуществляется создание базы знаний с правилами вывода.

В табл. 1 показаны лингвистические переменные, которые используются в экспертной системе для нечеткого вывода:

- форма (сферичность), как числовая величина, представляет собой отношение площади распознанной частицы (прямоугольника) к площади круга (квадрата) S_r , аппроксимируемого этой частице – $1/(S/S_r - 1)$. Чем он ближе к нулевому значению, тем более сферической является частица;
- гладкость поверхности – это отношение шума изображения; средняя яркость шума в частицах вычисляется техническими средствами $\in (0,1)$;
- пользователь системы вводит значение температуры спекания [5].

Таблица 1/Table 1

Формирование лингвистических переменных Formation of linguistic variables

Criteria	Linguistic Variable	The Boundary for Belonging to a Set	Function Type $f(x)$	[a, b]
Shape (sphericity) – The ratio of the area	not spherical	$ x > \varepsilon_1$	double triangular	(-1,1)
	less spherical	$\varepsilon_1 \leq x \leq \varepsilon_2$		
	spherical	$ x < \varepsilon_1$		
Surface smoothness (Image noise ratio)	not smooth	$x > \varepsilon_1$	trapezoidal	(0,1)
	less smooth	$\varepsilon_1 \leq x \leq \varepsilon_2$		
	smoother	$x < \varepsilon_1$		
Sintering temperature °C	low	$x < 150$	trapezoidal	[120,210]
	acceptable	$150 \leq x \leq 180$		
	high	$x > 180$		

Тип функции $f(x)$ табл. 1 – это степень принадлежности x к набору X лингвистических терминов. Помимо стандартных функций (треугольной, трапециевидной и гауссовой) можно выбрать любую другую нестандартную функцию [6], удовлетворяющую ограничению $f(x) \in [0,1]$.

Таблица 2/Table 2

Формирование базы правил
Formation of a rule base

Form	Smoothness	Temperature	Item Quality
Not spherical less spherical	Not smooth, less smooth	Low, Medium, High	Low
Not spherical	Smooth	Low, high	
Spherical	Not smooth	Low, high	
Not spherical	Smooth	Average	Average
Spherical	Not smooth		
Less spherical	Less smooth		
Less spherical	Smooth	Low, high	High
Spherical	Smooth		
Less spherical, spherical	Smooth	Average	High
Spherical	Less smooth		
Spherical	Smooth	Low, Medium, High	

Для формирования базы правил было сделано следующее.

Каждой лингвистической переменной $x_{ij} \in X_j$ было присвоено значение $y_i \in R$:

$$h_i: X_i \rightarrow R, y_i = h_i(x_j), x_j \in X_i \quad (2)$$

Таблица 3/Table 3

Формирование базы правил
Formation of a rule base

Characteristic (X_j)	Linguistic Variable (x_j)	Real Value (y_j)
Form	Not spherical	0
	Less spherical	1
	Spherical	2
Smoothness	Not smooth	0
	Less smooth	1
	Smooth	2
Temperature	Low	0
	Average	1
	High	0

Далее вычислялась сумма входных правил:

$$\sigma_{i_1 i_2 i_3} = 3x_{i_1 1} + 3x_{i_2 2} + x_{i_3 3} \sigma_{i_1 i_2 i_3} \in [0, 13], \quad (3)$$

где σ – сумма входных правил; x – лингвистическая переменная.

В зависимости от полученного значения определялся результат логического вывода для принятия решения при печати 3D-объекта (табл. 4).

Кроме того, этот электронный микроскоп должен быть оснащен камерой для видео- и фотофиксации и датчиком LiDAR (Light Detecting and Ranging) для обнаружения и фиксации размеров объектов (рис. 3).

Данные, полученные от LiDAR и камеры, отправляются на компьютер пользователя и передаются в интеллектуальную систему через Интернет.



Рис. 3 – Электронный микроскоп

Fig. 3 – Electron microscope

Таблица 4/Table 4

Формирование таблицы вывода 3D объекта результатов
Formation of the output table of the 3D results object

Item Quality	$\sigma_{i_2 i_3} \in$
Low	[0,7]
Average	[7,10]
High	[10,13]

Создание и обучение нейронной сети, распознающей отдельные частицы порошка. Для распознавания отдельных частиц на изображении использовалась модель нейрокомпьютерного зрения YOLOv5 (You Only Look Once) [15]. Он предназначен для обнаружения объектов на изображении в режиме реального времени. Была выбрана версия модели (yolov5l), позволяющая обрабатывать одно изображение на процессоре за 0,043 секунды, и которой достаточно для обработки изображения в ручном режиме (загрузка изображений из файла).

Графические изображения были разделены на обучающую и тестовую выборки. Тренировка проводилась в 300 циклов и занимала около одного часа. Обученная модель достигла 0,75 F1 на выборке тестовых данных.

Для включения сети распознавания частиц был написан класс-обертка. На входе ожидается изображение, а на выходе – DataFrame, который содержит следующие характеристики каждой частицы с изображения: округлость, шероховатость, размер частицы в микронах. Округлость рассчитывается по формуле: $S_{pr}/S_q = (w*h)/(((w+h)/2)^2) = (4*w*h)/(w+h)^2$. За размер принималась самая широкая сторона прямоугольника, в который вписана частица. Шероховатость определялась путем нахождения границ на изображении: чем больше найдено граней, тем большую шероховатость имеет частица.

Для включения сети распознавания частиц был написан класс-обертка. На входе ожидается изображение, а на выходе ожидается DataFrame, который содержит следующие характеристики каждой частицы из изображения.

Для аутентификации пользователя и возможности предоставления сохраненных им результатов расчетов было решено использовать oauth2, а именно аутентификацию с учетной записью Google.

После входа в приложение пользователь попадает на главную страницу, где может ввести данные и получить результат (рис. 4, 5, табл. 5).

Description of the picture

Data for solving the problem

Рис. 4 – Ввод данных для решения задач обнаружения полимерных частиц

Fig. 4 – Data input for solving polymer particle detection problems

Result

Image with recognized particles

Graph of distribution of EC values for particles

Number of all recognized particles:

The number of particles that meet the dispersion requirement:

Average value given by ES:

particle_Val
Sc2Tile_010-006-000_0-000.png

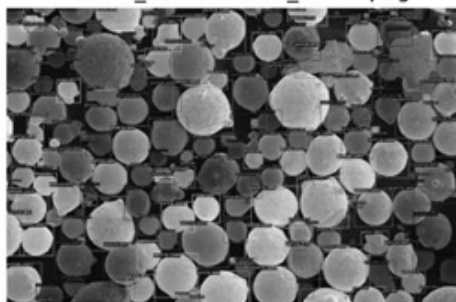


Рис. 5 – Вывод результата решения задач по идентификации полимерных частиц

Fig. 5 – Conclusion of the result of solving problems on the identification of polymer particles

Таблица 5/Table 5

Результаты тестирования нейронной сети
Neural network testing results

Indicator	Results	Verification Date
A1	Smooth; high; positive	November 21, 2022
A3	Not smooth; low; negative	November 21, 2022
A3	Not smooth; Average; negative	November 22, 2022
.....
AN	Smooth; average; positive	January 30, 2023

Для вывода необходимых шаблонов используется адресация, которая прописана в специальном fileurls.py:

```

STUB_THRESHOLD_DISP_COUNT_RATIO = .9
from Django.urls import path
from . import views
from django.views.generic import TemplateView

urlpatterns = {
    path('login',          TemplateView.as_view(template_name=
"main.html")),
    path('', views.index),
    path('save', views.save),
    path('history', views.history),
    path('calculate', views.calculate)
}

```

4. Заключение

Проведенное исследование представляет собой разработку образовательной интеллектуальной системы, направленной на идентификацию частиц, пригодных для 3D-печати. Полученные результаты позволяют констатировать, что система может найти практическое применение, улучшить качество обработки и вывода с использованием элементов искусственного интеллекта в области 3D-печати. Созданная система позволит принимать решения в тех случаях, когда материалы (в частности полимеры) не обладают необходимыми свойствами и особенностями. Система, на наш взгляд, может быть внедрена и в учебный процесс ряда образовательных учреждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Amiri S., Salimzadeh S., Belloum A.S.Z.** A survey of scalable deep learning frameworks // 2019 15th International Conference on eScience (eScience). – IEEE, 2019. – P. 650–651. – DOI: 10.1109/eScience.2019.00102.
2. Building a fuzzy expert system for assessing the severity of pneumonia / R. Burnashev, A. Enikeeva, I.F. Amer, A. Akhmedova, M. Bolsunovskaya, A. Enikeev // Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, 2023. – Vol. 544. – P. 380–396.

3. **Burnashev R.A., Enikeev I.A., Enikeev A.I.** Design and implementation of integrated development environment for building rule-based expert systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia. – IEEE, 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271143.
4. **Singh P.** Machine learning deployment as a web service // Singh P. Deploy machine learning models to production. – Springer, 2021. – P. 67–90.
5. Mask R-CNN / K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy. – IEEE, 2017. – P. 2980–2988. – DOI: 10.1109/ICCV.2017.322.
6. **Gibadullin R., Marushkai N.** Development of predictive CNN based model for vital signs alerts // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – IEEE, 2021. – P. 404–409. – DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446354.
7. **Shahrubudin N., Lee T., Ramlan R.** An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 35. – P. 1286–1296. – DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
8. **Emblem A.** Plastics properties for packaging materials // Packaging Technology. – Woodhead Publishing, 2012. – Ch. 13. – P. 287–309. – DOI: 10.1533/9780857095701.2.287.
9. Preparation and thermal properties of polystyrene/silica nanocomposites / O. Bera, B. Pilić, J. Pavličević, M. Jovičić, B. Holló, K. Mészáros Szécsényi, M. Špirkova // Thermochemica Acta. – 2011. – Vol. 515 (1–2). – P. 1–5. – DOI: 10.1016/j.tca.2010.12.006.
10. **Li S., Xu L.D., Zhao S.** The internet of things: a survey // Information Systems Frontiers. – 2015. – Vol. 17. – P. 243–259.
11. **Bradski G.** OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 2000. – Vol. 25 (11). – P. 120, 122–125.
12. **Geyer R., Jambeck J., Law K.** Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. – 2017. – Vol. 3 (7). – P. e1700782. – DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
13. **Sagar M., Elangovan K.** Consolidation & factors influencing sintering process in polymer powder based additive manufacturing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 225. – DOI: 10.1088/1757-899X/225/1/012075.
14. **Rakhmatullin A.K., Gibadullin R.F.** Synthesis and analysis of elementary algorithms for a differential neural computer // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2022. – Vol. 43. – P. 473–483. – DOI: 10.1134/S1995080222050225.
15. TPH-YOLOv5: improved YOLOv5 based on transformer prediction head for object detection on drone-captured scenarios / X. Zhu, S. Lyu, X. Wang, Q. Zhao // 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), Montreal, BC, Canada. – IEEE, 2021. – P. 2778–2788. – DOI: 10.1109/ICCVW54120.2021.00312.

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL INTELLIGENT SYSTEM FOR ANALYSIS OF POLYMER MATERIALS IN ADDITIVE MANUFACTURING

**Farahov R.R.¹, Burnashev R.A.¹, Nasybullin I.A.¹
Enikeev A.I.¹, Bolsunovskaya M.V.²**

¹*Kazan (Volga region) Federal University*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

The work presents the “Expert Polymer” educational intelligent system for identifying particles suitable for 3D printing. The software package is designed to analyze images of polymer materials on a production site using optics. It is planned that this intelligent system will be used as an educational set of programs for students of higher educational institutions, as well as for bio-engineers and materials scientists for scientific and production purposes. The study used Internet of Things (IoT) technologies to obtain images from optical measurement devices (electron micro-

scope, etc.) from system users and send them the results of image analysis. By interacting the electron microscope with the created software package, the task of determining the number of all particles and the number of particles that satisfy the 3D printing algorithm was performed. Based on these data, the expert makes a decision on the possibility of using polymer particles for subsequent 3D printing. To implement the system, modern libraries of the Python programming language were used, namely Pandas, Direction2 and YOLOv5 and others.

Keywords: OpenCV, expert systems, knowledge base, polymers, 3D printing, IoT.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-76-89

REFERENCES

1. Amiri S., Salimzadeh S., Belloum A.S.Z. A survey of scalable deep learning frameworks. *2019 15th International Conference on eScience (eScience)*. IEEE, 2019, pp. 650–651. DOI: 10.1109/eScience.2019.00102.
2. Burnashev R., Enikeeva A., Amer I.F., Akhmedova A., Bolsunovskaya M., Enikeev A. Building a fuzzy expert system for assessing the severity of pneumonia. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2023, vol. 544, pp. 380–396.
3. Burnashev R.A., Enikeev I.A., Enikeev A.I. Design and implementation of integrated development environment for building rule-based expert systems. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271143.
4. Singh P. Machine learning deployment as a web service. Singh P. *Deploy machine learning models to production*. Springer, 2021, pp. 67–90.
5. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, Italy, 2017, pp. 2980–2988. DOI: 10.1109/ICCV.2017.322.
6. Gibadullin R., Marushkai N. Development of predictive CNN based model for vital signs alerts. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 2021, pp. 404–409. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446354.
7. Shahrubudin N., Lee T., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 35, pp. 1286–1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
8. Emblem A. Plastics properties for packaging materials. *Packaging Technology*. Woodhead Publishing, 2012, ch. 13, pp. 287–309. DOI: 10.1533/9780857095701.2.287.
9. Bera O., Pilić B., Pavličević J., Jovičić M., Holló B., Mészáros Szécsényi K., Špirkova M. Preparation and thermal properties of polystyrene/silica nanocomposites. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 515 (1–2), pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.tca.2010.12.006.
10. Li S., Xu L.D., Zhao S. The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 2015, vol. 17, pp. 243–259.
11. Bradski G. OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000, vol. 25 (11), pp. 120, 122–125.
12. Geyer R., Jambeck J., Law K. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017, vol. 3 (7), p. e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
13. Sagar M., Elangovan K. Consolidation & factors influencing sintering process in polymer powder based additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 225. DOI: 10.1088/1757-899X/225/1/012075.
14. Rakhmatullin A.K., Gibadullin R.F. Synthesis and analysis of elementary algorithms for a differential neural computer. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2022, vol. 43, pp. 473–483. DOI: 10.1134/S1995080222050225.
15. Zhu X., Lyu S., Wang X., Zhao Q. TPH-YOLOv5: improved YOLOv5 based on transformer prediction head for object detection on drone-captured scenarios. *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops*, Montreal, BC, Canada, 2021, pp. 2778–2788. DOI: 10.1109/ICCVW54120.2021.00312.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Фарахов Рустам Ринатович – родился в 1993 году, ассистент кафедры анализа данных и технологий программирования, Институт вычислительной математики и информационных технологий, Казанский (Приволжский) университет. Область научных интересов: экспертные системы, интернет вещей. Опубликовано 12 научных работ. (Адрес: 420000, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 35. E-mail: rus-wing-dark@mail.ru).

Farahov Rustam Rinatovich (b. 1993) – no degree Assistant at the Department of Data Analysis and Programming Technologies, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan (Volga Region) University. His research interests are currently focused on expert systems and internet of things. He is author of 12 scientific papers. (Address: 35, Kremlevskaya st., Kazan, 420000, Russia. E-mail: rus-wing-dark@mail.ru).



Бурнашев Рустам Арифович – родился в 1989 году, канд. техн. наук, доцент кафедры анализа данных и технологий программирования, Институт вычислительной математики и информационных технологий, Казанский (Приволжский) университет. Область научных интересов: экспертные системы, анализ данных, нечеткая логика. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 420000, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 35. E-mail: r.burnashev@inbox.ru).

Burnashev Rustam Arifovich (b. 1989) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Department of Data Analysis and Programming Technologies, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan (Volga Region) University. His research interests are currently focused on expert systems, data analysis, fuzzy logic. He is author of 40 scientific papers. (Address: 35, Kremlevskaya st., Kazan, 420000, Russia. E-mail: r.burnashev@inbox.ru).



Насыбуллин Ильнур Анасович – родился в 2000 году, студент кафедры анализа данных и технологий программирования, Институт вычислительной математики и информационных технологий, Казанский (Приволжский) университет. Область научных интересов: экспертные системы, анализ данных, нечеткая логика. Опубликовано четыре научные работы. (Адрес: 420000, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 35. E-mail: ianasybullin@stud.kpfu.ru).

Nasibullin Ilnur Anasovich (b. 2000) – student of Department of Data Analysis and Programming Technologies, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan (Volga Region) University. His research interests are currently focused on expert systems, data analysis, fuzzy logic. He is author of 4 scientific papers. (Address: 35, Kremlevskaya st., Kazan, 420000, Russia. E-mail: ianasybullin@stud.kpfu.ru).



Еникеев Арслан Ильясович – родился в 1947 году, канд. техн. наук, доцент кафедры анализа данных и технологий программирования, Институт вычислительной математики и информационных технологий, Казанский (Приволжский) университет. Область научных интересов: экспертные системы, анализ данных, нечеткая логика. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 420000, Россия, Казань, ул. Кремлёвская, 35. E-mail: a_eniki@inbox.ru).

Enikeev Arslan Ilyasovich (b. 1947) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Department of Data Analysis and Programming Technologies, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan (Volga Region) University. His research interests are currently focused on expert systems, data analysis, fuzzy logic. He is author of 40 scientific papers. (Address: 35, Kremlevskaya st., Kazan, 420000, Russia. E-mail: a_eniki@inbox.ru).



Болсуновская Марина Владимировна – родилась в 1966 году, канд. техн. наук, доцент, Институт компьютерных наук и технологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов: обработка изображений, трехмерное моделирование, проектирование информационных систем и баз данных, управление проектами. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29В. E-mail: bolsun_hht@mail.ru).

Bolsunovskaya Marina Vladimirovna (b. 1966) – Ph.D., Associate Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University. His research interests are currently focused on expert systems, data analysis, fuzzy logic. She is author of 40 scientific papers. (Address: 29V, st. Politekhnikeskaya, Sankt Peterburg, 420000, Russia. E-mail: bolsun_hht@mail.ru).

*Статья поступила 25 сентября 2023 г.
Received September 25, 2023*

To Reference:

Farahov R.R., Burnashev R.A., Nasybullin I.A., Enikeev A.I., Bolsunovskaya M.V. Razrabotka obrazovatel'noi intellektual'noi sistemy analiza polimernykh materialov v additivnom proizvodstve [Development of an educational intelligent system for analysis of polymer materials in additive manufacturing]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 76–89. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-76-89.

УДК 621.391.8

**РОБАСТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ****Н.С. Хайло***Новосибирский государственный технический университет*

Предлагается асимптотически робастный инвариантный алгоритм обнаружения и оценки временного положения сигналов, синтезированный на основе приближенно финитной модели распределений шума. Алгоритм основан на вычислении корреляционных статистик нелинейного преобразования наблюдаемой выборки с вектором отсчетов опорного сигнала. Оценка времени задержки сигнала определяется путем специальной обработки полученных статистик с учетом наличия в наблюдаемом процессе зеркальных помех. Алгоритм реализован в частотной области, что позволяет использовать процедуру быстрого преобразования Фурье для уменьшения вычислительных затрат. Результаты имитационного моделирования показывают, что в случае распределений шума с тяжелыми хвостами АРИ-алгоритм обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с классическим корреляционным алгоритмом, а в случае гауссовского шума практически не уступает ему.

Ключевые слова: оценка времени задержки, априорная неопределенность, обнаружение, шумы, робастность.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-90-99

Введение

Одной из ключевых проблем при обеспечении достоверности и качества приема в мобильных системах передачи данных является синхронизация источника и приемника. В системах связи с множественным доступом с временным разделением каналов (TDMA) синхронизация является одной из первых операций при обработке кадра отдельного абонента. Как правило, процесс синхронизации включает в себя обнаружение и оценку задержки передачи в пределах заданной области неопределенности. Стоит отметить, что технология TDMA по-прежнему вызывает интерес в современных системах связи, о чем свидетельствует ее применение в системах цифрового спутникового вещания DVB-S2 и DVB-RCS [1, 2], стандарте цифровой подвижной радиосвязи DMR, а также в стандарте авиационной телеметрии нового поколения [3]. В таких системах надежная синхронизация кадров при низком отношении сигнал/шум является критической задачей, особенно при наличии априорно неопределенного доплеровского сдвига частоты, в присутствии отражений от подстилающей поверхности и местных предметов и воздействии импульсных помех. На практике подход, оптимальный для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) [4], может демонстрировать низкую эффективность, обусловленную смещением несущей частоты [5, 6] или отклонением распределения шума от гауссовской модели. В системах связи между подвижными объектами задача еще более осложняется наличием мешающих отражений от подстилающей поверхности и местных предметов.

Для оценки временного положения сигнала в условиях многолучевого распространения традиционно используют сигналы с хорошими корреляционными свойствами [7, 8], например коды Баркера или M-последовательности, и специальные методы обработки [9–12]. Последние позволяют повысить отношение сигнал/шум и в ряде случаев уменьшить объем обрабатываемой информации. В работе [9] для

определения временного положения сигнала предложено использовать конечное число согласованных фильтров, что ограничивает применимость данного подхода. В работе [10] принимаемый сигнал в виде псевдослучайной последовательности (ПСП) большой длины предложено разбивать на блоки и проводить корреляционную обработку поблочно. При этом для выделения сигнала прямого прохождения предлагается использовать стандартный приемник GPS, что также не обеспечивает нужной скорости обработки сигналов для рассматриваемых мобильных сетей. В работе [11] для борьбы с мешающими отражениями выполняется предварительная оценка канала с использованием обучающей выборки, однако такой подход при больших скоростях перемещения подвижных объектов и коротких временных слотах, отведенных для каждого абонента, также неприменим.

Для решения проблемы оценки временного положения сигнала в условиях негауссовского шума в работе [13] совместно с корреляционным подходом предлагается использовать порядковые статистики. При этом некоторые экстремальные значения статистик заменяются случайными значениями из предполагаемого распределения шума. В работе отмечается, что для определения экстремальных статистических значений, которые должны быть заменены, требуется получить достоверное представление о поведении канала связи, что также на практике оказывается весьма затруднительно.

В настоящей работе для решения проблемы обнаружения и оценки временного положения сигналов предлагается подход, основанный на синтезе асимптотически робастных инвариантных алгоритмов с использованием расширенной модели приближенно финитных распределений шума.

1. Модель наблюдаемого процесса и наблюдаемая выборка

Наблюдаемая выборка представляет собой вектор $\mathbf{x} = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}$ отсчетов комплексной огибающей $x(t)$, $t \in [0, T_{SYNC}]$ процесса на выходе линейного тракта приемника, где T_{SYNC} – длительность интервала, в пределах которого может присутствовать синхросигнал. Процесс $x(t)$ представляет собой аддитивную смесь комплексных огибающих полезного сигнала $S(t)$, проходящего по «прямому» лучу, помехового сигнала $P(t)$, полученного в результате зеркального отражения от подстилающей поверхности, а также шума $\eta(t)$ с неизвестными распределением и дисперсией:

$$x(t) = S(t) + P(t) + \eta(t). \quad (1)$$

В качестве полезного сигнала используется широкополосный сигнал, получаемый с помощью прямого расширения спектра:

$$S(t) = \lambda_s e^{j(2\pi F_{Ds} + \phi_s)} s(t - \tau_{Ds}), \quad (2)$$

где $s(t) = \sum_{i=0}^{L_{ПСП}-1} M_i s_e(t - i\tau_e)$, $\lambda_s = \sqrt{E_s/L_{ПСП}}$ – энергетический параметр; E_s – энергия синхросигнала; M_i – i -й элемент ПСП, принимающий значения из множества $\{-1, 1\}$; $L_{ПСП}$ – длина ПСП; F_{Ds} – доплеровский сдвиг частоты полезного сигнала; τ_{Ds} – величина времени задержки полезного сигнала относительно начала интервала наблюдения; τ_e – длительность одного элемента (чипа) ПСП,

$s_e(t)$ – сигнал задающий форму чипа. Величины λ_s , ϕ_s и F_{Ds} считаются априорно неопределенными соответственно на множествах $(0, \infty)$, $[0, 2\pi)$ и $[-F_{D\max}, F_{D\max}]$, $F_{D\max}$ – максимальная абсолютная величина доплеровского сдвига частоты.

Каждый элемент ПСП имеет форму окна Ханна для ограничения уровня внеполосного излучения и задается выражением

$$s_e(t) = \begin{cases} a_e \cos^2 \left(\pi \frac{t - \frac{1}{2}\tau_e}{\tau_e} \right) & \text{при } 0 \leq t < \tau_e, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Для удобства вычисления энергий всех сигналов параметр a_e в (3) выбран таким образом, чтобы энергия чипа $\|s_e(t)\|^2 = 1$.

Помеха, обусловленная зеркальным отражением от подстилающей поверхности, совпадает по форме с сигналом прямого прохождения и имеет вид

$$P(t) = \lambda_p e^{j(2\pi F_{Dp} + \phi_p)} s(t - \tau_{Ds} - \tau_{Dp}), \quad (4)$$

где λ_p – энергетический параметр; F_{Dp} – доплеровский сдвиг частоты; ϕ_p – начальная фаза отраженного сигнала; τ_{Dp} – запаздывание отраженного сигнала относительно сигнала, пришедшего по прямому лучу.

Случайная составляющая на выходе линейного тракта приемника обусловлена его собственными шумами, диффузными отражениями от подстилающей поверхности, атмосферными, промышленными, специально поставленными помехами и т. п. В связи с тем, что часть источников шума невозможно полностью охарактеризовать, в настоящей работе принято, что $\eta(t)$ является комплексным случайным процессом с нулевым средним и неизвестной дисперсией, распределение вероятностей которого заранее неизвестно.

2. Асимптотически робастный инвариантный алгоритм

Как и в работе [12] для обнаружения синхросигнала и определения его временного положения, разобьем интервал наблюдения на конечное число интервалов, соответствующих всевозможным задержкам сигнала с шагом равным периоду дискретизации τ_s . Далее задача обнаружения сигнала будет решаться для каждой из возможных дискретных задержек.

При синтезе алгоритма наличие мешающих отражений не учитывалось в связи с использованием широкополосных сигналов с малым уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ). Доплеровский сдвиг несущей частоты также не учитывался, потому что его наличие оказывает существенное влияние только при длительностях синхросигнала, сопоставимых с периодом доплеровского сдвига [12]. Влияние данных помех будет оценено в дальнейшем методом имитационного моделирования.

С учетом сказанного выше исходными данными для алгоритма обнаружения выступает вектор $\mathbf{x}^{(m)}$ с компонентами $x_i^{(m)} = x_{i+m}$, $i = \overline{0, N_s - 1}$, $N_s = \frac{T_{SYNC}}{\tau_s}$,

соответствующий некоторой дискретной задержке $m \in \mathfrak{M}$. Вектор $\mathbf{x}^{(m)}$ можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{x}^{(m)} = \lambda_s e^{j\phi_s} \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta}, \quad (5)$$

где $\mathbf{s} = \{s_0, \dots, s_{N_s-1}\}$ – вектор, с компонентами $s_i = s(i\tau_s)$, $i = \overline{0, N_s-1}$; $\boldsymbol{\eta}$ – вектор отсчетов комплексной огибающей шума; \mathfrak{M} – множество возможных дискретных задержек.

Квадратурные составляющие вектора отсчетов шума $\boldsymbol{\eta}$ являются статистически независимыми с одинаковыми неизвестными маргинальными плотностями распределения вероятности (ПРВ). Для вероятностного описания случайной составляющей наблюдаемого процесса примем расширенную модель приближенно финитных распределений [14], представленных множеством

$$\mathcal{P} = \left\{ p(t) = \frac{1}{\sigma} w\left(\frac{t}{\sigma}\right), w \in \mathcal{W}, \sigma \in (0, \infty) \right\}, \quad (6)$$

где $\mathcal{W} = \left\{ w: \int_{-1}^1 w(t) dt = q, I(w) < \infty \right\}$ – класс ПРВ с нулевым средним и фиксиро-

ванной вероятностью q интервала $[-1, 1]$; $I(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_w^2(t) w(t) dt$ – информация

Фишера о сдвиге; $\psi_w(t) = \frac{d}{dt} \ln w(t)$ – логарифмическая производная ПРВ; σ – априорно неопределенный параметр масштаба. Вероятность q является параметром модели (6).

Для построения алгоритма обнаружения была использована приведенная в [14] методика синтеза асимптотически робастных инвариантных алгоритмов. Согласно принятой методике синтеза алгоритмы выражаются через логарифмическую производную плотности с минимальной информацией Фишера в классе \mathcal{W} . Для принятой модели минимальная информация Фишера имеет плотность

$$w_0(t) = \begin{cases} \frac{C}{\cos^2(A/2)} \cos^2(At/2), & |t| \leq 1; \\ C \exp[-B(|t|-1)], & |t| > 1, \end{cases}$$

логарифмическая производная которой

$$\psi_{w_0}(t) = \begin{cases} -B, & t \in (-\infty, -1); \\ A \operatorname{tg}(At/2), & t \in [-1, 1]; \\ B, & t \in (1, \infty), \end{cases}$$

где параметры A и B зависят от величины q и определяются из уравнений

$$\int_{-1}^1 w_0(t) dt = q, \quad A \operatorname{tg}(A/2) = B \quad \text{при} \quad C = \cos^2(A/2) / [1 + (2/B)].$$

Решающая функция АРИ-алгоритма обнаружения имеет вид

$$\varphi_s(\mathbf{x}^{(m)}) = \begin{cases} 1, T(\mathbf{x}^{(m)}) \geq C(\alpha); \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (7)$$

где

$$T(\mathbf{x}^{(m)}) = \frac{\sqrt{N_s} \left| \left\langle \Psi \left(\frac{\mathbf{x}^{(m)}}{\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})} \right), \mathbf{s} \right\rangle \right|}{\left\| \Psi \left(\frac{\mathbf{x}^{(m)}}{\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})} \right) \right\|}, \quad (8)$$

$\|\cdot\|$ – норма, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – скалярное произведение векторов в комплексном евклидовом пространстве, $C(\alpha)$ – регулируемый порог, с помощью которого устанавливается

заданный уровень α вероятности ложного обнаружения; $\Psi \left(\frac{\mathbf{x}^{(m)}}{\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})} \right) =$

$$= \left\{ \Psi \left(\frac{x_0^{(m)}}{\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})} \right), \dots, \Psi \left(\frac{x_{N_s-1}^{(m)}}{\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})} \right) \right\} \quad - \text{ комплексная векторная статистика,}$$

$\Psi(t) = \Psi_{w_0}(\operatorname{Re} t) + j\Psi_{w_0}(\operatorname{Im} t)$; $\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})$ – эквивариантная и $\sqrt{N_s}$ – состоятельная оценка параметра масштаба.

В качестве оценки $\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)})$ параметра масштаба будем использовать квантильную оценку [15, 16] в форме

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}^{(m)}) = \frac{1}{2} \left[z_{(p)}(\operatorname{Re} \mathbf{x}^{(m)}) + z_{(p)}(\operatorname{Im} \mathbf{x}^{(m)}) \right], \quad (9)$$

где $z_{(p)}(\operatorname{Re} \mathbf{x}^{(m)})$ и $z_{(p)}(\operatorname{Im} \mathbf{x}^{(m)})$ – p -е порядковые статистики векторов

$$\mathbf{z}(\operatorname{Re} \mathbf{x}^{(m)}) = \left(\left| \operatorname{Re} x_0^{(m)} \right|, \dots, \left| \operatorname{Re} x_{N_s-1}^{(m)} \right| \right) \quad \text{и} \quad \mathbf{z}(\operatorname{Im} \mathbf{x}^{(m)}) = \left(\left| \operatorname{Im} x_0^{(m)} \right|, \dots, \left| \operatorname{Im} x_{N_s-1}^{(m)} \right| \right),$$

$p = \lfloor (N_s - 1)q \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ – целая часть числа.

Аналогично работе [12] для эффективного вычисления статистик (8) для всех возможных задержек алгоритм (7) может быть выражен в частотной области, что позволит использовать процедуру быстрого преобразования Фурье (БПФ). Тогда решающая функция АРИ-алгоритма обнаружения синхросигнала с неизвестной задержкой будет иметь вид

$$\varphi_s(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, \max_{m \in \mathfrak{M}} Z_m(\mathbf{x}) \geq C(\alpha); \\ 0 \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

где статистика $Z_m(\mathbf{x}) = \frac{\left| (\mathcal{F}^{-1}(\tilde{\mathbf{X}} \times \mathbf{S}^*))_m \right|}{\|\tilde{\mathbf{X}}\|}$, $\forall m \in \mathfrak{M}$, $\mathcal{F}(\cdot)$ – дискретное преобразование Фурье (ДПФ); $*$ – знак комплексного сопряжения; $\tilde{\mathbf{X}} = \mathcal{F} \left(\Psi \left(\frac{\mathbf{x}}{\hat{\sigma}(\mathbf{x})} \right) \right)$,

$\mathbf{S}' = \mathcal{F}(\mathbf{s}')$, \mathbf{s}' – вектор отсчетов сигнала $s(t)$, дополненный нулями до размерности вектора \mathbf{x} , знаком « \times » обозначено поэлементное умножение векторов.

Для определения дискретной задержки синхросигнала относительно начала интервала наблюдения воспользуемся следующей оценкой:

$$\tilde{m}_d = \min_{\tilde{m} \in \mathfrak{M}} \tilde{m},$$

где \mathfrak{M} – множество дискретных задержек \tilde{m} , соответствующих локальным максимумам статистик $Z_{\tilde{m}}(\mathbf{x})$, для которых выполняется неравенство $Z_{\tilde{m}}(\mathbf{x}) \geq \rho \max_{m \in \mathfrak{M}} Z_m(\mathbf{x})$, $\rho = 0,6 - 0,8$. Подобная оценка уменьшает вероятность ошибки, связанной с наличием зеркальных помех, когда глобальный максимум среди статистик $Z_m(\mathbf{x})$ может располагаться в области временного положения такой помехи.

3. Результаты моделирования

Исследование эффективности разработанного алгоритма обнаружения и оценки временного положения сигнала проводилось методом имитационного моделирования на ЭВМ. Для расширения спектра полезного сигнала использовалась М-последовательность длиной $L_{\text{ПСП}} = 255$, причем длительность одного элемента последовательности принималась равной восьми интервалам дискретизации. Задержка зеркальной помехи относительно полезного сигнала в каждом эксперименте формировалась генератором случайных чисел с равномерным распределением на интервале $\tau_{Dp} \in [0, 1; 10000] \tau_s$. Максимальный доплеровский сдвиг как полезного сигнала, так и зеркальной помехи принимался равным $F_d = 5000$ Гц. Начальные фазы полезного сигнала и помех в каждом эксперименте считались неизвестными и формировались генератором случайных чисел с равномерным распределением на интервале $[0, 2\pi)$. В качестве фактического распределения шума использовалось ϵ -загрязненное распределение. При $\epsilon = 0$ оно совпадает с гауссовским распределением, а при $\epsilon = 0,05$ – имеет более тяжелые хвосты. Для сравнения моделировался также алгоритм [12], разработанный авторами ранее, в основе которого лежит согласованный коррелятор.

На рис. 1 представлены зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала от отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума. Из графиков видно, что при $\epsilon = 0,05$ АРИ алгоритм имеет энергетическое преимущество до 7 дБ по сравнению с корреляционным алгоритмом, а при гауссовском шуме практически не уступает ему.

На рис. 2 показаны зависимости смещения Δ_S и среднеквадратического отклонения (СКО) σ_S оценки задержки сигнала от отношения сигнал/шум, выраженные в периодах дискретизации.

Как видно из рисунка 2, при $E_s/N_0 < 19$ дБ АРИ-алгоритм обеспечивает лучшую эффективность при распределениях шума с тяжелыми хвостами ($\epsilon > 0$) по сравнению с корреляционным алгоритмом. Точность оценки менее одного периода дискретизации достигается при $E_s/N_0 \geq 12$ дБ для $\epsilon = 0,05$ и при $E_s/N_0 \geq 19$ для $\epsilon = 0$. При достаточно высоком отношении сигнал/шум ($E_s/N_0 \geq 19$ дБ) использование АРИ-алгоритма не дает преимуществ по сравнению с корреляционным алгоритмом.

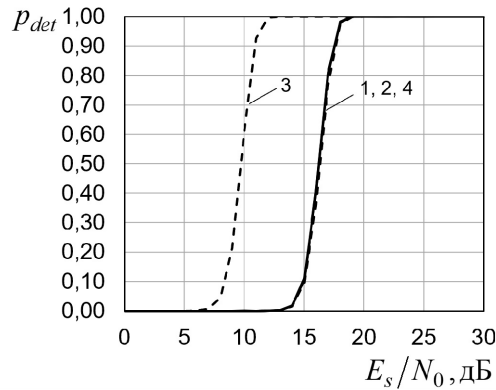


Рис. 1 – Зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала от отношения сигнал/шум для корреляционного алгоритма (сплошные линии) и АРИ-алгоритма (пунктирные линии):

1, 2 – $\varepsilon = 0$; 3, 4 – $\varepsilon = 0,05$

Fig. 1 – Detection probability performance of Correlation algorithm (solid lines) and ARI algorithm (dashed lines):

1, 2 – $\varepsilon = 0$; 3, 4 – $\varepsilon = 0,05$

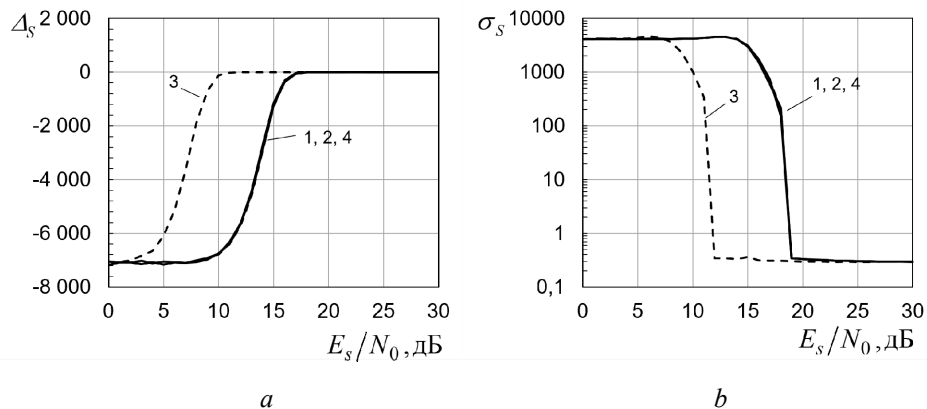


Рис. 2 – Зависимости смещения (a) и среднеквадратического отклонения (b) оценки времени задержки сигнала от отношения сигнал/шум для корреляционного алгоритма (сплошные линии) и АРИ-алгоритма (пунктирные линии):

1, 2 – $\varepsilon = 0$; 3, 4 – $\varepsilon = 0,05$

Fig. 2 – Time delay estimation performance versus SNR (a – Mean error, b – Root mean square error) of Correlation algorithm (solid lines) and ARI algorithm (dashed lines):

1, 2 – $\varepsilon = 0$; 3, 4 – $\varepsilon = 0,05$

Заклучение

Предложен АРИ-алгоритм обнаружения и оценки временного положения сигнала, основанный на расширенной модели приближенно финитных распределений шума. Результаты имитационного моделирования показывают, что в случае

распределений шума с тяжелыми хвостами при $E_s/N_0 < 19$ дБ АРИ-алгоритм обеспечивает выигрыш до 7 дБ в пороговом отношении сигнал/шум по сравнению с корреляционным алгоритмом, а в случае гауссовского шума АРИ-алгоритм практически не уступает ему. Как и в работе [12], предложенный алгоритм реализован в частотной области, что позволяет использовать БПФ для уменьшения вычислительных затрат. Однако следует отметить, что АРИ-алгоритм имеет большую вычислительную сложность, что обусловлено необходимостью введения дополнительного нелинейного преобразования исходной выборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. ETSI EN 302 307 V1.1.1 (2004-01), Digital Video Broadcasting (DVB) – second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications, 2004.
2. ETSI EN 301 790 V1.3.1 (2003-03), Digital Video Broadcasting (DVB) – interaction channel for satellite distribution systems, 2003.
3. **Young T.** Integrated Network Enhanced Telemetry (iNET): impact to the telemetry community for the ettc2018 // Proceedings of the European Test and Telemetry Conference, 26–28 June 2018. – Nürnberg, Germany, 2018. – P. 155–161. – DOI: 10.5162/ettc2018/8.1.
4. **Massey J.L.** Optimum frame synchronization // IEEE Transactions on Communications. – 1972. – Vol. 20 (2). – P. 115–119. – DOI: 10.1109/TCOM.1972.1091127.
5. **Gansman J.A., Fitz M.P., Krogmeier J.V.** Optimum and suboptimum frame synchronization for pilot-symbol-assisted // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45 (10). – P. 1327–1337. – DOI: 10.1109/26.634696.
6. **Choi Z.Y., Lee Y.H.** Frame synchronization in the presence of frequency offset // IEEE Transactions on Communications. – 2002. – Vol. 50 (7). – P. 1062–1065. – DOI: 10.1109/TCOMM.2002.800815.
7. **Варакин Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
8. **Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В.** Шумоподобные сигналы: анализ, синтез, обработка. – СПб.: Наука и техника, 2005. – 400 с.
9. **Lottici V., D’Andrea A., Mengali U.** Channel estimation for ultrawideband communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2002. – Vol. 20 (9). – P. 1638–1645. – DOI: 10.1109/JSAC.2002.805053.
10. **Fei Z., Tiejun Y., Shunji H.** TOA estimation algorithm based on multi-search // Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2005. – Vol. 16 (3). – P. 561–565.
11. **Carbonelli C., Mengali U.** Synchronization algorithms for UWB Signals // IEEE Transactions on Communications. – 2006. – Vol. 54 (2). – P. 329–338. – DOI: 10.1109/TCOMM.2005.863728.
12. **Вострецов А.Г., Хайло Н.С.** Синхронизация радиотехнических систем с временным разделением каналов при наличии мешающих отражений // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 11. – С. 37–44. – DOI: 10.21778/2218-5453-2020-11-37-44.
13. On methods to improve time delay estimation for underwater acoustic source localization / B. Patel, S. Vadali, S. Nandy, S.N. Shome // Indian Journal of Geo-Marine Sciences. – 2015. – Vol. 44 (2). – P. 237–244.
14. **Богданович В.А., Вострецов А.Г.** Применение принципов инвариантности и робастности при разработке алгоритмов демодуляции для широкополосных систем связи // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 11. – С. 1353–1361.
15. **Lehmann E.L.** Theory of point estimation. – New York: Wiley, 1983. – 506 с.
16. **Mosteller F.** On some useful “inefficient” statistics // Annals of Mathematical Statistics. – 1946. – Vol. 17 (4). – P. 377–408. – DOI: 10.1214/aoms/1177730881.

ROBUST DETECTION AND ESTIMATION OF WIDEBAND SIGNALS

Khailo N.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

An asymptotically robust invariant (ARI) algorithm for signal detection and time delay estimation is proposed. It is based on the q-point model of noise distributions. The algorithm is based on calculating the correlation statistics of the nonlinear transformation of the observed sample with the vector of reference signal samples. Time delay estimate is determined by special processing of the obtained statistics, taking into account the presence of mirror interference in the observed process. The algorithm is implemented in the frequency domain, which allows the use of the fast Fourier transform to reduce computational costs. The simulation results show that in the case of heavy-tailed noise distributions, ARI algorithm provides an energy gain compared to the classical correlation algorithm, and it has similar performance in the case of Gaussian noise.

Keywords: time delay estimation, a priori uncertainty, detection, noise, robustness.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-90-99

REFERENCES

1. ETSI EN 302 307 V1.1.1 (2004-01), Digital Video Broadcasting (DVB) – second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications, 2004.
2. ETSI EN 301 790 V1.3.1 (2003-03), Digital Video Broadcasting (DVB) – interaction channel for satellite distribution systems, 2003.
3. Young T. Integrated Network Enhanced Telemetry (iNET): impact to the telemetry community for the ettc2018. *Proceedings of the European Test and Telemetry Conference*, Nürnberg, Germany, 26–28 June 2018, pp. 155–161. DOI: 10.5162/ettc2018/8.1.
4. Massey J.L. Optimum frame synchronization. *IEEE Transactions on Communications*, 1972, vol. 20 (2), pp. 115–119. DOI: 10.1109/TCOM.1972.1091127.
5. Gansman J.A., Fitz M.P., Krogmeier J.V. Optimum and suboptimum frame synchronization for pilot-symbol-assisted modulation. *IEEE Transactions on Communication*, 1997, vol. 45 (10), pp. 1327–1337. DOI: 10.1109/26.634696.
6. Choi Z.Y., Lee Y.H. Frame synchronization in the presence of frequency offset. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, vol. 50 (7), pp. 1062–1065. DOI: 10.1109/TCOMM.2002.800815.
7. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with pseudonoise signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p.
8. Gantmakher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. *Shumopodobnye signaly: analiz, sintez, obrabotka* [Pseudonoise signals. Analysis, synthesis, processing]. St. Petersburg, Nauka i tekhnika Publ., 2005. 400 p.
9. Lottici V., D'Andrea A., Mengali U. Channel estimation for ultrawideband communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, vol. 20 (9), pp. 1638–1645. DOI: 10.1109/JSAC.2002.805053.
10. Fei Z., Tiejun Y., Shunji H. TOA estimation algorithm based on multi-search. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2005, vol. 16 (3), pp. 561–565.
11. Carbonelli C., Mengali U. Synchronization algorithms for UWB Signals. *IEEE Transactions on communications*, 2006, vol. 54 (2), pp. 329–338. DOI: 10.1109/TCOMM.2005.863728.
12. Vostretsov A.G., Khailo N.S. Sinkhronizatsiya radiotekhnicheskikh sistem s vremennym razdeleniem kanalov pri nalichii meshayushchikh otrazhenii [Time synchronization for TDMA-based data-transmission radio systems in conditions of multipath fading]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2020, no. 11, pp. 37–44. DOI: 10.21778/2218-5453-2020-11-37-44.
13. Patel B., Vadali S., Nandy S., Shome N.S. On methods to improve time delay estimation for underwater acoustic source localization. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2015, vol. 44 (2), pp. 237–244.

14. Bogdanovich V.A., Vostretsov A.G. Application of the invariance and robustness principles in the development of demodulation algorithms for wideband communications systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, pp. 1283–1291. DOI: 10.1134/S1064226909110072. Translated from *Radiotekhnika i elektronika*, 2009, vol. 54, no. 11, pp. 1353–1361.
15. Lehmann E.L. *Theory of point estimation*. New York, Wiley, 1983. 506 p.
16. Mosteller F. On some useful “inefficient” statistics. *Annals of Mathematical Statistics*, 1946, vol. 17 (4), pp. 377–408. DOI: 10.1214/aoms/1177730881.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Хайло Никита Сергеевич – родился в 1991 году, младший научный сотрудник кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: статистическая теория обработки сигналов в условиях априорной неопределенности. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: xajlo.2009@corp.nstu.ru).

Khailo Nikita Sergeevich (b. 1991) – junior research associate at the department of construction and technology of radio electronic devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the statistical theory of signal processing in condition of a priori uncertainty. He is the author of more than 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: xajlo.2009@corp.nstu.ru).

Статья поступила 06 февраля 2024 г.
Received February 06, 2024

To Reference:

Khailo N.S. Robastnoe obnaruzhenie i otsenivanie shirokopolosnykh signalov [Robust detection and estimation of wideband signals]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 90–99. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-90-99.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 1 (62) январь–март 2024

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 21.03.2024. Выход в свет 26.03.2024. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 8,75. Печ. л. 6,25. Изд. № 25. Заказ № 91. Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20