

ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2021

№ 4 (91)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Декабрь 2021 года

Главный редактор

д.т.н., профессор А.А. Игнатьев

Заместитель главного редактора

д.т.н., профессор Ю.Б. Томашевский

Ответственный секретарь

к.т.н., доцент И.В. Злобина

Технический секретарь

к.т.н., доцент В.О. Горбачев

Редакционная коллегия:

Д.т.н., проф. А.Н. Васин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.ф.-м.н., проф. С.Б. Вениг (СНИГУ имени Н.Г. Чернышевского)

Д.ф.-м.н., проф. М.В. Жигалов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.Е. Зверовщиков (ПГУ)

К.т.н. А.А. Казинский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.В. Королёв (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)

Д.т.н., проф. А.А. Львов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. Т.Г. Насад (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. А.Ф. Резчиков (ИПУ РАН)

Д.т.н., проф. И.В. Родионов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.ф.-м.н., проф. М.Д. Старостенков (АлГТУ)

Чл.-корр. РАО, д.т.н., проф. А.А. Сытник (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А.А. Фомин (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Д.т.н., проф. А. Аман (Германия)

Д.т.н., проф. Р. Крехел (Словакия)

Д.т.н., проф. В. Хардт (Германия)

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Т.В. Семеновой

Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Адрес редакции:

Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77, к. 25/615

Телефон: 8 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 23.12.2021 Дата выхода в свет 27.12.2021

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 12,25 Уч.-изд. л. 4,0

Тираж 500 экз. Заказ 75

Отпечатано в Издательстве СГТУ

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Полная электронная версия журнала

размещена в системе РИНЦ

в открытом доступе на платформе

eLIBRARY.RU

Свидетельство о регистрации средства массовой информации **ПИ № ФС 77-65155** от 28 марта 2016 г.

© Саратовский государственный
ISSN 1999-8341 технический университет, 2021

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2021

№ 4 (91)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

December 2021

Editor-in-chief

Professor A.A. Ignatiev

Editor-in-chief assistant

Professor Yu.B. Tomashevsky

Executive secretary

PhD, Associate Professor I.V. Zlobina

Technical secretary

PhD, Associate Professor V.O. Gorbachev

Editorial board:

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

Dr. Sc., Professor S.B. Venig (SSU)

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

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

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

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

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

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

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

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

Corresponding member of RAS, Dr. Sc., Professor
A.F. Rezchikov (ISP RAS)

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

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

Corresponding member of RAE,

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

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

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

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

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

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering A.H. Askarova

Editorial office: 25/615 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054 Russia

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

E-mail: vestnik@sstu.ru

Print date: 23.12.2021. Date of publication 27.12.2021

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 12,25

Publication base sheet 4,0

Circulation: 500 printed copies

Order 75

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

eLIBRARY.ru

© Yuri Gagarin State Technical

ISSN 1999-8341

University of Saratov 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Акутин А.С., Бровко А.В.**
СИСТЕМА СУВЕРЕННОЙ ЛИЧНОСТИ
НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЕСТРА ДАННЫХ 5
- Игнатьев С.А.**
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
В ЗДРАВООХРАНЕНИИ И МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ 13
- Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б.,
Магомедова М.К., Губайдулин Р.**
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ
ПРЕТЕНДЕНТОВ НА ЗАМЕЩЕНИЕ ВАКАНТНОЙ ДОЛЖНОСТИ 26
- Симонов П.В., Игнатьев А.А.**
МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НАЛИЧИЯ ТРЕЩИН В КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛАХ 42
- Файфель Б.Л.**
ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧИСЕЛ ФИБОНАЧЧИ
С ПОМОЩЬЮ ФОРМУЛЫ БИНЕ 51

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Жуков А.В., Никифоров А.А., Яковишин А.С.**
ПЛАСТМАССЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (обзор) 57
- Насад Т.Г., Насад И.П., Шеров К.Т.**
МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ 71

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Маркелова О.А., Пичхидзе С.Я.**
СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ
ПОРОШКОВ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ КАЛЬЦИЙФОСФАТОВ 79
- Сефералиев Э.Т., Давыдова А.Р., Барабанова Е.В.,
Гоц И.Ю., Лукьянова В.О., Барабанов С.Н.**
ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА AL-CE-N,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КАТОДНОГО ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ 87

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND MANAGEMENT

Akutin A.S., Brovko A.V. SELF-SOVEREIGN IDENTITY SYSTEM BASED ON BLOCKCHAIN-BASED REGISTRY	5
Ignatiev S.A. SYSTEM APPROACH TO INFORMATION SYSTEMS IN HEALTHCARE AND MEDICAL EDUCATION.....	13
Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu.B., Magomedova M.K., Gubaidulin R. A METHODOLOGY FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF APPLICANTS COMPETING FOR VACANT POSTS	26
Simonov P.V., Ignatiev A.A. NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES USED TO DETERMINE CRACKS IN CRANKSHAFTS	42
Fayfel B.L. A WAY TO CALCULATE FIBONACCI NUMBERS USING BINET'S FORMULA.....	51

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Zhukov A.V., Nikiforov A.A., Yakovishin A.S. PLASTIC MATERIALS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES (review).....	57
Nasad T.G., Nasad I.P., Sherov K.T. METHODOLOGY FOR ANALYSIS OF TEMPERATURES IN THE CUTTING ZONE WHEN PROCESSING HARD-TO-MACHINE MATERIALS	71

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Markelova O.A., Pichkhidze S.Ya. STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PLASMA COATINGS BASED ON CALCIUM PHOSPHATE METAL-CONTAINING POWDERS.....	79
Seferaliev E.T., Davydova A.R., Barabanova E.V., Gots I.Yu., Lukyanova V.O., Barabanov S.N. DEPENDENCE OF MICROHARDNESS OF THE AL-CE-H ALLOY OBTAINED BY THE METHOD OF CATHODIC HYDROGEN SATURATION UNDER VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS	87

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.75

А.С. Акутин, А.В. Бровко

СИСТЕМА СУВЕРЕННОЙ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЕСТРА ДАННЫХ

Аннотация. Развитие распределенных приложений и технологии блокчейн дает возможность создавать концептуально новые системы идентификации и хранения личности. В большинстве существующих информационных систем задача хранения данных о конкретном пользователе решается средствами и ресурсами производителей определенной информационной системы. В данной статье рассматривается принципиально новый способ решить проблему хранения пользовательских данных, который позволит отдать данные клиентов в руки самих клиентов. В работе представлена базовая реализация системы суверенной личности, которая сможет послужить основой для создания информационных систем любой сложности. Стандартный механизм может выполнять задачи хранения пользовательских данных и подписи документов.

Ключевые слова: децентрализованное, ориентированное на пользователя шифрование на основе идентификационных данных, блокчейн, автономная система идентификации

A.S. Akutin, A.V. Brovko

SELF-SOVEREIGN IDENTITY SYSTEM BASED ON BLOCKCHAIN-BASED REGISTRY

Abstract. Development of modern distributed applications and blockchain technology allow for users to create new types of identity management systems. In most of information systems data storage issues are resolved by developers of certain information system based on their resources. In the article we are looking for new ways to store user data that will allow clients manage their own data. In the given research we present the basic implementation of the

self-sovereign identity system that can serve as the basis for creating information systems with high complexity. A standard mechanism could store data and sign documents

Keywords: *decentralized, user-centric identity based encryption, blockchain, Self-Sovereign Identity System*

ВВЕДЕНИЕ

Подход, при котором разработчик хранит данные пользователей у себя, хорошо себя зарекомендовал и позволяет оперативно реагировать на все события, происходящие внутри системы. Однако ситуация, когда вся информация о клиенте хранится на серверах владельцев программного обеспечения, накладывает такие ограничения, как: инертность владельцев системы, ошибки в ПО или при использовании ПО, сбой серверов, на которых расположены эти данные. Достаточно легко представить себе ситуацию, когда сервер банка недоступен, и просто физически невозможно провести платеж. А если ошибка в банковских системах антифрода определила законопослушного гражданина как мошенника, то процесс возвращения клиентом доступа к личному кабинету и деньгам может затянуться на месяцы.

Для решения указанных проблем был разработан прототип системы суверенной личности (Self Sovereign Identity System) [1], которая основана на идеях распределенного реестра данных в виде блокчейна.

Децентрализация важнейших процессов нашей жизни, таких как, например, оплата, в последние годы зарекомендовала себя как перспективный подход. Криптовалюты давно вошли в привычную нам жизнь и широко используются в различных областях бизнеса и других сферах деятельности.

Говорить о состоятельности криптовалют и противопоставлять их фиатным валютам можно долго, однако одно можно сказать наверняка – блокчейн как реестр данных жизнеспособен и доказал это всему цифровому миру. Выделяя лучшее из самых спорных разработок, основой описываемого прототипа послужил именно блокчейн – децентрализованный цифровой реестр, который позволяет потенциально решить любую проблему, связанную с хранением и обработкой персональных данных.

В созданной разработке можно выделить два глобальных механизма, тонкости реализации которых подробно будут рассмотрены в разделе 2. Этими двумя механизмами являются сам блокчейн и приложение, которое работает с ним, позволяя выполнять различные операции. В самом прототипе реализована одна важнейшая операция – цифровая подпись. Подпись документов, подтверждающая любое решение на уровне организации, является важнейшим механизмом, который движет практически все внутренние процессы крупных корпораций. На примере этого механизма мы рассмотрим реализацию системы суверенной личности и измерим производительность.

Анализ опубликованных работ в указанной области показывает, что была лишь разработка шифрования на основе суверенной личности [2]. В указанной работе представлен распределенный реестр и реализована возможность создать аутентификацию на основе блокчейна.

К сожалению, процесса аутентификации не хватает для того, чтобы начать эксплуатировать подобную систему. По этой причине в ходе разработки описываемого прототипа было принято решение пойти дальше и решить некоторую прикладную задачу, а именно создать возможность подписывать документы, используя систему. Таким образом, существенным отличием данной работы от прототипа в работе [2] является наличие прикладной задачи, решаемой в рамках предметной области.

РЕАЛИЗАЦИЯ

Реестр данных

В качестве распределенного реестра данных в разработанном прототипе выступает блокчейн. С развитием криптовалют появилось множество технических реализаций блокчейна, которые можно использовать. Во многих проектах [2, 3] используется сеть Ethereum, которая достаточно интересна с точки зрения реализации и предоставляет множество технических решений «из коробки». В данной работе авторы решили отойти от традиционного решения проблемы распределенного реестра, поскольку в сети Ethereum сложность майнинга существенно возрастает со временем и требуются большие вычислительные ресурсы для поддержания функционирования сети.

В рамках разработанного прототипа была собственная реализация сети блокчейн, которая реализована на языке программирования Python 3 версии. В любой блокчейн сети должна существовать защита от злоупотребления мощностями системы, некий алгоритм, который позволит доказать состоятельность транзакции. В существующей реализации используется алгоритм доказательства работы (Proof of Work), который подбирает результат хеш-функции SHA256 на основе предыдущего блока так, чтобы последние 4 цифры хеша были нулями. Реализация проста и не будет увеличивать сложность майнинга со временем.

Для того чтобы взаимодействовать с блокчейн-сетью, было реализовано API на фреймворке Flask, с помощью которого можно создавать новые транзакции и производить операции создания нового блока (майнинг). Соблюдая уже реализованные контракты, можно использовать любую другую реализацию блокчейна на выбор, от этого процесс функционирования приложения не изменится.

Приложение

Приложение состоит из 3 основных модулей, которые представляют собой 3 веб-сервиса, обменивающихся сообщениями по протоколу https. Все 3 сервиса реализованы

на платформе NodeJS v14. Эта платформа хорошо себе зарекомендовала в реализации прототипов похожих систем [3, 4]. Схематично процесс обмена сообщениями и связи можно увидеть на рис. 1.

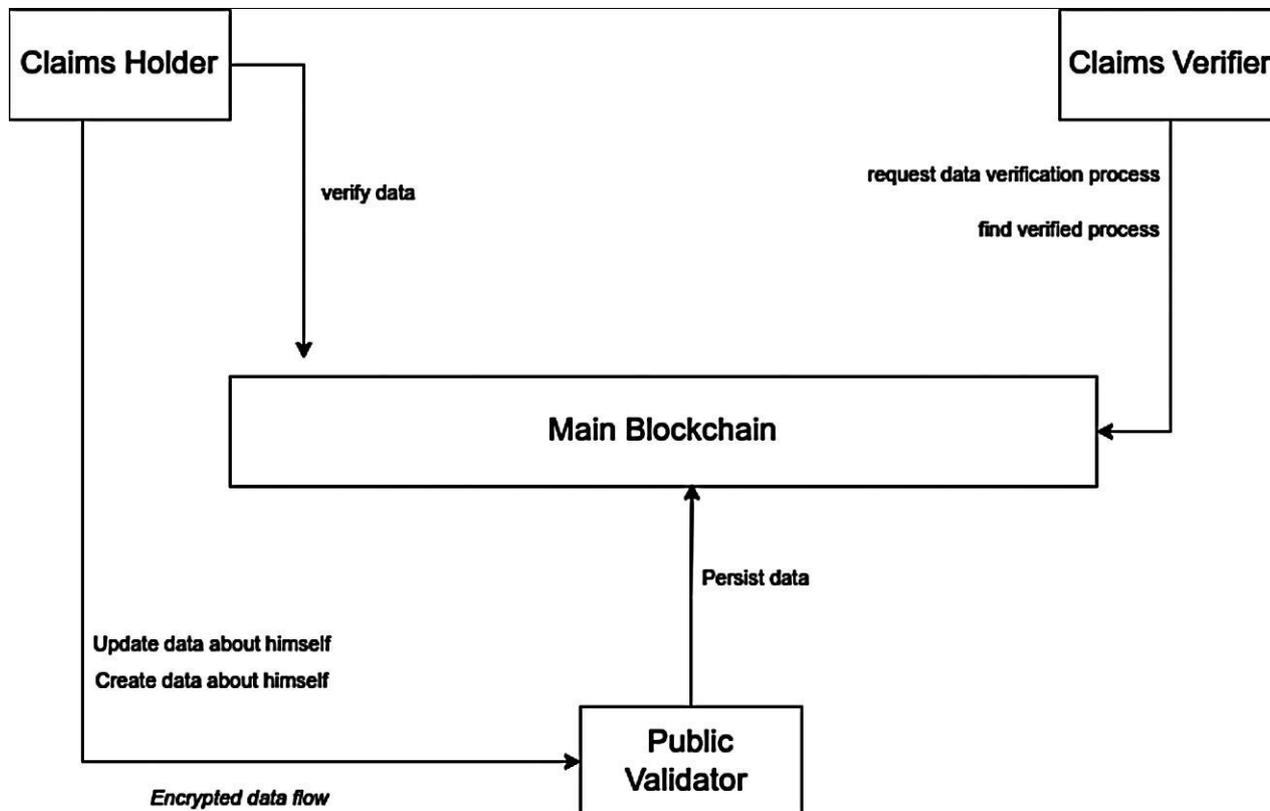


Рис. 1. Схема информационных потоков

Опишем части более подробно.

Main Blockchain – распределенный реестр данных, о котором было подробно сказано в предыдущем пункте.

Public Validator – некая официальная структура, которая представляет собой приложение с базой данных, содержащей сведения об участниках сети. Поскольку мы не рассматриваем ситуацию, в которой участники сети полностью предоставлены сами себе, должен быть узел всей системы, который должен проводить изначальную верификацию предоставленных данных. Говоря о примере подписи документов рамках определенной компании, можно с уверенностью заявить, что компания захочет иметь только подписи людей, которые в ней работают.

В рамках прототипа модуль, означенный как Public Validator, выполняет добавление участника к сети (регистрации) и верифицирует, что подобный человек действительно существует в организации, которая использует систему. В рамках этого модуля существует локальная база данных, которая проводит проверку добавляемых данных о клиентах.

Claims Holder – это непосредственно клиент системы, который владеет собственной цифровой личностью и данными о себе. Для того чтобы стать полноправным участником системы суверенной личности, нужно пройти процедуру верификации с использованием предыдущего модуля. После этого клиент сможет выполнять процедуру подписи документа.

Claims Verifier – модуль, который будет использоваться для того, чтобы верифицировать процесс подписания документа, а также инициировать его. В разработанном прототипе возможно при помощи описываемого модуля создать запрос на подпись определенного документа, который имеет форму согласно внутреннему регламенту той организации, в которой потенциально будет использоваться разработанная система, а после подписи документа клиентом – верифицировать этот процесс.

Все стадии процессов отображаются в сети блокчейн, при необходимости любого рода проверки возможно найти необходимую транзакцию и подтвердить, что человек действительно выполнил процесс подписи. Таким образом, любая организация сможет легко избавиться от множества бумажной работы, а процесс подписи документов сделать прозрачным, проверяемым и удобным. И все данные будут находиться в руках самих клиентов, что при условии использования децентрализованного реестра позволит избавиться от множества часов простоев производства и документооборота.

БЕЗОПАСНОСТЬ

Всегда, говоря о пользовательских данных, встает вопрос о безопасности. Сохранность данных в системе суверенной личности должна обеспечиваться наивысшим образом. С одной стороны, мы отдаем данные клиента под ответственность клиента, что снимает с владельца системы определенные заботы. С другой стороны, чтобы пользователи чувствовали себя защищенными, а владельцы организаций, решившие внедрить у себя современный подход хранения личности, не переживали об информационной целостности своей компании, необходимо создать в системе все условия для безопасного обмена данными.

Первое, о чем однозначно стоит упомянуть, – это защищенный протокол `https`, на основе которого происходит вся коммуникация в сети. Безопасность протокола обеспечивается асимметричным шифрованием, а также сертификатами. Обмен ключами происходит на основании протокола Диффи – Хеллмана, что уже само по себе уменьшает риски системы в разрезе информационной безопасности.

Второй немаловажной особенностью взаимодействия между частями системы является JWT-токен, который обеспечивает идентификацию и аутентификацию между различными модулями приложения [5]. Токен, принцип действия которого основан на асимметричном шифровании, хорошо зарекомендовал себя в современных промышленных информационных системах.

Третьей важнейшей частью, обеспечивающей безопасность системы, является тот факт, что основная информация, передаваемая владельцем личности, состоит в цифровой подписи, которая представляет собой результат хеширования данных алгоритмом SHA256, который после закодирован алгоритмом Base64. Даже если данные будут перехвачены, то злоумышленник не сможет добыть сколь-либо значимую информацию.

Ко всему вышесказанному можно добавить, что система позиционируется как автономное решение и может быть развернута в рамках приватной корпоративной сети, если использование подразумевается внутри закрытой организации. Добавление дополнительного слоя защиты в виде закрытой сети и доступа по VPN лишь уменьшит риски, связанные с информационной безопасностью.

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Анализируя производительность созданной системы, можно выделить сотни параметров, по которым можно судить о созданном ПО как о жизнеспособном. Существенным отличием разработанного прототипа от других систем выступает блокчейн как распределенный реестр хранения данных. Основной причиной деградации системы как ПО, выполняющего реальную задачу, может являться возрастающая сложность майнинга, процесса добычи нового блока и записи транзакций в существующую сеть.

Для того чтобы оценить существующие возможности системы, было проведено нагрузочное тестирование на сеть блокчейн. Последовательно друг за другом вызывались операции создания новой транзакции, а после – создания нового блока – две операции, включающие процедуры хеширования и работы алгоритма Proof of Work. Время измерялось на выполнение ста транзакций. В качестве машины, на которой проводились измерения, выступал персональный компьютер с 16 Гб оперативной памяти и процессором Intel Core I7 10 поколения. Результаты измерения можно видеть на рис. 2.

Замеры проводились двумя способами – последовательным выполнением запросов и параллельным выполнением запросов в 5 потоков. Во втором случае система не деградировала и показывала стабильные результаты вычисления новых блоков и записи транзакций в сеть. Неровности и пороги на графике объясняются скачущим интервалом построения графика, поскольку достаточно трудно задать абсолютно все точки, поэтому было принято решение пожертвовать внешним видом графика в угоду его репрезентативности.

Таким образом, на 100 транзакций мы имеем от 10 до 15 с времени выполнения. Это означает результат порядка 0,10-0,15 с на 1 транзакцию, на 200 тысяч запросов ухудшение производительности произошло лишь на 0,05 с. К этим результатам можно добавить погрешность сети и случайные аппаратные сбои процессора.

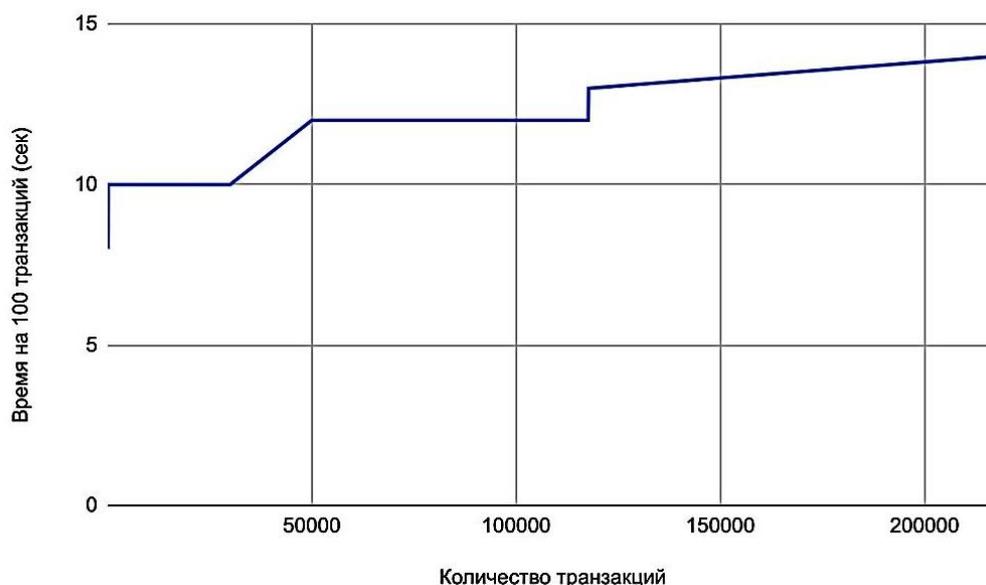


Рис. 2. Результаты тестирования производительности системы

Ожидая линейную прогрессию усложнения майнинга, можно вычислить, что к 2 млн запросов 1 транзакция будет занимать около 0,5-1 с, что с запасом покрывает нужды коммерческих организаций, желающих перенести процедуры по подписи документов на платформу суверенной личности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система является базовой реализацией, она может быть масштабирована до любого размера и модифицирована для выполнения любых прикладных задач. Подпись документов является несущей функцией для многих организаций, а перевод этого процесса в цифровое пространство позволит существенно сократить усилия, затрачиваемые на бумажную работу. Ответственность за хранение информации лежит на клиентах этой системы, что может существенно повысить уровень ответственности работников и снизит риски мошенничества для организаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Verifiable Credentials W3C Specification. 2020 Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/vc-data-model/> (дата обращения: 05.12.2021)
2. D. Nancy Kirupanithi, Dr. A. Antonidoss Self-Sovereign Identity creation on Blockchain using Identity based Encryption // Proceedings of the Fifth International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS 2021), 2021, pp. 299-304.

3. Design Pattern as a Service for Blockchain-Based Self-Sovereign Identity / Yue Liu, Qinghua Lu, Hye-Young Paik, Xiwei Xu, Shiping Chen, Liming Zhu // IEEE Software, Volume 37, Issue 5, Sept. – Oct. 2020. pp. 30-36.

4. Andreas Grüner, Alexander Mühle and Christoph Meinel. ATIB: Design and Evaluation of an Architecture for Brokered Self-Sovereign Identity Integration and Trust-Enhancing Attribute Aggregation for Service Provider // IEEE Access, Vol. 9, 2021, pp. 138553-138570.

5. RFC7519 (JSON WEB TOKEN specification). 2020 URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519> <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519> (дата обращения: 05.12.2021)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акутин Артем Сергеевич – ассистент и магистрант кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artem S. Akutin – Assistant Lecturer, Master student, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бровко Александр Валерьевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладные информационные технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander V. Brovko – Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Department of Applied Information Technologies, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.11.21, принята к опубликованию 06.12.21

С.А. Игнатьев

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
В ЗДРАВООХРАНЕНИИ
И МЕДИЦИНСКОМ ОБРАЗОВАНИИ**

Аннотация. Рассматривается вопрос применения системного подхода к организации медицинской информационной системы лечебно-профилактического учреждения в виде взаимосвязанных подсистем различного функционального назначения.

Ключевые слова: медицинская информационная система, системный подход, классификация, подсистемы

S.A. Ignatiev

**SYSTEM APPROACH TO INFORMATION SYSTEMS
IN HEALTHCARE AND MEDICAL EDUCATION**

Abstract. The article deals with application of system approach to the development of medical information systems for medical and preventive treatment institutions organized as interconnected subsystems which may be affected by the functionality.

Keywords: medical information system, system approach, classification, subsystems

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных условий развития страны, как подчеркнул президент РФ Владимир Путин в своем Указе [1], а также в выступлениях с ежегодными посланиями Федеральному Собранию в 2019 и 2020 годах, является интенсивное внедрение цифровых технологий во все отрасли производства, науки и образования. Указанное в значительной степени касается медицинских организаций и медицинских образовательных учреждений, где в соответствии со специальным федеральным законом № 242-ФЗ реализуются сразу несколько программ и проектов по применению информационных технологий (ИТ) в сфере здравоохранения, так что внедрение ИТ способствует более высокому уровню развития системы здравоохранения. Следовательно,

основной целью применения ИТ в медицине является повышение качества охраны здоровья населения за счет использования возможностей современной компьютерной техники.

Информационные процессы являются необходимым компонентом медицины и здравоохранения в целом. От уровня их взаимодействия, наличия вертикальных и горизонтальных связей, информативности и достоверности зависит как эффективность управления отраслью и, соответственно, эффективность ее функционирования. Важность применения ИТ подчеркивается тем, что вопросы информатизации выделены в проекте «Концепция развития системы здравоохранения в Российской Федерации до 2020 г.» [2]. Указанное обусловлено двумя основными задачами, стоящими перед информационными системами в медицине: информационная поддержка оказания медицинской помощи населению и информационная поддержка управления отраслью здравоохранения [3-5]. От эффективности внедрения ИТ в медицине уже в настоящее время, а в ближайшем будущем ещё в большей степени будет зависеть не только уровень здравоохранения в стране в целом, но и здоровье каждого человека, а следовательно, и уровень процветания всей нации.

Интенсивное внедрение ИТ в здравоохранении направлено на создание единого информационного пространства (ЕИП) медицинских организаций различного уровня, что создает условия, во-первых, для организации мониторинга их деятельности по различным направлениям, который способствует повышению прозрачности работы медицинских учреждений, контролю эффективности принимаемых управленческих решений, анализу экономических аспектов оказания медицинской помощи, во-вторых, для существенного сокращения сроков обследования и лечения пациентов, в-третьих, для применения телемедицины.

Принимая во внимание изложенное, большинство лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) нашей страны достаточно широко используют комплексные медицинские информационные системы (МИС) [6-8]. Эти системы представляют собой универсальные или специальные программные продукты, позволяющие на качественно новом уровне и новыми возможностями оказывать медицинские услуги, организовать деятельность медучреждения и осуществлять руководство отраслью в целом. Исходя из изложенного, научный и практический интерес представляет применение системного подхода к организации МИС лечебно-профилактического учреждения.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Существенным преимуществом МИС является переход от локальной работы с медицинской информацией к взаимодействию с интегрированной системой, где все входные и выходные данные, а также данные, формируемые в данном ЛПУ, концентрируются в еди-

ной информационной среде (ЕИС). В этом случае возможна полная реализация безбумажной технологии, но сохраняется возможность получения «твердой копии» любого документа. Информационные системы (ИС) различных медицинских учреждений являются основными звеньями в информатизации здравоохранения, в силу чего целесообразно рассмотреть их классификацию, которая может быть основана на различных признаках (рис. 1).

По назначению МИС делятся на три группы:

1) системы, основной функцией которых является накопление данных и знаний в компьютере как средстве надежного хранения профессиональных знаний, обеспечивающем доступный и быстрый поиск необходимых сведений, обработку и использование информации, что является основой создания информационной среды;

2) диагностические и консультирующие системы, решающие задачу поддержки принятия решений в сложных и спорных ситуациях;

3) системы, обеспечивающие медицинское обслуживание, в рамках которого с использованием возможностей современных вычислительных средств определяются различными методами важные физиологические функции.

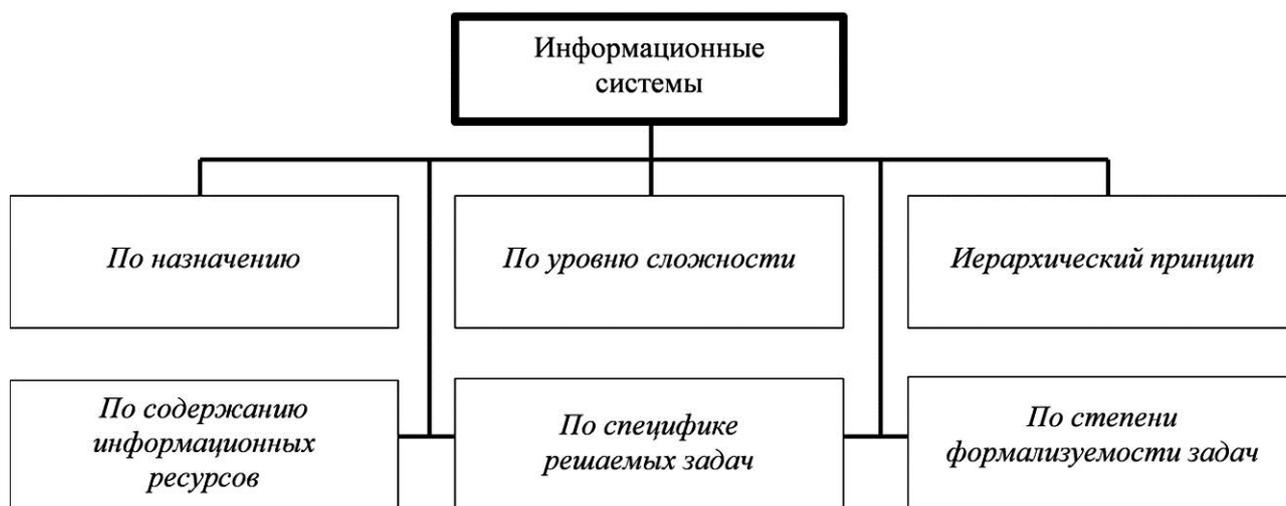


Рис. 1. Классификация медицинских информационных систем по различным признакам

По уровню сложности все компьютерные системы и здравоохранении независимо от назначения делятся на следующие уровни:

– автоматизированные системы обработки данных и/или информации (АСОД и АСОИ), которые помогают в выполнении вычислительных работ, т. е. делают арифметические операции, преобразуя исходные данные/информацию;

– автоматизированные информационные и информационно-справочные системы (АИС и АИСС), назначением которых являются обработка, хранение и поиск документов, сведений о документах, отдельных фактов и другой информации;

– автоматизированные системы управления (АСУ) связаны с внедрением информационно-справочных систем, с помощью которых часть информации используется в работе и обрабатывается в компьютере по заданным программам и затем используется при выполнении различных функций;

– экспертные системы (ЭС) – для подготовки вариантов и выбора решений.

Иерархический принцип классификации МИС соответствует многоуровневой структуре здравоохранения в стране, при этом системы каждого уровня классифицируют по функциональному принципу (по решаемым задачам).

1. Базовый (клинический) уровень. ИС реализуют информационную поддержку работы врачей различного профиля для повышения ее эффективности, особенно в условиях недостатка некоторых квалифицированных специалистов. По решаемым задачам выделяют:

- информационно-справочные системы (предназначены для поиска и выдачи медицинской информации по запросу пользователя),
- консультативно-диагностические системы (для диагностики патологических состояний, включая прогноз и выработку рекомендаций по способам лечения при заболеваниях различного профиля),
- приборно-компьютерные системы (для информационной поддержки и/или автоматизации диагностического и лечебного процесса, осуществляемых при непосредственном контакте с организмом больного),
- автоматизированные рабочие места специалистов (для автоматизации всего технологического процесса врача соответствующей специальности и обеспечения информационной поддержки при принятии диагностических и тактических врачебных решений).

2. Уровень ЛПУ (поликлиники, стационары, диспансеры, скорая помощь). ИС представлены следующими основными группами:

- ИС консультативных центров (предназначены для обеспечения функционирования соответствующих подразделений и информационной поддержки врачей при консультировании, диагностике и принятии решений при неотложных состояниях),
- банками информации медицинских служб (содержат сводные данные о качественном и количественном составе работников учреждения, прикрепленного населения, основные статистические сведения, характеристики районов обслуживания и другие необходимые сведения),
- персонифицированными регистрами (содержат информацию на прикрепленный или наблюдаемый контингент на основе формализованной истории болезни или амбулаторной карты),
- скрининговыми системами (для проведения доврачебного профилактического осмотра населения, а также для выявления групп риска и больных, нуждающихся в помощи специалистов),

• ИС лечебно-профилактического учреждения (основаны на объединении всех информационных потоков в единую систему и обеспечивают автоматизацию различных видов деятельности учреждения),

• информационными системами НИИ и медицинских вузов (решают три основные задачи: информатизация технологического процесса обучения, научно-исследовательской работы и управленческой деятельности учреждения).

3. Территориальный уровень (профильные и специализированные медицинские службы и региональные органы управления). ИС этого уровня представлены следующими группами:

• ИС территориального органа здравоохранения;

• ИС для решения медико-технологических задач, обеспечивающие информационной поддержкой деятельность медицинских работников специализированных медицинских служб;

• компьютерные телекоммуникационные медицинские сети, обеспечивающие создание ЕИС на уровне региона.

4. Государственный уровень (государственные учреждения и органы управления). На этом уровне МИС обеспечивают информационную поддержку при принятии важных решений для системы здравоохранения в целом.

По содержанию информационных ресурсов МИС можно разделить на следующие группы:

• результаты лабораторных диагностических исследований;

• электронные истории больных;

• стандарты диагностики и лечения больных;

• экспертные системы;

• базы данных по лекарственным препаратам;

• базы данных материальных ресурсов;

• базы данных трудовых ресурсов;

• финансово-экономическая информация.

Специфика решаемых задач ИС в здравоохранении в пределах каждого уровня управления позволяет классифицировать их по следующим функциональным признакам:

• административные медицинские системы;

• поисковые ИС;

• системы для лабораторно-диагностических исследований;

• экспертные системы;

• больничные медицинские ИС;

• АРМ (автоматизированные рабочие места специалистов);

• телемедицинские системы.

Еще одним признаком классификации ИС может служить *степень формализуемости (структурированности) задач*, которые возникают в процессе работы ЛПУ, причем эти задачи следует разделить на три класса: структурированные (формализуемые), неструктурированные (неформализуемые) и частично структурированные. Соответственно, эффективность работы ИС в ЛПУ в значительной степени зависит не только от понимания сотрудниками задач, для решения которых и создана конкретная ИС, но и от квалифицированного ее использования.

К формализуемым задачам можно отнести задачи, которые решаются по вполне определенным алгоритмам, например экономические расчеты, связанные с деятельностью ЛПУ, расчет заработной платы, потребность и наличие лекарственных средств и т. п. Программное обеспечение для выполнения этих задач несложное и недорогое. Отдельными задачами являются, во-первых, создание и поддержка баз данных ЛПУ, во-вторых, организация архивирования и хранения информации, для которых требуется специальное программное обеспечение с высоконадежной защитой от несанкционированного доступа и надежным функционированием при аварийном отключении электропитания.

При решении указанных задач ИС в ЛПУ обеспечивает автоматизацию документооборота, повышение комфортности и надежности работы медицинского персонала и эффективность работы ЛПУ в целом.

К частично формализуемым задачам можно отнести такие, в которых алгоритмизировать можно только определенную часть решения, выполняемую с помощью компьютера, а далее завершение решения выполняется высококвалифицированным в данном вопросе специалистом. Задачи подобного типа наиболее распространены в медицине, примером чего могут служить управленческие задачи, связанные с анализом большого объема формализованных данных, на основе которого лицо, принимающее решение, формулирует тот или иной вывод. ИС такого типа используются, например, при составлении отчетов. Имеющееся программное обеспечение позволяет обработать данные с помощью определенных алгоритмов, а рассмотрение возможных вариантов решений и выбор из них наиболее целесообразного для конкретной ситуации выполняются ЛПР.

К неформализуемым задачам относятся те, для решения которых нет готовых алгоритмов, позволяющих обработать те или иные данные и сформулировать управляющее решение. Эти задачи наиболее сложные, и для их решения применяется специальный класс ИС – экспертные системы (ЭС) [9]. ЭС представляет собой специальное программное обеспечение, основным элементом которой является база знаний, в которой аккумулируются знания высококлассных специалистов в рассматриваемой области

(ученые и специалисты-практики), выступающих в роли высокопрофессиональных экспертов. При создании ЭС в последние годы стали использоваться нейронные сети, являющиеся в определенной степени аналогом головного мозга человека, что позволяет существенно расширить возможности ЭС, в том числе входящих в МИС.

Следует отметить, что применяемые МИС могут содержать признаки, относящиеся к различным группам ИС из приведенной выше классификации. Это свидетельствует о том, что достаточно сложно однозначно классифицировать МИС в силу того, что они постоянно развиваются, причем это затрагивает как структуру, так и их функции.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МИС

В медицинских учреждениях России в настоящее время используются более двадцати МИС, отличающихся функциями, техническим и программным обеспечением, удобством взаимодействия с пользователем и ценой [6, 7]. К наиболее развитым МИС относятся «MedWork», «БАРС.Мед», «Медиалог», «MGERM», «Здравоохранение» и ряд других. Они позволяют автоматизировать учет пациентов и их распределение по врачам, формирование документации и выполняют ряд других функций, однако имеют ряд недостатков, связанных с интерфейсом пользователя, недостаточными возможностями используемых компьютеров, а также отсутствием профессиональной поддержки их функционирования специалистами-системотехниками.

Последнее особенно важно, так как разработчики МИС чаще всего представляют программное обеспечение своей системы как вполне законченное, хотя на практике возникают новые задачи и изменяются требования к МИС, что требует как изменения программного обеспечения, так и применения новой компьютерной техники с более расширенными возможностями. Из изложенного следует, что разработка и практическое применение МИС сталкиваются с определенными трудностями; это связано с тем, что МИС рассматривается в основном только как специальное программное обеспечение, в то время как она представляет собой систему, включающую ещё и техническую базу, и подготовленный персонал. Указанное, видимо, обусловлено недостаточной проработкой методологических аспектов создания эффективных МИС. Для более четкого представления МИС как сложной системы предлагается в структуре МИС на уровне ЛПУ выделить четыре основные подсистемы: организационного обеспечения, технического обеспечения, научно-методического обеспечения, информационного обеспечения (рис. 2). Системный подход позволяет более полно представить взаимодействие всех компонент МИС, причем не только на уровне ЛПУ, но и с внешними структурами другого иерархического уровня, что позволяет использовать указанное как на этапах разработки МИС, так и на этапе их практического применения.



Рис. 2. Системный подход к организации информационной системы лечебно-профилактического учреждения

Подсистема организационного обеспечения. В ее структуру входят представители аппарата управления учреждением, ответственные за качество медицинского обслуживания, сотрудники из состава медицинского персонала, ответственные за подготовку задач, подлежащих решению с помощью МИС, а также специалисты по программному обеспечению. В этой подсистеме анализируется вся входная и выходная информация о работе ЛПУ, поступающая из подсистемы информационного обеспечения, принимаются общие решения по структуре документооборота (как в электронной форме, так и в виде твердых копий), анализируются экономические аспекты деятельности учреждения и т. п. В рамках подсистемы составляется четкая регламентация взаимодействия медицинского персонала с пациентами, сотрудников лечебного учреждения с техническими средствами, а также для персонала устанавливаются организационно-правовые нормы работы в информационной системе, которые закрепляются соответствующим распоряжением администрации ЛПУ.

Подсистема технического обеспечения включает в свой состав, во-первых, специалистов по аппаратному обеспечению и эксплуатации информационной системы и специалистов из числа медицинского персонала, прошедших переподготовку по ИТ, что обеспечивает надежное функционирование ИС; во-вторых, комплекс технических средств: компьютеры, устройства ввода и вывода информации, электронные архивы, линии связи, разнообразную оргтехнику, а также различную медицинскую диагностическую аппаратуру. Сложность и объем технического обеспечения зависят от величины и профиля ЛПУ, а также от наличия у учреждения финансовых ресурсов.

Подсистема научно-методического обеспечения необходима для разработки методических основ применения ИТ для решения задач в области здравоохранения с использованием МИС и технологии практического применения информационной системы. Кроме того, в рамках подсистемы формируется математическое и программное обеспечение в виде совокупности системных, служебных и прикладных программ, математических моделей и алгоритмов, необходимых для решения профессиональных задач. Предусматривается наличие как специальных медицинских программных средств и программного обеспечения общего, в основном офисного назначения, так и специального программного обеспечения для обработки диагностической информации. Здесь также упорядочивается методология построения всех баз данных как медицинского, так и немедицинского характера, а также накопления информации для построения баз знаний, которые в дальнейшем могут быть использованы для создания экспертной системы. Для решения указанных задач привлекаются высококвалифицированные специалисты-медики, математики и специалисты по системотехнике и программному обеспечению.

Подсистема информационного обеспечения осуществляет сбор и обработку информации, создание баз данных, формирование электронного документооборота в учреждении. В рамках подсистемы создается единая для всего ЛПУ классификация

и кодирование информации, унификация всей документации: историй болезни, карт амбулаторного больного, учетно-статистических документов, протоколов различных диагностических исследований и др.

На основе существующих стандартов и протоколов передачи данных создается единая для всех подразделений ЛПУ схема взаимодействия информационных потоков. На практике в реализации информационного обеспечения, помимо медицинского персонала, владеющего знаниями по ИТ, ведущая роль отводится специалистам по программному обеспечению и системотехнике. На основе данных из информационной подсистемы и подсистемы научно-методического обеспечения формируются управляющие решения по повышению качества медицинского обслуживания.

Внедрение ИТ в медицинских учреждениях и практическая реализация МИС имеют положительный эффект с точки зрения как организации лечебного процесса, так и информационной обеспеченности всех участников системы здравоохранения.

Положительный эффект для пациента заключается, во-первых, в существенном сокращении времени нахождения у процедурных и диагностических кабинетов и в очереди к врачу, а также времени получения диагностических данных, что повышает оперативность принятия решения врачом и эффективность лечения; во-вторых, в увеличении времени взаимодействия пациента с врачом за счет автоматизации подготовки документов; в-третьих, в существенном сокращении времени на получение результатов лечения и выписного эпикриза в печатном или электронном виде.

Положительный эффект для лечащего врача заключается: во-первых, в концентрации информации об истории болезней пациента за все время наблюдения в базе данных и оперативность ее получения за заданный период времени; во-вторых, в минимизации времени и значительном расширении возможностей поиска справочных данных; в-третьих, в возможности получения информации из аптечного склада ЛПУ о наличии лекарственных средств; в-четвертых, в существенном снижении времени на оформление документации о прохождении лечения за счет ее автоматизации.

Положительный эффект для министерства здравоохранения базируется на эффективном использовании ЕИП и мониторинге деятельности различных учреждений здравоохранения на основании анализа данных, поступающих из регионов РФ, что обеспечивает обоснованное и оперативное принятие и реализацию важных стратегических и тактических решений.

Проблема эффективного использования МИС в здравоохранении тесно переплетается с другой, не менее важной проблемой – качества обучения студентов в медицинских учебных заведениях. Важнейшим требованием к подготовке современных специалистов является повышение ее качества, включающего не только теоретические и организационные аспекты, но и высокие практические навыки и быструю адаптацию к реальным

условиям работы в различных сферах деятельности. Одним из перспективных направлений решения данной задачи является использование ИТ, например симуляционных технологий для эффективной подготовки студентов к практической деятельности [10, 11]. Следовательно, необходимо уделять большое внимание их преподаванию, так как уровень владения средствами поиска и обработки информации и получения знаний на сегодняшний день во многом определяет успех в профессиональной деятельности.

Большой объем информации, с которым приходится взаимодействовать студентам, определяет необходимость обучения эффективным способам работы с ИТ в системе высшего образования. Это раскрывает новые возможности для реализации учебного процесса, учитывающего индивидуальные особенности и склонности каждого студента, их встраивание, особенно на старших курсах и в ординатуре, в самостоятельный научный поиск, что направлено на создание условий для формирования высококвалифицированного специалиста. Это обуславливает необходимость корректировки традиционных образовательных технологий в вузе и разработки современных методик преподавания с использованием информационной образовательной среды (ИОС), а также изменений в подготовке преподавателей. ИОС вуза позволяет аккумулировать информационные ресурсы; обеспечивает информационное обеспечение субъектов образовательного процесса; формирует информационную культуру студентов и преподавателей; способствует интеграции объектов информатизации [12].

Из изложенного следует, что целесообразным является ознакомление студентов, особенно старших курсов, с ЕИП системы здравоохранения и функционированием МИС, причем ряду студентов можно обеспечить в определенных пределах доступ к информации в МИС, которую они могут использовать при подготовке выпускных квалификационных работ и в научной работе. Для этого представляется целесообразным реализовать связь ИС вуза с ЕИС ЛПУ (рис. 2). Кроме того, хорошая подготовка специалистов в вузе в области ИТ способствует тому, что они в дальнейшем смогут грамотно и эффективно использовать возможности МИС в своей профессиональной деятельности в медицинских организациях. При этом следует подчеркнуть, что применение ИТ само по себе не может улучшить слабо организованную медицинскую деятельность или обучение, но может и должно стать инструментом повышения их качества и эффективности.

В СГМУ имени В.И. Разумовского используется МИС «БАРС.Мед» как универсальное решение для автоматизации деятельности учреждения. Система позволяет создать ЕИП для административных, лечебно-диагностических и финансово-экономических процессов университета, что способствует рациональной и более эффективной организации работы университета, в том числе за счет учета эффективности работы персонала, оперативного управления ресурсами, эффективного использования обо-

рудования, мониторинга основных показателей, применения электронного документооборота и других. Студенты университета приобретают основы знаний о функционировании МИС и навыки работы на компьютере с соответствующими программами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, медицинская информационная система представляет собой совокупность технических и программных средств, баз данных и знаний, предназначенных для автоматизации различных процессов, протекающих в ЛПУ и других органах системы здравоохранения страны. При разработке и применении МИС целесообразно рассматривать ее как сложную систему, содержащую ряд взаимосвязанных компонентов, что необходимо учитывать для квалифицированного использования. МИС служат базой для поэтапной организации мониторинга системы здравоохранения на федеральном и региональном уровнях. Грамотное обучение студентов-медиков и медицинских работников различного уровня эффективному использованию современных ИТ способствует повышению качества оказания медицинских услуг, совершенствованию управления различными структурными медицинскими подразделениями и создает основу существенного повышения уровня медицинского обслуживания и приближения его к мировому уровню.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/news/57425>.
2. Национальные проекты «Здравоохранение», «Цифровая экономика». URL: <http://government.ru/projects/selection/741/35675>).
3. Куракова Н.А. Информатизации здравоохранения как инструмент создания «саморегулируемой системы организации медицинской помощи» // Врач и информационные технологии. 2009. № 2. С. 4-27.
4. Путинцев А.Н., Алексеев Т.В., Шмелева Н.Н. Современные технологии для информационной поддержки врачей и повышения квалификации // Врач и информационные технологии. 2015. № 2. С. 36-44.
5. Цифровое здравоохранение. Необходимость и предпосылки / О.Э. Карпов, С.А. Субботин, Д.В. Шишканов, М.Н. Замятин // Врач и информационные технологии. 2017. № 3. С. 6-22.
6. Медицинские информационные системы: обзор возможностей и примеры использования. URL: <https://evergreens.com.ua/ru/articles/medical-information-systems.html>.

7. Классификация информационных систем в медицине. URL: <http://labdata.ru/node/13>.
8. Требования к медицинским информационным системам. URL: <https://www.rosminzdrav.ru/news/2019/06/19/11745-utverzhdeny-trebovaniya-k-meditsinskim-informatsionnym-sistemam>.
9. Жариков О.Г., Литвин А.А., Ковалёв В.А. Экспертные системы в медицине // Медицинские новости. 2008. № 10. С. 15-18.
10. Медицинские симуляторы: история развития, классификация, результаты применения, организация симуляционного образования / М.Е. Тимофеев, С.Г. Шаповальянц, В.Г. Полушкин и др. // Вестник Новгородского государственного университета. 2015. № 2 (85). С. 53-59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskie-simulyatory-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-rezultaty-primeneniya-organizatsiya-simulyatsionnogo-obrazovaniya>.
11. Применение симуляционного оборудования на основе информационных технологий для формирования профессиональных навыков / С.А. Игнатьев, В.А. Добряков, С.В. Федюков и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 4 (87). С. 27-39.
12. Вопросы использования информационных технологий в высших учебных заведениях / С.А. Игнатьев, С.В. Слесарев, С.В. Федюков, М.А. Терехова // Инженерный вестник Дона: электронный журнал. 2018. № 3 (50). С. 77-79. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5171

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Игнатьев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры педагогики, образовательных технологий и профессиональной коммуникации Саратовского государственного медицинского университета имени В.И. Разумовского

Stanislav A. Ignatiev – Dr. Sci. Tech., Professor Department of Pedagogy, Educational Technologies and Professional Communication, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Статья поступила в редакцию 30.10.21, принята к опубликованию 17.11.21

**Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский,
М.К. Магомедова, Р. Губайдулин**

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПРЕТЕНДЕНТОВ НА ЗАМЕЩЕНИЕ ВАКАНТНОЙ ДОЛЖНОСТИ

***Аннотация.** Описана методика автоматизированного отбора кандидатов на замещение вакантной должности на основании векторной оценки. Предложено решение задачи как многовекторной с последующей скаляризацией. Рассмотрен практический пример работы реализованной программы для оценивания претендента на замещение вакантной должности инженера-электрика компьютерного класса вуза.*

***Ключевые слова:** векторная оптимизация, скаляризация, критерий, ранг, декомпозиция*

**E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin,
Yu.B. Tomashevskiy, M.K. Magomedova, R. Gubaidulin**

A METHODOLOGY FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF APPLICANTS COMPETING FOR VACANT POSTS

***Abstract.** The presented methodology for automated selection of candidates to fill a vacancy is based on the vectorial analysis. The suggested solution to the problem has a multi-vector format with subsequent scalarization. The authors consider a practical example of the implemented program developed to assess a candidate's qualification and suitability as an electrical engineer in a computer class of a university.*

***Keywords:** vector optimization, scalarization, criterion, rank, decomposition*

ВВЕДЕНИЕ

Многокритериальная (векторная) оптимизация заключается в нахождении наилучших решений по нескольким критериям. Среди задач векторной оптимизации актуальной является оценка претендентов на замещение вакантной должности в различных профессиональных областях. Перечислим наиболее употребительные схемы и алгоритмы [1-5], которые могут применяться при решении подобных задач: методы свертывания си-

стемы частных критериев к одному критерию эффективности (скаляризация); методы, использующие задания ограничений на критерии; целевое программирование; методы поиска компромиссного решения; человеко-машинные методы принятия решений. В силу большого числа критериев целесообразно рассмотреть задачу как многовекторную с последующей скаляризацией.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Будем придерживаться идеологии метода анализа иерархий (МАИ), разработанного Томасом Л. Саати [1].

В соответствии с этим множество критериев должно иметь иерархическую структуру. Это означает, что критерии оценки претендентов для занятия вакантной должности упорядочены таким образом, что некоторые из них, имеющие высокие ранги иерархии, декомпозируются на множество критериев, имеющих ранг на единицу меньше, т. е. $R - 1$. В свою очередь, каждый критерий ранга $R - 1$ декомпозируется на множество критериев ранга $R - 2$ и так далее.

При $R = 2$ мы получаем многовекторную задачу. При $R > 2$ говорят о гипервекторной задаче. В нашем случае целесообразно ограничиться случаем $R = 2$.

Рассмотрим шкалы измерения критериев. Большинство критериев, с которыми приходится иметь дело при оценке сотрудников, оцениваются в качественных шкалах, что представляет значительную трудность в формализации задачи выбора.

В идеальном случае необходимо стремиться к тому, чтобы все критерии можно было выразить в численном виде, причем так, чтобы наилучшему (наиболее желаемому) варианту выбора по данному критерию соответствовало число 1, а наихудшему – число 0. Приведение всех критериев задачи к такой шкале назовем унификацией критериев. Разнообразие критериев, встречающихся в сложных задачах выбора, вызывает необходимость прибегать к специальному выбору методов унификации к каждому качественному критерию, что и имеет место в предлагаемой методике.

В рассматриваемой задаче многовекторной оценки критериев на замещение вакантной должности целесообразно в качестве критериев высшего ранга ($R = 2$) выбрать следующие критерии:

- опыт претендента (далее Φ_1);
- образование претендента (далее Φ_2);
- личностные качества претендента (Φ_3);

Критерий Φ_1 целесообразно декомпонировать на следующие четыре критерия.

Φ_{11} – «Общий стаж».

В данном случае имеется в виду общий стаж трудовой деятельности претендента. Безусловно, больший стаж способствует более успешной деятельности сотрудника на любой должности.

Для оценки каждого претендента по этому критерию целесообразно использовать следующее правило: претенденту из данного списка сотрудников, имеющему наибольший стаж, присваивается значение этого критерия, равное 1, а претенденту, имеющему наименьший общий стаж работы, присваивается значение критерия 0. Для претендентов, имеющих промежуточные значения стажа, значение критерия рассчитывается по формуле

$$\Phi_{11}(x) = \frac{S(x) - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}. \quad (1)$$

Здесь $S(x)$ – стаж данного претендента, S_{\max} и S_{\min} – максимальное и минимальное значения стажа из списка претендентов.

Таким образом, каждый претендент x оценивается по критерию Φ_{11} числом из интервала $[0; 1]$, причем претендент, имеющий больший стаж, оценивается выше претендента с меньшим общим стажем.

Φ_{12} – «*Стаж по специальности*».

Данный критерий по своей структуре аналогичен критерию Φ_{11} . Однако он более важен, поскольку учитывает опыт работы претендента в данной предметной области.

Способ унификации этого критерия проводится по формуле, аналогичной формуле (1):

$$\Phi_{12}(x) = \frac{Sc(x) - Sc_{\min}}{Sc_{\max} - Sc_{\min}}. \quad (2)$$

Здесь $Sc(x)$ – стаж работы данного претендента x по специальности вакансии, Sc_{\max} и Sc_{\min} – максимальное и минимальное значения стажа работы по специальности претендентов из имеющегося списка.

Φ_{13} – «*Стаж работы на данном уровне иерархии*».

Определение значения этого критерия может оказаться более или менее сложным. Это вызвано тем, что перемещение сотрудника как на повышение, так и на понижение иерархии связано с рисками психологического характера. Тем не менее можно считать, что большой стаж на уровне иерархии вакантной должности, как правило, не приводит к негативным последствиям, тогда как изменение статуса сотрудника может приводить как к позитивным, так и к отрицательным последствиям. Можно считать, что наименьший риск в оценке этого критерия мы получаем при унификации критерия по формуле

$$\Phi_{13}(x) = \frac{S_h(x)}{S(x)}, \quad (3)$$

где $S_h(x)$ – стаж работы претендента в должности, имеющей статус соответствующей статусу вакансии.

Φ_{14} – «*Специальные умения и навыки*».

Определение значения этого критерия определяется экспертным методом. Основанием для определения критерия является учет соответствия навыков и умений, полученных в предыдущих должностях и профессиях, с необходимыми навыками и умениями, специфическими для рассматриваемой вакансии, например умение работать на уникальном оборудовании, с которым на предыдущем месте работы претендент имел или не имел опыта работы. В данном случае эксперт оценивает для претендента соответствие значения критерия Φ_{14} большим числом, меньшим или равным 1 в зависимости от степени владения такими навыками.

Рассмотрим декомпозицию критерия «Образование» (Φ_2).

Φ_{21} – «*Уровень образования*».

В соответствии с методикой Саати унификации качественных критериев оценка претендента по критерию Φ_{21} может быть произведена по следующей шкале.

- высшее образование – 1;
- среднее техническое – 0,7;
- среднее (11 классов) – 0,3;
- основное общее (9 классов) – 0,1.

В зависимости от специфики вакансии могут быть корректировки, например наличие красного диплома или школьной медали могут повысить данную оценку.

Φ_{22} – «*Наличие образования по данной специальности*».

Этот критерий имеет большее значение, чем предыдущий.

При оценке кандидата на замещение вакансии должна быть учтена близость его специального образования к специальности данной вакансии. Экспертом в данном случае является сотрудник отдела кадров, который должен опираться на существующую номенклатуру специальностей.

Наиболее высокая оценка равна 1 и, очевидно, соответствует полному соответствию специальности, полученной кандидатом, специальности вакансии. Оценка, равная 0, соответствует отсутствию у претендента специального образования.

Φ_{23} – «*Личные достижения по специальности*».

В зависимости от особенностей вакансии личными достижениями могут считаться:

– для научно-технической среды: объекты интеллектуальной собственности (патенты на изобретения, патенты на полезные модели, сертифицированные программы на ЭВМ), а также публикации в рецензируемых изданиях по специальности, тезисы докладов на научно-технических конференциях;

– для технической области: свидетельства об участии в профессиональных конкурсах, соревнованиях по профессии и т. д.

Величина оценки в диапазоне от 0 до 1 устанавливается экспертно в зависимости от степени достижения.

Φ_{24} – «Дополнительные умения и навыки».

Сюда следует отнести умения и навыки, не обязательные для специалиста данной вакансии, однако полезные в определенных обстоятельствах. Например, знания иностранного языка, умение программировать, наличие водительских прав и т. п.

Оценка значения этого критерия производится экспертно аналогично тому, как это рекомендовано для оценки Φ_{23} .

Рассмотрим декомпозицию Φ_3 «Личные качества».

Данный критерий декомпозируется также на четыре критерия ранга 1.

Φ_{31} – «Ответственность».

Оценка степени наличия данного качества затруднительна в силу возможного отсутствия информации о деятельности претендента на предыдущих местах работы. В этом случае можно рекомендовать нейтральную оценку 0,5.

В тех случаях, когда имеются достоверные сведения о проявлении этого качества или его нарушения, оценка корректируется в соответствующем направлении.

Подобный прием можно рекомендовать для всех критериев, относящихся к личным качествам претендента.

Φ_{32} – «Коммуникабельность».

Это качество в зависимости от особенности вакансии может быть как полезным, так и нейтральным. В отличие от критерия Φ_{31} (Ответственность) степень его наличия может быть установлена в процессе собеседования с претендентом.

Φ_{33} – «Общий культурный уровень».

При оценке кандидата по данному критерию следует учитывать, что низкий культурный уровень является нежелательным, прежде всего для вакансий, связанных с интенсивным общением как с сотрудниками, так и с клиентами. Особенно важно учитывать это в учебных заведениях и предприятиях массового обслуживания.

Рекомендации по оценке критерия аналогичны рекомендациям по другим критериям, связанным с личностными качествами претендентов.

Φ_{34} – «Отсутствие вредных привычек».

Наличие вредных привычек может оказывать отрицательное влияние как на характер коммуникаций внутри производственного коллектива, так и на деятельность самого сотрудника. При оценке значений данного критерия следует опираться на рекомендации по оцениванию по критериям Φ_{31} , Φ_{32} , Φ_{33} .

Результат декомпозиции критериев высшего ранга задачи представлен на рис. 1. Полученная система критериев не является полной, т. е. на практике при приеме на работу применяются и другие критерии оценки и требования к претенденту. Например, такими требованиями являются ограничения по возрасту и здоровью из-за того, что должность связана с тяжелым физическим трудом или особыми условиями работы. Кроме того,

ограничения могут распространяться на семейное положение, наличие детей. Эти ограничения могут быть связаны с вакансиями, предусматривающими частые командировки. Эти критерии и требования не включены нами в предложенную систему критериев, поскольку они могут быть учтены на первоначальном контакте с претендентом, т. е. служить входным фильтром.

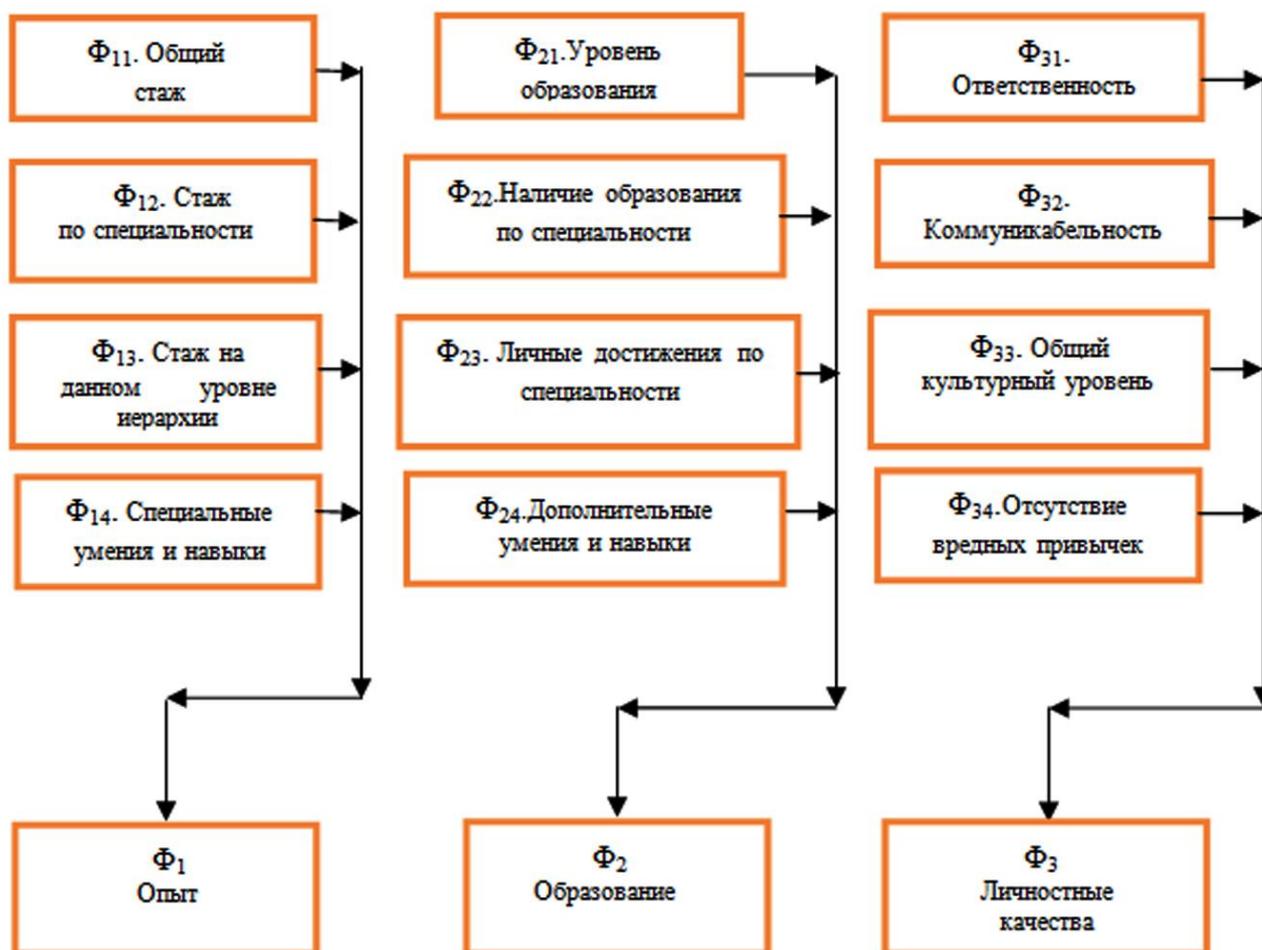


Рис. 1. Структура множества критериев задачи

Очевидно, что не все критерии задачи имеют одинаковую важность (ценность) при оценке претендентов. Оценка важности критериев является сложной задачей, для решения которой предложены различные методики [1, 2].

В настоящей работе мы опираемся на методику, описанную в [4]. Применительно к настоящей задаче эта методика представлена ниже.

В соответствии с широко применяемой методикой весовых коэффициентов [2] оценки важности должны удовлетворять следующим условиям, которые мы изложим применительно к группе критериев нашей задачи Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 .

1. Каждому критерию Φ_i ставится соответствующий коэффициент его важности относительно других критериев группы w_i , причем

$$0 \leq w_i \leq 1.$$

2. Более важным критериям соответствует большее значение величины w_i , т. е. отношение w_i / w_j отражает субъективную оценку эксперта относительно важности критерия w_i перед критерием w_j . Это отношение больше 1, если критерий Φ_i важнее, чем критерий Φ_j и меньше 1 – в противном случае.

3. Имеет место следующая формула:

$$\sum_i w_i = 1. \quad (5)$$

Поскольку каждый критерий высшего ранга порождает группу критериев нижнего ранга, необходимо определить относительную важность этих критериев внутри своей группы.

При этом мы получаем для каждого критерия Φ_i , ($i = 1, 2, 3$) группу критериев Φ_{i1} , Φ_{i2} , Φ_{i3} , Φ_{i4} с относительными ценностями w_{i1} , w_{i2} , w_{i3} , w_{i4} , для которых аналогично коэффициентам высшего ранга имеют место формулы

$$\forall i, j \quad 0 \leq w_{ij} \leq 1; \quad (6)$$

$$\forall i \quad \sum_j w_{ij} = 1. \quad (7)$$

Из определения коэффициентов следует формула

$$\sum_i w_i \sum_j w_{ij} = 1. \quad (8)$$

Рассмотрим один из способов задания весов критериев ρ_i на основании опроса экспертов.

Адекватный выбор значений весов определяется применением специального приема опроса экспертов, описанного в работе [1], посвященной построению функции полезности. Идея приема заключается в следующем.

Как правило, экспертам трудно задать количественно сравнительную ценность критериев, абстрагируясь от реальных альтернатив, оцениваемых по этим критериям. В связи с этим предложим эксперту сравнивать не сами критерии, а виртуальные альтернативы, обладающие оценками по всем этим критериям. Для этого строятся альтернативы с такими значениями критериев, которые облегчают эксперту их сравнение, причем их результаты содержат требуемую информацию об искомых весах критериев. Виртуальные альтернативы задаются следующим образом.

1. По каждому критерию устанавливается диапазон изменения

$$[\Phi_i^-, \Phi_i^+], \quad i = \overline{1, n},$$

где Φ_i^-, Φ_i^+ – наилучшее и наихудшее значения по i -му критерию, n – число критериев исследуемого множества.

2. Диапазон делится на m уровней, задав границу j -го уровня следующим образом:

$$\Phi_i^j = \Phi_i^+ - (j-1)h_i, \quad j = \overline{1, m}.$$

Здесь $h_i = (\Phi_i^+ - \Phi_i^-)/m$ – шаг разбиения.

3. В цикле попарно сравниваются все пары критериев Φ_s и Φ_t .

Эксперту предлагаются две виртуальные альтернативы, задаваемые векторами, координаты которых образованы значениями номеров уровней (табл. 1):

$$X_s^2 = (1, 1, \dots, 1, 2, 1, \dots, 1); \quad X_t^2 = (1, 1, \dots, 1, 2, 1, \dots, 1).$$

Альтернативы отличаются тем, что у первой альтернативы значения всех критериев, кроме s -го, имеют наилучший уровень, тогда как значения s -го критерия имеют второй уровень (верхняя часть табл. 2). У второй альтернативы значения всех критериев, кроме t -го, наилучшие, а значение t -го имеет второй уровень.

Таблица 1

Сравнение критериев Φ_1 и Φ_2

(строки соответствуют уровням значений при $m = 5$, столбцы – критериям)

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

В табл. 1 представлены альтернативы при $s = 1, t = 2$, причем первой альтернативе соответствует верхняя часть таблицы, второй – нижняя.

Если эксперт оценивает альтернативу X_s^2 выше, чем альтернативу X_t^2 (обозначим эту ситуацию с помощью формулы $X_s^2 \triangleright X_t^2$), то, очевидно, по его мнению, «уступка» по критерию t (образец X_t^2) на один уровень сильнее ухудшает образец, чем такая же «уступка» по критерию s . Это эквивалентно тому, что он считает критерий t более цен-

ным, чем критерий s . Может оказаться, что, по мнению эксперта, альтернативы X_t^2 и X_s^2 равноценны. Это будем обозначать так:

$$X_s^2 \cong X_t^2. \tag{9}$$

Проведенное сравнение альтернатив X_t^2 и X_s^2 , определяет лишь, что критерий t имеет больший вес, чем критерий s , но устанавливает степень этого превосходства.

4. Для определения количественного характера превосходства будем далее предполагать в цикле по k для сравнения альтернативы

$$X_s^k = (1, 1, \dots, 1, k, 1, \dots, 1); X_t^2 = (1, 1, \dots, 1, 2, 1, \dots, 1),$$

где альтернатива $X_s^k = (1, 1, \dots, 1, k, 1, \dots, 1)$ по всем критериям имеет наилучшее значение, но по критерию s – качество k -го уровня (см. табл. 2, где $k = 4$).

Если для $k < K_0$, с точки зрения эксперта имеем

$$X_s^k \triangleright X_t^2,$$

а при $k = K_0$

$$X_t^2 \triangleright X_s^2 \text{ или } X_s^2 \cong X_t^2,$$

то это показывает, что уменьшение качества альтернативы по критерию s на K_0 уровней соответствует уменьшению качества альтернативы по критерию t на один уровень.

Действия 1-4 дают возможность устанавливать относительные веса критериев. Для этого существуют два подхода.

Таблица 2

Альтернативы для последующих сравнений

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					

Рассмотрим подход, использующий *турнирный механизм выбора* [2]. Построим матрицу D , элементы которой равны

$$d_{st} = \begin{cases} K_0 - 1, & \text{если } X_t^2 \triangleright X_s^{K_0}, \\ 0, & \text{если } X_t^2 \cong X_s^2 \text{ или } X_s^2 \triangleright X_t^2. \end{cases}$$

Здесь номера строк и столбцов соответствуют номерам критериев.

Для рассматриваемого примера имеем табл. 3 попарных сравнений. Для использования турнирного механизма найдем абсолютный вес каждого критерия по формуле

$$\Delta_s = \sum_{t=1}^n d_{st}.$$

При этом $\forall s d_{ss} = 0$.

Таблица 3

Результаты расчета абсолютных весов критериев

	1	2	3	4	5
1		0	0	3	1
2	3		4	0	2
3	0	0		3	0
4	0	3	0		0
5	0	0	1	0	

Теперь для определения относительных весов критериев найдем

$$\rho_s = \Delta_s / \Delta,$$

где $\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i$. Согласно результатам табл. 3

$$\Delta_1 = 4; \Delta_2 = 9; \Delta_3 = 3; \Delta_4 = 3; \Delta_5 = 1; \Delta = 20.$$

$$\rho_1 = 4/20; \rho_2 = 9/20; \rho_3 = 3/20; \rho_4 = 3/20; \rho_5 = 1/20.$$

Другой подход нахождения весов критериев основан на методике Саати [1].

Теперь вместо матрицы D рассчитывается матрица A по формуле

$$a_{st} = \begin{cases} K_0, & \text{если } X_t^2 \triangleright X_s^{K_0}, \\ 1/K_0, & \text{если } X_s^2 \triangleright X_t^2, \\ 0, & \text{если } X_t^2 \cong X_s^2. \end{cases}$$

Затем находятся собственные числа и собственные вектора матрицы A . Искомыми значениями весов критериев $\tilde{\rho}_s, s = \overline{1, n}$ оказываются координаты нормированного собственного вектора R , который соответствует максимальному по модулю собственному числу λ_{\max} .

Благодаря тому, что в рассматриваемом случае

$$a_{st} / a_{ts} = 1,$$

максимальное по модулю собственное значение матрицы A равно числу критериев n , а остальные собственные числа равны нулю. Поэтому достаточно найти собственный вектор, соответствующий собственному числу $\lambda_{\max} = n$.

Величины $\tilde{\rho}_s$ и ρ_s , как правило, различаются. Однако численные эксперименты позволяют утверждать, что в 80 % сохраняются порядки критериев.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ

Определение коэффициентов важности критериев w_i , w_{ij} в каждом конкретном случае определяется экспертным методом исходя из специфики вакансии.

В качестве примера рассмотрим задачу замещения вакантной должности инженера-электроника компьютерного класса кафедры СТУ СГТУ имени Гагарина Ю.А.

На первом этапе выберем и обсудим значения коэффициентов важности критериев высшего ранга Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 .

Прежде всего отметим, что в данном случае коэффициенты важности должны иметь достаточно близкие значения. В то же время особенности вакансии представляют повышенные требования к уровню образования и личностным качествам, поскольку работа инженера-электроника компьютерного класса связана с достаточно глубокими знаниями компьютеров и информационных технологий. Одновременно инженер-электроник компьютерного класса постоянно общается со студентами и является помощником преподавателя, т. е. несет педагогическую нагрузку.

Что касается опыта работы, то его значение меньше, чем образование и личностные качества претендента, поскольку он быстро приобретается в условиях достаточно однородного круга производственного общения и равномерного режима работы.

В связи с этим выберем следующие значения коэффициентов вакансии:

$$w_1 = 0,25; w_2 = 0,4; w_3 = 0,35.$$

Перейдем к выбору значений коэффициентов важности критериев Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{13} и Φ_{14} .

В силу особых требований к знаниям, навыкам и умениям при обслуживании компьютерной техники наивысшую важность должен иметь коэффициент w_{14} , тогда как остальные коэффициенты группы имеют меньшую важность. Среди них, однако, стаж работы по специальности имеет большее значение.

Поэтому достаточно обоснованными могут считаться следующие значения коэффициентов важности критериев:

$$w_{11} = 0,1; w_{12} = 0,3; w_{13} = 0,1; w_{14} = 0,5.$$

Среди значений коэффициентов важности критериев Φ_{21} , Φ_{22} , Φ_{23} , Φ_{24} наибольшее значение имеют первые два критерия, тогда как критерий Φ_{24} практического значения не имеет. Личные достижения могут быть желательными, если они, например, получены в области программирования.

В связи с этим выбираем следующие значения коэффициентов

$$w_{21} = 0,4; w_{22} = 0,5; w_{23} = 0,1; w_{24} = 0.$$

Более высокое значение коэффициента w_{22} по сравнению с w_{21} обосновывается тем, что в качестве инженера-электроника может работать студент старшего курса, если он обучается на специальности, связанной с ИТ-технологиями.

В случае критериев Φ_{31} , Φ_{32} , Φ_{33} , Φ_{34} все критерии группы имеют одинаковый уровень важности для работы в высшем учебном заведении. В связи с этим полагаем

$$w_{31} = w_{32} = w_{33} = w_{34} = 0,25.$$

В результате получаем систему коэффициентов важности критериев, представленную на рис. 2.

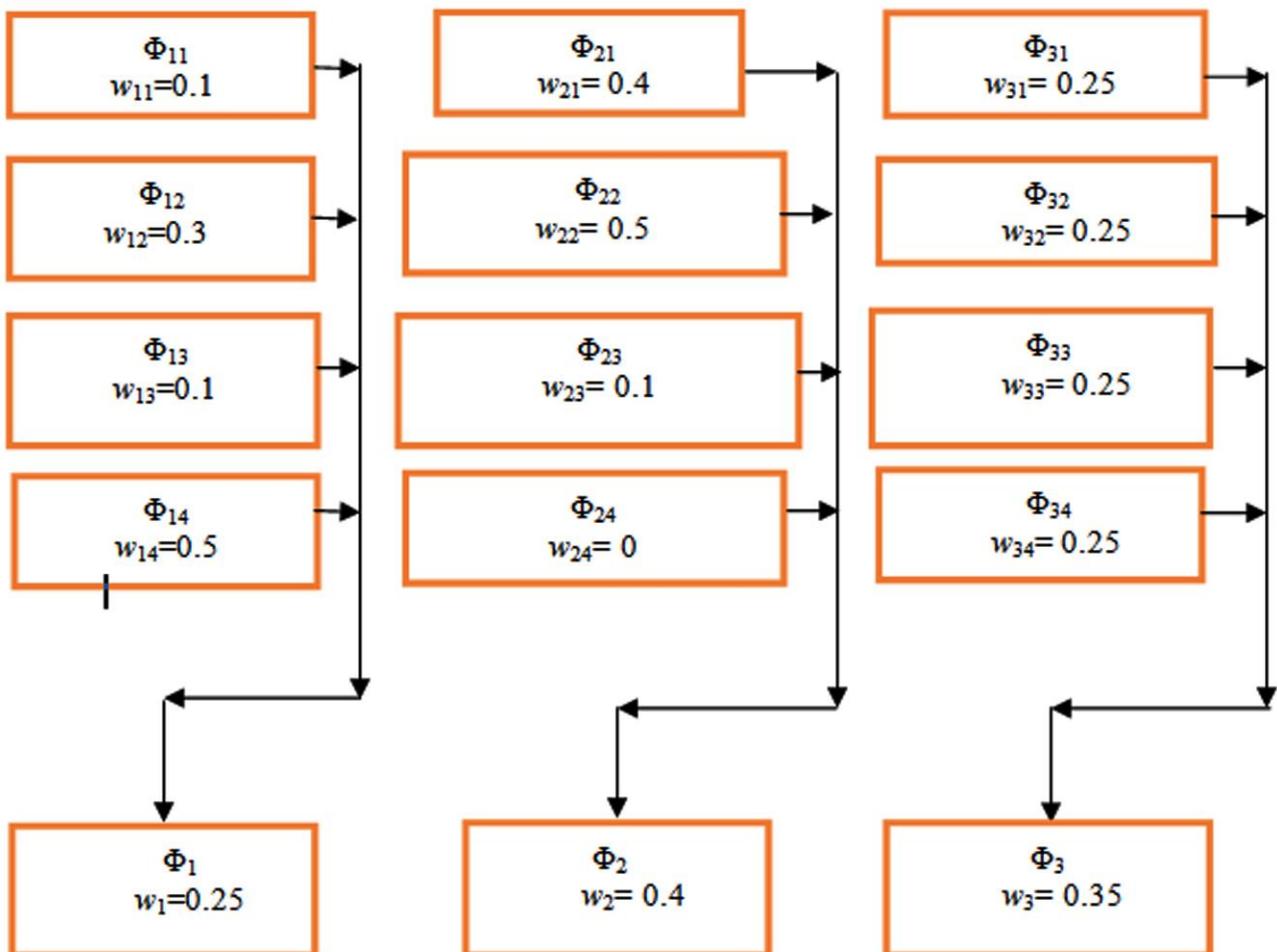


Рис. 2. Система коэффициентов важности критериев задачи

Для автоматизации методики, описанной выше, была составлена и реализована программа на языке высокого уровня.

Результаты работы программы для примера, описанного выше, имеют следующий вид.

Значения критериев важности для главных критериев

$$w[1] = 0,25 \quad w[2] = 0,40 \quad w[3] = 0,35.$$

Значения критериев важности для критериев декомпозиции

$$w[1,1] = 0,10 \quad w[1,2] = 0,30 \quad w[1,3] = 0,10 \quad w[1,4] = 0,50$$

$$w[2,1] = 0,40 \quad w[2,2] = 0,50 \quad w[2,3] = 0,10 \quad w[2,4] = 0,00$$

$$w[3,1] = 0,25 \quad w[3,2] = 0,25 \quad w[3,3] = 0,25 \quad w[3,4] = 0,25$$

Значения критериев для пяти претендентов: первый индекс – номер претендента, второй индекс – номер главного критерия, третий индекс – номер критерия декомпозиции.

$$h[1,1,i] = 0,71 \quad h[2,1,i] = 0,42 \quad h[3,1,i] = 0,52 \quad h[4,1,i] = 0,06 \quad h[5,1,i] = 0,72$$

$$h[1,1,i] = 0,08 \quad h[2,1,i] = 0,90 \quad h[3,1,i] = 0,43 \quad h[4,1,i] = 0,01 \quad h[5,1,i] = 0,05$$

$$h[1,1,i] = 0,50 \quad h[2,1,i] = 0,49 \quad h[3,1,i] = 0,08 \quad h[4,1,i] = 0,74 \quad h[5,1,i] = 0,89$$

$$h[1,1,i] = 0,16 \quad h[2,1,i] = 0,94 \quad h[3,1,i] = 0,63 \quad h[4,1,i] = 0,72 \quad h[5,1,i] = 0,44$$

$$h[1,2,i] = 0,34 \quad h[2,2,i] = 0,63 \quad h[3,2,i] = 0,17 \quad h[4,2,i] = 0,19 \quad h[5,2,i] = 0,23$$

$$h[1,2,i] = 0,65 \quad h[2,2,i] = 0,60 \quad h[3,2,i] = 0,46 \quad h[4,2,i] = 0,24 \quad h[5,2,i] = 0,09$$

$$h[1,2,i] = 0,34 \quad h[2,2,i] = 0,01 \quad h[3,2,i] = 0,58 \quad h[4,2,i] = 0,58 \quad h[5,2,i] = 0,41$$

$$h[1,2,i] = 0,55 \quad h[2,2,i] = 0,19 \quad h[3,2,i] = 0,51 \quad h[4,2,i] = 0,88 \quad h[5,2,i] = 0,39$$

$$h[1,3,i] = 0,31 \quad h[2,3,i] = 0,58 \quad h[3,3,i] = 0,02 \quad h[4,3,i] = 0,57 \quad h[5,3,i] = 0,29$$

$$h[1,3,i] = 0,71 \quad h[2,3,i] = 0,36 \quad h[3,3,i] = 0,82 \quad h[4,3,i] = 0,95 \quad h[5,3,i] = 0,53$$

$$h[1,3,i] = 0,18 \quad h[2,3,i] = 0,37 \quad h[3,3,i] = 0,19 \quad h[4,3,i] = 0,10 \quad h[5,3,i] = 0,46$$

$$h[1,3,i] = 0,65 \quad h[2,3,i] = 0,50 \quad h[3,3,i] = 0,79 \quad h[4,3,i] = 0,33 \quad h[5,3,i] = 0,88$$

Результаты оценки по критериям декомпозиции

Φ_1 – «Опыт»

$$a[1] = 0,223 \quad a[2] = 0,831 \quad a[3] = 0,503 \quad a[4] = 0,446 \quad a[5] = 0,397$$

Φ_2 – «Образование»

$$a[1] = 0,497 \quad a[2] = 0,555 \quad a[3] = 0,357 \quad a[4] = 0,252 \quad a[5] = 0,179$$

Φ_3 – «Личностные качества»

$$a[1] = 0,463 \quad a[2] = 0,454 \quad a[3] = 0,451 \quad a[4] = 0,486 \quad a[5] = 0,540$$

Результирующие значения суперкритерия

$$sc[1] = 0,416 \quad sc[2] = 0,589 \quad sc[3] = 0,427 \quad sc[4] = 0,383 \quad sc[5] = 0,360$$

Результат ранжирования

$$sc[1] = 0,589 \quad sc[2] = 0,427 \quad sc[3] = 0,416 \quad sc[4] = 0,383 \quad sc[5] = 0,360$$

$$rang[1] = 2 \quad rang[2] = 3 \quad rang[3] = 1 \quad rang[4] = 4 \quad rang[5] = 5$$

Итак, принимается претендент с номером 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика отбора кандидатов на замещение вакантной должности на основании многовекторной оценки, для автоматизации которой составлена программа.

2. Рассмотрен практический пример работы программы для оценивания претендента на замещение вакантной должности инженера-электрика компьютерного класса вуза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1989. 316 с.
2. Граецкая О.В., Чусова Ю.С., Ксенз Н.С. Математические и инструментальные методы принятия решений: учебное пособие. Ростов н/Д., Таганрог: Изд-во Юж. федерал. ун-та, 2020. 146 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 321 с.
4. Денисов А.В., Митяшин Н.П. Некоторые алгоритмы сведения многокритериальных задач к однокритериальным // Анализ, синтез и управление в сложных системах: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 37-45.
5. Юдин Д.Б. Вычислительные методы теории принятия решений. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. 320 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Миргородская Екатерина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системотехника и управление в технических системах Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.
mee85@inbox.ru

Ekaterina E. Mirgorodskaya – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of System Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Митяшин Никита Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita P. Mityashin – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of System Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Томашевский Юрий Болеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yury B. Tomashevskiy – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of System Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Магомедова Мария Кирилловна –
аспирант кафедры «Системотехника
и управление в технических системах»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Maria K. Magomedova –
Postgraduate, Department of System
Engineering and Control in Technical
Systems, Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Губайдулин Роман –
студент кафедры «Системотехника
и управление в технических системах»
Саратовского государственного техниче-
ского университета имени Гагарина Ю.А.

Roman Gubaidulin –
Undergraduate, Department
of System Engineering and Control
in Technical Systems, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 13.11.21, принята к опубликованию 06.12.21

П.В. Симонов, А.А. Игнатьев

**МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЛИЧИЯ ТРЕЩИН
В КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛАХ**

Аннотация. Рассматриваются основные методы неразрушающего контроля, применяемые для диагностики коленчатых валов, приводятся и сравниваются их преимущества, основные достоинства и недостатки, а также возможность автоматизации каждого из методов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, ультразвуковой метод, магнитопорошковый метод, виброакустический метод, дефекты, трещина

P.V. Simonov, A.A. Ignatiev

**NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES USED
TO DETERMINE CRACKS IN CRANKSHAFTS**

Abstract. The considered basic techniques for nondestructive testing are used in diagnosing crankshafts. The authors provide and compare their advantages and disadvantages, including possibilities for automation of each technique.

Keywords: nondestructive testing, capillary control, ultrasonic method, magnetic powder method, vibroacoustic method, defects, crack

ВВЕДЕНИЕ

Во время эксплуатации автомобиля происходит износ его узлов и агрегатов и, в частности, износ деталей двигателя. В результате по прошествии определенного срока детали двигателя требуют ремонта либо замены. Наиболее дорогостоящей деталью двигателя является коленчатый вал, и если для двигателей легковых автомобилей более целесообразна замена коленвала, то для двигателей крупногабаритной техники (грузовых автомобилей и сельскохозяйственных машин) экономически выгодно восстанавливать коленчатые валы, поскольку ресурс восстановленного вала составляет 80,6 % от ресурса нового, а стоимость восстановления составляет 15...70 % от стоимости нового вала [1].

В ряде организаций в России производится восстановление коленчатых валов; при этом для того, чтобы оценить целесообразность восстановления вала, производится операция по выявлению трещин и оценка их размеров.

Практика показывает, что далеко не все трещины на деталях удается найти визуально. Очень часто выявить трещину мешают загрязнение детали нагаром или смолами, сложный рельеф поверхности, малый размер трещины и т. п. Поэтому для получения достоверной информации о наличии трещин в коленчатых валах двигателей необходимо использовать специальные методы дефектоскопии, такие как капиллярный контроль и магнитопорошковый метод, также имеют место попытки применения ультразвукового и виброакустического методов.

Основные принципы и методы неразрушающего контроля рассмотрены в работах В.В. Ключева [2], Н.П. Алешина [3], Ю.В. Ланге [4], М.Д. Генкина [5] и других отечественных и зарубежных авторов. Обзор методов неразрушающего контроля применительно к предметной области дан ниже.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Ультразвуковой метод

Суть метода заключается в возбуждении механических колебаний упругой среды в контролируемом изделии. Верхняя граница частоты для ультразвуковых колебаний, используемых в данном методе контроля, составляет 25 МГц.

Строго направленный звуковой луч, попадая в исследуемый объект через прослойку, распространяется в его структуре за счет упругого взаимодействия частиц. В качестве прослойки используются различные минералы на масляной основе, например машинное масло.

В методе основополагающим является понятие отражения. Именно за счет отражения волны от дефекта и происходит его регистрация. «При падении на плоскую границу раздела двух разных сред плоская волна частично отражается, частично проходит в другую среду, оставаясь плоской, но меняет при этом свое направление распространения (преломляется)». Отраженная волна возвращается к источнику излучения и улавливается при этом приемником.

Ультразвуковые приборы позволяют определять дефекты в подшипниках и проблемы со смазкой. Наличие дефекта на пути следования ультразвуковой волны проявляется в ослаблении входного сигнала. «Чувствительность дефектоскопа регулируется в широких пределах и обеспечивает выявление дефектов в стали на глубине до 100 мм» [6].

Наиболее широкое применение в практике ультразвуковой дефектоскопии находят импульсный эхометод и метод звуковой тени. Применяют также резонансный метод

и метод акустического импеданса, метод свободных колебаний и метод акустической эмиссии.

Теневой метод стал первым применяться ультразвукового контроля металлоизделий. Излучатель волн, деталь и приемник образуют «акустический тракт». Если на пути ультразвуковых волн от излучателя к приемнику нет препятствий, отражающих или рассеивающих ультразвуковые волны, то уровень принятого сигнала максимален.

Этот уровень резко уменьшается или падает почти до нуля, если в детали есть несплошность. Серьезным недостатком теневого метода являются значительные погрешности показаний прибора, регистрирующего уровень принятого сигнала, из-за нестабильности акустического контакта с контролируемой деталью.

Наиболее широкое применение в технологии ультразвуковой дефектоскопии металлоизделий находит импульсный эхометод, который основан на явлении отражения ультразвуковых волн от поверхности дефекта и регистрации принятых сигналов. Для этой цели в изделие излучается последовательность коротких ультразвуковых импульсов. Отраженные импульсы несут информацию о наличии какого-либо отражателя, его удалении от излучателя и его размерах. Расстояние до отражателя может быть определено с высокой степенью точности [7].

На основании ультразвукового метода дефектоскопии ранее были разработаны способ и устройство, позволяющее автоматически локализовать дефект (трещина), определить ее геометрические размеры в кольцах подшипников колесных пар железнодорожных вагонов [6].

Капиллярный контроль

Капиллярный контроль – это метод дефектоскопии, основанный на проникновении определенных контрастных веществ в поверхностные дефектные слои контролируемого изделия под действием капиллярного (атмосферного) давления, в результате последующей обработки проявителем повышается свето- и цветоконтрастность дефектного участка относительно неповрежденного с выявлением количественного и качественного состава повреждений. Существуют два вида капиллярного контроля: цветной и люминесцентный [8].

Метод цветной дефектоскопии основан на проникновении смачивающей индикаторной жидкости в поверхностные трещины и поры под воздействием капиллярных сил с последующим «проявлением» этих жидкостей.

Степень проникновения жидкостей в поверхностные дефекты (трещины и поры) зависит от смачиваемости материала этой жидкостью, а также от размеров этих дефектов. Чем меньше ширина раскрытия трещины, тем интенсивнее и глубже проникает данная жидкость в трещину.

Однако при уменьшении ширины раскрытия трещины до 0,5 мкм интенсивность проникновения жидкости начинает снижаться, а при достижении десятых долей микрона проникновение жидкости в трещину прекращается. Чем больше вязкость жидкости, тем на меньшую глубину она проникает в трещину или канал поры.

Для проверки деталь очищают от твердых и жидкостных загрязнений и смачивают индикаторной жидкостью, обладающей способностью проникать в трещины и поры. Жидкость заполняет часть объема или весь свободный объем поры или трещины.

Остатки этой жидкости с поверхности контролируемой детали удаляют так, что в порах, трещинах эта жидкость остается. Для «вытягивания» проникающей жидкости из трещины (с целью проявления дефекта) контролируемую деталь покрывают пористой пленкой или мелкодисперсным порошком, имеющим по сравнению с дефектами детали меньшие диаметры устья пор и меньшее расстояние между крупинками. Для этой цели обычно применяют специальные проявители, способные оставлять на поверхности детали пористое покрытие, чаще всего белого цвета.

После нанесения на поверхность детали «проявляющего» покрытия проникающая жидкость из трещин и пор контролируемой детали выходит в более мелкие поры покрытия и слегка растекается в нем. На белом фоне проявителя возникает контур трещины красного или розового цвета.

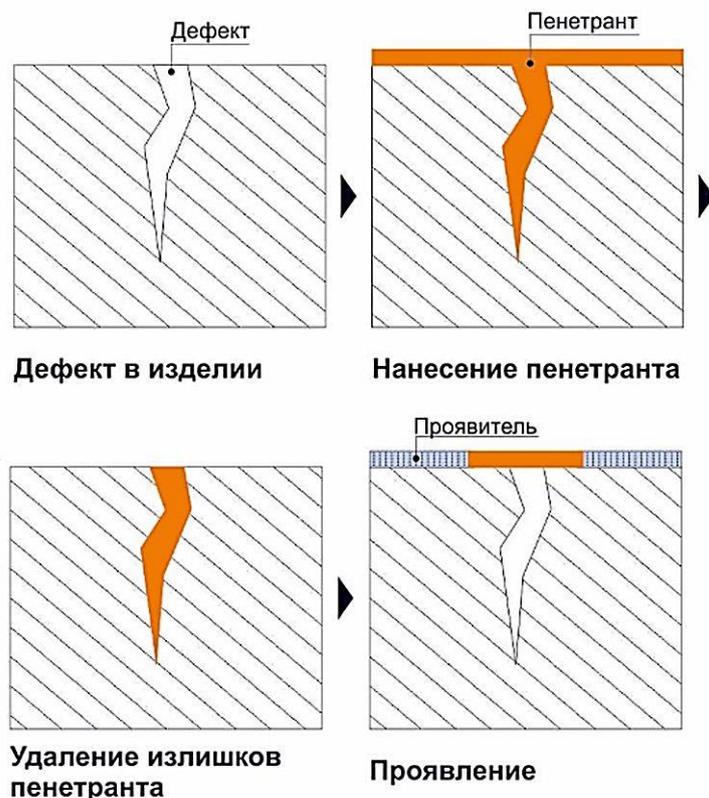


Рис. 1. Этапы выявления дефекта при капиллярном контроле

К достоинствам метода относятся:

- простота проводимых операций;
- визуализация дефекта;
- выявление дефектов до 0,5 мкм.

Недостатками являются:

- обнаружение только поверхностных и сквозных дефектов;
- тщательная подготовка поверхности;
- сложность использования на шероховатых поверхностях [7].

Магнитопорошковый метод

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля основан на явлении притяжения частиц магнитного порошка магнитными потоками рассеяния, возникающими над дефектами в намагниченных объектах контроля. Наличие и протяженность индикаторных рисунков, вызванных полями рассеяния дефектов, можно регистрировать визуально или автоматическими устройствами обработки изображения.

Магнитопорошковый метод предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: волосовин и трещин различного происхождения.

Разновидностью метода является метод магнитно-люминесцентной дефектоскопии [9].

В зависимости от магнитных свойств металла контролируемой детали различают два основных способа дефектоскопирования. Один способ подразумевает нанесение магнитного порошка или суспензии на поверхность детали во время ее намагничивания, т. е. в приложенном магнитном поле. Второй способ заключается в предварительном намагничивании детали до ее обработки суспензией, т. е. магнитный порошок наносится на деталь, имеющую остаточную намагниченность.

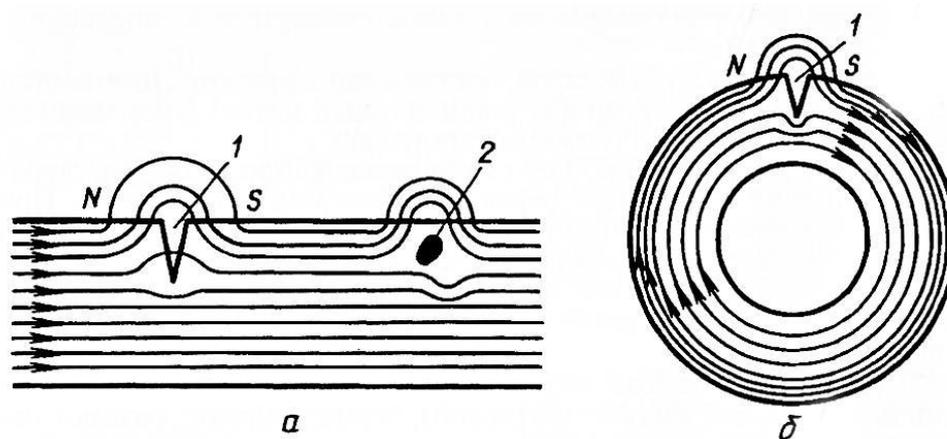


Рис. 2. Схемы возникновения магнитных полей рассеяния при намагничивании

В приложенном магнитном поле достигаются более высокие значения намагниченности детали и магнитного поля рассеяния от дефекта, что обеспечивает более высокую чувствительность контроля.

В приложенном магнитном поле контролируют детали, изготовленные из сталей, обладающих малой остаточной индукцией (менее 0,6 Тл) и небольшой коэрцитивной силой (менее 8 А/см). Таковые малоуглеродистые стали, некоторые специальные стали, некоторые марки сталей после отжига и нормализации.

Контроль деталей с использованием остаточной намагниченности можно применять для деталей, металл которых обладает большими значениями остаточной магнитной индукции (0,6-0,8 Тл) и коэрцитивной силой (8-10 А/см). К ним относится большинство термически обработанных конструкционных сталей.

Особенностью контроля способом остаточной намагниченности является его более высокая производительность, меньшая вероятность появления ложных отложений порошка (на структурных неоднородностях металла), возможность обработки детали после намагничивания (до 1 ч.) [7].

Виброакустический метод

Виброакустический метод позволяет получить информацию о наличии дефектов, техническом состоянии объекта и т. д.

Виброакустический метод основывается на анализе колебательного процесса с целью получения и обработки информации по средствам персонального компьютера.

Тестовая диагностика – возбуждение в объекте контроля искусственной вибрации с целью получения характеристик объекта и определения по полученным характеристикам его технического состояния.

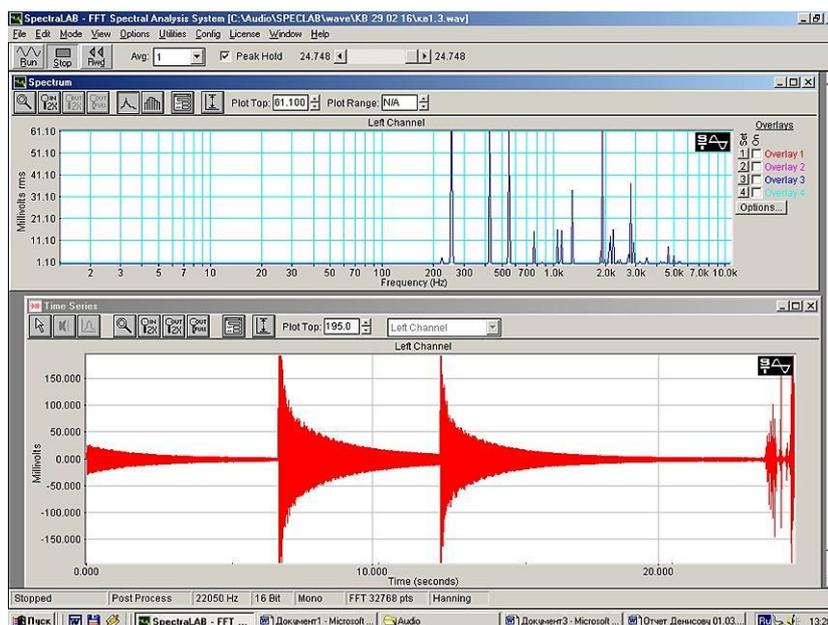
Функциональная диагностика определяет техническое состояние объекта по его колебаниям в процессе работы. Как правило, для исследования с использованием рассматриваемого метода следует проводить многократные испытания на различных этапах функционирования.

Достоинства метода:

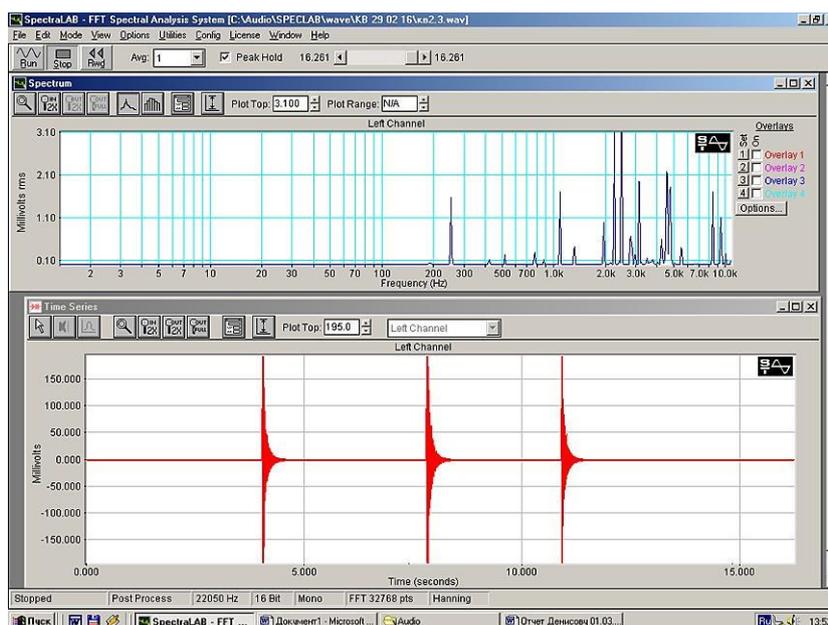
- возможность выявления внутренних дефектов;
- выявление дефектов малых размеров;
- возможность автоматизации метода.

Недостаток: достаточно сложные для обработки данные виброизмерений. Данный недостаток устраняется автоматизацией измерений и применением специального программного обеспечения [10].

На основании виброакустического метода дефектоскопии ранее был разработан способ определения наличия дефекта (трещины) в кольцах подшипников колесных пар железнодорожных вагонов [11].



а



б

Рис. 3. Результаты измерений свободных колебаний двух коленчатых валов:
а – вал без трещины; б – вал с трещиной

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ научно-технической информации по методам неразрушающего контроля коленчатых валов показал их недостаточную автоматизированность и позволил обосновать целесообразность совершенствования метода виброакустического контроля путем автоматизации процессов сбора и обработки информации о наличии дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшенина Е.Ю. Технологическое обеспечение качества восстановленных коленчатых валов дизельных двигателей с учетом из напряженно-деформированного состояния: дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2011.
2. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: справочник. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2003. 864 с.
3. Алешин Н.П., Белый В.Е., Вовилкин А.Х. Методы акустического контроля металлов. М: Машиностроение, 1989. 456 с.
4. Ланге Ю.В., Воронков В.А. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения: справочник. М.: Авторское издание, 2003. 120 с.
5. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
6. Щеголев С.С. Автоматизация процесса локализации дефектов колец подшипников колесных пар железнодорожных вагонов ультразвуковым методом: дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2014. 195 с.
7. Дефектоскопия деталей подвижного состава железных дорог и метрополитенов / В.А. Ильин, Г.И. Кожевников, Ю.Н. Левыкин, Ю.Н. Штремер. М.: Транспорт, 1983. 318 с.
8. Капиллярный контроль, цветная дефектоскопия, капиллярный метод неразрушающего контроля. URL: <http://t-ndt.ru/kapillyarnyj-kontrol-metod-defektoskopii-1343.html> (дата обращения: 11.04.2021).
9. Неразрушающий контроль. Магнитопорошковый метод. URL: <http://aquagroup.ru/normdocs/5471> (дата обращения: 11.02.2021).
10. Определение наличия трещин в коленчатых валах виброакустическим методом при импульсном воздействии / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, М.В. Виноградов, А.А. Верхутов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ. 2016. С. 49-51.
11. Игнатъев А.А., Мотков А.Г., Захарченко М.Ю. Автоматизация выявления дефектов колец подшипников виброакустическим методом: монография. Саратов: СГТУ, 2016. 108 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Симонов Павел Васильевич –
аспирант кафедры «Технология
и системы управления в машиностроении»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel V. Simonov –
Postgraduate, Department of Control
Systems Technology in Mechanical
Engineering, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 01.11.21, принята к опубликованию 17.11.21

Б.Л. Файфель

ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЧИСЕЛ ФИБОНАЧЧИ С ПОМОЩЬЮ ФОРМУЛЫ БИНЕ

Аннотация. В статье рассмотрен алгоритм прямого вычисления чисел Фибоначчи с использованием формулы Бине без привлечения арифметики с плавающей точкой за время $O(\log n)$. Приведена реализация метода на языке Питон.

Ключевые слова: числа Фибоначчи, формула Бине, язык Питон

B.L. Fayfel

A WAY TO CALCULATE FIBONACCI NUMBERS USING BINET'S FORMULA

Abstract. The article describes an algorithm for direct calculation of Fibonacci numbers using Binet's formula without the floating point arithmetic in $O(\log n)$ time. The Python programming language is applied to implement the given methodology.

Keywords: Fibonacci numbers, Binet's formula, Python

ВВЕДЕНИЕ

Как хорошо известно, числа Фибоначчи – это целочисленная последовательность, первые два члена которой равны единице, а каждый последующий равен сумме двух предыдущих. За 500 лет, прошедших с момента ввода этой последовательности в математический обиход, она основательно изучена. Открыто много интереснейших формул с участием чисел Фибоначчи. Но одной из «непреодолимых» учебных задач является вычисление чисел Фибоначчи. Для этого придумано много способов: от прямой рекурсии, основанной на формуле

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2},$$

до матричного метода, описанного, например, в книге Д. Кнута [1]. Большая часть этих подходов (кроме матричного метода Кнута) основаны на рекуррентных свойствах после-

довательности Фибоначчи и позволяют вычислить величину F_n в лучшем случае за время $O(n)$. Матричный метод Кнута (использующий матричное возведение в степень) позволяет вычислить число Фибоначчи за логарифмическое время [2].

Особняком в этом ряду алгоритмов располагается формула Бине (известная еще Муавру), имеющая вид

$$F_n = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n}{\sqrt{5}}.$$

Эта формула кажется, на первый взгляд, привлекательной, однако она содержит иррациональное число, которое при компьютерных вычислениях мы вынуждены представлять в форме числа с плавающей точкой (т. е. заменить бесконечную непериодическую дробь конечной).

Сказанное означает, что вычисления не будут точными; в них вносится погрешность ограничения. Автору однажды попала на глаза публикация [3], в которой использовалась формула Бине для вычисления очень большого числа Фибоначчи, но реализация предполагала использование плавающей арифметики сверхвысокой разрядности (с тем чтобы нужное число полностью уместилось в мантиссу).

В настоящей статье описана совершенно другая схема использования формулы Бине, которая вообще не использует плавающую точку.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим множество чисел вида

$$x = a + \sqrt{5} * b,$$

где a и b – целые числа. Представляется вполне очевидным, что это множество алгебраически замкнуто относительно операций обычного сложения и умножения:

$$(a + b\sqrt{5}) + (c + d\sqrt{5}) = ((a + c) + (b + d)\sqrt{5}),$$

$$(a + b\sqrt{5})(c + d\sqrt{5}) = ((ac + 5bd) + (ad + bc)\sqrt{5}).$$

Кроме того, ноль и единица принадлежат к рассматриваемому множеству тривиальным образом:

$$1 \equiv (1 + \sqrt{5} * 0),$$

$$0 \equiv (0 + \sqrt{5} * 0).$$

Вполне естественно реализуется вычитание:

$$(a + b\sqrt{5}) - (c + d\sqrt{5}) = ((a - c) + (b - d)\sqrt{5}).$$

Другими словами, рассматриваемое множество образует кольцо [4]. Теперь можно реализовать арифметику на множестве пар (a, b) , в которой сложение, вычитание и умножение будут описываться формулами:

$$(a, b) + (c, d) = ((a + c), (b + d)),$$

$$(a, b) - (c, d) = ((a - c), (b - d)),$$

$$(a, b) * (c, d) = ((ac + 5bd), (ad + bc)).$$

При этом будут соблюдаться все обычные аксиомы сложения и умножения. Таким образом, можно «благополучно забыть» про $\sqrt{5}$ и реализовать прямое вычисление по формуле Бине.

В результате числитель дроби будет представлять собой пару вида $(0, r\sqrt{5}) = r\sqrt{5}$. Деление этого иррационального числа на $\sqrt{5}$ дает искомый целый результат. Естественно, что в действительности делить не требуется, достаточно вычислить (используя описанную выше арифметику пар) два бинорма

$$A = \frac{(1+\sqrt{5})^n}{2^n} \quad \text{и} \quad B = \frac{(1-\sqrt{5})^n}{2^n},$$

и затем произвести вычитание.

РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве языка реализации будет использован очень популярный язык Питон. В данном случае Питон хорош тем, что в него встроена арифметика целых неограниченной точности. Понятно, что алгоритм может быть реализован на любом языке, но наличие «под руками» неограниченной разрядности целых сильно облегчает задачу.

Вот как выглядят нужные функции:

```
def prod_pairs(a,b):
    return (a[0]*b[0]+5*a[1]*b[1],a[0]*b[1]+a[1]*b[0])
def sub_pairs(a,b):
    return (a[0]-b[0],a[1]-b[1])
def pow_pair(a,n):
    c=a
    for _ in range(n-1):
        c=prod_pairs(c,a)
    return c
def fib_bine(n):
    x1=pow_pair((1,1),n)
```

```
x2=pow_pair((1,-1),n)
z=sub_pairs(x1,x2)
return z[1]//(2**n)
```

Можно ли ускорить этот код? Да, можно, если ускорить возведение в степень (аналогично тому, как это сделано в [2]). Для ускорения возведения в степень имеется стандартный подход, заключающийся в том, что для вычисления x^n вычисляется цепочка $x \rightarrow x^2 \rightarrow x^4 \rightarrow \dots \rightarrow x^{2^k}$ до тех пор, пока $2^k \leq n$, а затем аналогичным образом вычисляется $x^{(n-2^k)}$. Используя эту схему, можно переписать функцию возведения в степень:

```
def pow_pair(a,n):
    if (n==1):
        return a
    c=copy(a)
    k=1
    while k*2<=n:
        if k<=n:
            c=prod_pairs(c,c)
            k=k*2
    p=n-k
    if p>=1:
        tmp=pow_pair(a,p)
        return prod_pairs(tmp,c)
    else:
        return c
```

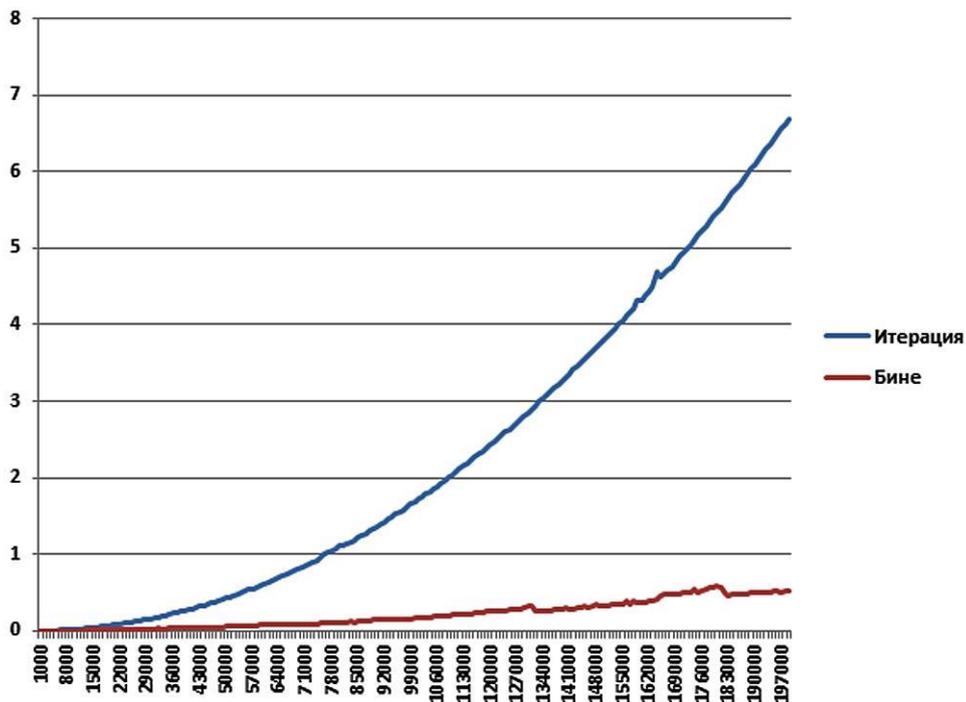
Использование этого приема позволяет вычислять числа Фибоначчи за время, близкое к логарифмическому, по формуле Бине и без использования арифметики с плавающей точкой.

Ниже приведены результаты тестов, сравнивающие время вычисления чисел Фибоначчи простой итерацией:

```
def fib_ite(n):
    c,p=0,1
    for _ in range(n):
        c,p=c+p,c
    return c
```

и кодом, использующим функцию `fib_bine`. Несмотря на очевидную простоту кода `fib_ite`, функция `fib_bine` показывает значительно лучшие результаты. Так, на компьютере автора четырехсоттысячное число Фибоначчи по описываемому алгоритму вычисляется примерно за 2 с, а прямыми итерациями – за 27 с.

На рисунке по горизонтальной оси откладывается номер рассчитываемого числа Фибоначчи, по вертикальной – время в секундах.



Сравнение производительности алгоритмов вычисления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель, сформулированная во введении к настоящей статье, полностью достигнута – описанный метод вычисления чисел Фибоначчи по формуле Бине оказывается весьма быстрым и может быть легко реализован в любой среде разработки, поддерживающий целые числа неограниченной разрядности (Python, Lisp, Haskell). Метод не нуждается в арифметике с плавающей точкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнут Д. Искусство программирования на ЭВМ, Т. 1. Основные алгоритмы. М: Вильямс, 2017. 720 с.
2. N-е число Фибоначчи за $O(\log N)$. URL: <https://habr.com/ru/post/148336/> Время доступа: 08/12/2021 12:10
3. Расчет миллионного числа Фибоначчи. URL: <https://habr.com/ru/company/skillfactory/blog/555914/> Время доступа: 08/12/2021 12:15
4. Ленг С. Алгебра. М.: Наука, 1965. 431 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Файфель Борис Леонидович –

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры прикладных
информационных технологий Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Boris L. Fayfel –

PhD (Physics and Mathematics),
Associate Professor, Department
of Applied Information Technologies,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.12.21, принята к опубликованию 17.12.21

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 678-419:004.925.84

А.В. Жуков, А.А. Никифоров, А.С. Яковишин

ПЛАСТМАССЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (обзор)

***Аннотация.** В статье приведен обзор пластических масс для FDM-принтеров, получивших широкое распространение как в промышленности, так и в бытовой печати. Такие пластики как ABS, PLA, PVA, нейлон и другие полимеры являются основными материалами на рынке аддитивных технологий (АТ). Создание новых материалов является актуальной проблемой, так как с каждым годом к ним предъявляют новые физико-химические требования. Повышение требований к пластикам обусловливается тем, что сфера применения деталей, изготовленных по FDM-технологии, расширяется, а применение существующих материалов более широко распространяются в нашей повседневной жизни. А именно детали, изготовленные с применением АТ, используются не только в машиностроении, но и в других отраслях промышленности ввиду дешевизны сырья, его доступности и возможности дальнейшей безотходной переработки.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, прототипирование, филамент, 3D-печать, ABS, PLA, ПВХ, нейлон, поликарбонаты, полиэтилен, полипропилен, поликапролактон, полифенилсульфон, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат, полистирол*

A.V. Zhukov, A.A. Nikiforov, A.S. Yakovishin

PLASTIC MATERIALS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES (review)

***Abstract.** The article provides an overview of plastics for FDM-printers, which are widely used both in industry and household printing. Plastics such as ABS, PLA, PVA, nylon and other polymers are the main materials in the AM market. Creation of new materials is an urgent problem, since every year new physicochemical requirements are imposed on them. De-*

mand for higher standards of plastic materials is due to the fact that the scope of application of parts made using FDM-technology is expanding, and the use of existing materials is more widespread in our daily life. Namely, parts made with the use of AT are used not only in mechanical engineering, but also in other industries, due to cheap raw materials, their availability and possibility of further waste-free processing.

Keywords: *additive technologies, prototyping, filament, 3D-printing, ABS, PLA, PVA, nylon, polycarbonates, polyethylene, polypropylene, polycaprolactone, polyphenylsulfone, polymethyl methacrylate, polyethylene terephthalate, polystyrene*

Один из мировых трендов в новой промышленной революции – это развитие АТ. Рост рынка АТ в настоящее время до сих пор еще сформирован не до конца и не имеет четких границ. Активное развитие вполне объяснимо, так как АТ построено не на удалении части материала, а на создании деталей посредством равномерного послойного добавления материала. Используя данные технологии, можно получить детали сложной геометрической формы и высокой точности, причем в короткий срок. Скорость изготовления продукции сокращается за счёт автоматизации и непрерывности технологического процесса в десятки раз [1, 2].

Удешевление производства происходит за счет снижения числа комплектующих деталей входящих в сборочные единицы [3, 4]. Например, чтобы изготовить согласно традиционной технологии форсунку для бесконтактного нанесения смазывающего материала на боковую часть поверхности рельса, необходимо изготовить порядка пятнадцати прецизионных деталей из различных материалов с последующей их сборкой, что является затратным и трудоемким процессом с длительностью шесть рабочих дней. Если заменить традиционную технологию механической обработки 3D-печатью, затраты снизятся в восемь раз, а трудоёмкость составит один день.

С применением технологии неполного заполнения полостей детали снижается вес, что особенно ценно для авиационной и космической отрасли. Предприятия, изготавливающие авиационные двигатели, научились изготавливать АТ различные втулки и кронштейны, которые легче на 40-50 % «традиционных» аналогов, при этом прочностные характеристики остаются на должном уровне. Почти вдвое удается снизить вес и отдельных деталей в вертолетостроении – это детали, изготовленные из композиционных материалов по технологии АТ, например лопасти. Можно сказать, АТ активно проникает во все отрасли и очень интенсивно вытесняет традиционные технологии [5-9].

Другой важный момент – минимизация отходов и экономия исходного сырья, как было отмечено в примере выше. Т. е. суть АТ сводится к использованию ровно столько материала, сколько необходимо для создания детали и не больше. Потери сырья при классических технологиях обычно составляют 65-85 % от веса детали и типа производ-

ства [10, 11]. Но одно из главных преимуществ АТ заключается в том, что 3D-модели деталей мгновенно можно передать по сети на производство в любую точку мира. Таким образом, можно сказать, что меняется структура промышленного сознания – вместо использования огромных площадей достаточно использовать несколько локальных инженеринговых центров с необходимым оборудованием, в состав которых может входить центр по изготовлению потребных материалов, группа инженеров и центр (производство), на площадях которого будет размещено 3D-оборудование для печати.

В настоящее время Россия отстает от ведущих мировых стран – технологических лидеров АТ. Но называть это отставание критичным неправильно т. к. конкурентная борьба ведется не в создании непосредственно аддитивных машин, принтеров и порошков, а в поиске рыночных ниш для применения АТ. Выиграет в этой конкуренции тот, кто первым определит, где целесообразнее применение АТ, что в дальнейшем и должно принести максимальную прибыль.

Сегодня в России на рынке систем прототипирования присутствуют более тридцати отечественных производителей 3D-принтеров, печатающих пластиковым филаментом. Они выпускают около пяти тысяч принтеров ежегодно. Доля комплектующих российского производства составляет порядка не более 50 %. Пластиковый филамент, как и оборудование для его производства, на 90 % поставляется из-за рубежей нашей родины, причем есть очень большие предпосылки для производства различных типов филамента для 3D-принтеров в России.

Филамент: нить калиброванного диаметра, получаемая непрерывным экструдированием пластмассы и композиций на ее основе, обычно наматываемая на катушку [12].

Рассмотрим наиболее распространённые пластмассы для изготовления филамента:

1. **ABS-пластик** (акрилонитрилбутадиенстирол). Термопластик с ударопрочными свойствами, имеет широкое применение в настоящее время. Состоит из смол на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом.

Пропорции компонентов (рис. 1) обычно варьируются: 15-35 % акрилонитрила, 5-30 % – бутадиена, 40-60 % – стирола [13, 14].

Для производства килограмма ABS пластика затрачивается около двух килограммов эквивалента нефти в виде энергии и материалов. Этот материал может быть использован как возобновляемое сырьё.

Поверхности изделия слегка шероховатые, долговечные, влагостойкие, прочные и при этом имеют небольшую эластичность. ABS-пластик при классическом производстве используют для изготовления [14]:



Рис. 1. Мономеры для синтеза ABS-пластика

- крупных автомобильных деталей (радиаторной решётки, элементов ручного управления, главной приборной панели, корпусов аккумуляторов);
- корпусов деталей бытовых электронных приборов, бытовой техники, спортивного инвентаря, телерадиоаппаратуры, мебели, изделий сантехники;
- канцелярских изделий, настольных принадлежностей, чемоданов, контейнеров, смарт-карт и платежных банковских карт;
- музыкальных инструментов, игрушек, детских конструкторов;
- деталей медицинских принадлежностей и медицинского оборудования.

ABS-пластик является одним из лучших расходных материалов для производства прототипов в АТ 3D-печати (это первый материал, из которого изготовили пластиковую нить для домашних настольных 3D-принтеров). Этот материал эластичен, нетоксичен и ударопрочен. Температура плавления – от 220 до 248° С. В розничной продаже сегодня ABS-пластик поставляется в виде порошка или пластиковых нитей, намотанных на специальные катушки. 3D-модели из ABS долговечны, но плохо переносят ультрафиолет или прямой солнечный свет [15].

К недостаткам ABS-пластика можно отнести пластмассовый запах, выделяющийся во время нагрева. Детали, печатаемые на 3D-принтере, часто получают с отклонениями по качеству поверхностного слоя, из-за чего нуждаются в дополнительной доработке в виде шлифовки наждачной бумагой. Нестоек к сложным эфирам, кетонам и ацетону. Но самый большой недостаток – это склонность к большой усадке, до 0,8 % от общего объема, это свойство нужно учитывать при использовании данного пластика.

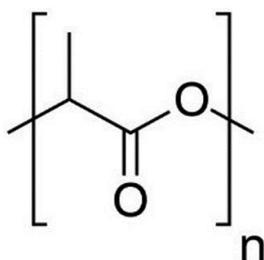


Рис. 2. Химическая формула полилактида

2. **PLA** (Полилактид, полимолочная кислота, polylactic acid). Один из широко применяемых пластиков. Это термопластичный, биосовместимый, биоразлагаемый алифатический полиэфир (рис. 2), мономером которого является молочная кислота.

Материалом для изготовления PLA являются кукуруза или сахарный тростник, поэтому из данного пластика производят биоразлагаемые изделия с коротким жизненным циклом (пищевая упаковочная пленка, одноразовая посуда и другая пищевая тара), в медицине для производства саморассасывающихся хирургических нитей и штифтов [16, 17].

Распространённость PLA в АТ обуславливается следующими факторами.

PLA безопасен для окружающей среды и полностью биоразлагаем.

Среди немногих практических промышленных применений можно отметить использование в цапфах или вкладышах малонагруженных подшипников, не несущих высокой механической нагрузки.

Важнейшее преимущество применения PLA в 3D-печати – это низкая температура плавления (170-180° С), что способствует низкому расходу электроэнергии на нагрев пластика и минимальному износу сопел из цветных металлов.

PLA характеризуется низкой усадкой, что способствует практически отсутствию деформационных искажений, но при увеличении габаритов печатаемых моделей усадка имеет кумулятивный эффект. Для предотвращения данного эффекта требуется подогрев рабочей платформы.

3. **ПВС-пластик.** Поливиниловый спирт (poly (vinyl alcohol), PVA, PVA1) – термопластичный, водорастворимый, искусственный полимер (рис. 3).

Поливиниловый спирт получается посредством кислотного либо щелочного алкоголиза или гидролиза сложных поливиниловых эфиров. ПВС – это твердый нетоксичный пластик белого цвета, не имеющий вкуса и запаха [18, 19].

ПВС применяется в промышленности для изготовления:

- клея для бумаги и текстильных материалов, модификатора или загустителя для клеев на основе поливинилацетата;
- водорастворимых покрытий и пленок различной толщины;
- капель для глаз, зонда для эмболизации в медицинских процедурах или для изготовления защитных гигиенических перчаток;
- армирующих добавок для связки бетона и поверхностно-активных веществ (ПАВ).

ПВС, как и PLA, является водорастворимым пластиком. В моделях, в конструкции которых необходимо использовать элементы поддержки из ПВС, по завершении печати эти элементы растворяют в воде, получая готовую деталь, не требующую дополнительной химической или механической обработки. Также ПВС применяют для создания мастер-моделей для литейных форм высокоточного литья с последующим растворением этих моделей в воде при температуре 70-90° С.

4. **Нейлон.** Это представитель семьи синтетических полиамидов, используется в основном в производстве волокон. Под Нейлоном понимают поли-ε-капроамид (капрон или нейлон-6), либо полигексаметиленадипинамид (анид или нейлон-66).

Формулы химического состава нейлона показаны на рис. 4. Эти разновидности нейлона схожи. Основным различием является температура плавления: нейлон-6 плавится при 220° С, а нейлон-66 – при 265° С.

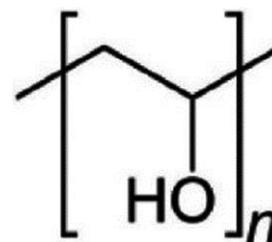


Рис. 3. Химическая формула поливинилового спирта

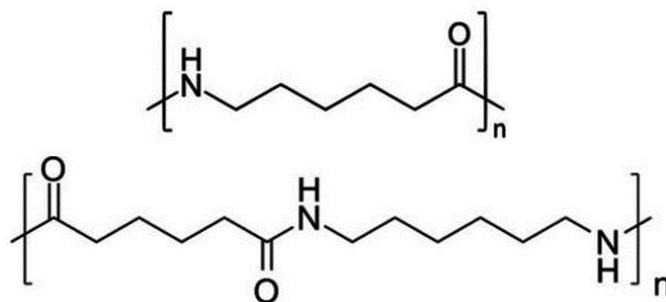


Рис. 4. Химическая формула нейлона (капрон – сверху, амид – снизу)

Максимально популярным в АТ является нейлон-66. Нейлон в промышленности применяется для изготовления тонких покрытий, пленок, втулок и вкладышей [20]. Слой нейлона, нанесенный на фрикционные поверхности в виде тонкослойного покрытия, повышает их эксплуатационные свойства. Коэффициент трения у данного материала при работе со стальной ответной деталью без смазки равен 0,17-0,20, с масляной смазкой – 0,014-0,020, с водой в качестве смазки – 0,02-0,05. Нейлон – это износостойчивый материал с низким коэффициентом трения, поэтому нейлон используется для покрытия фрикционных пар – это повышает их эксплуатационные свойства и позволяет эксплуатировать это пары без смазки.

В АТ широко используют нейлоновые нити, как правило, это нить (леска) для садовых триммеров, диаметр этих нитей соответствует диаметру отверстий экструзионных сопел в 3D-принтерах.

Поликарбонаты характеризуются высокой прочностью и ударной вязкостью, а также устойчивостью к температурам. Однако надо отметить риск при печати для здоровья, так как в качестве сырья используют токсичные и канцерогенные соединения бисфенола А. При нагревании материала остаточный бисфенол А испаряется в атмосферу, поэтому 3D-печать моделей нужно проводить в помещениях с хорошей вентиляцией.

5. Поликарбонаты. Термопластичные полимеры являются сложными полиэфирами двухатомных спиртов и угольной кислоты. Химическая формула поликарбонатов: (-O-R-O-CO-)n. Наиболее распространены в промышленности ароматические поликарбонаты на основе бисфенола А (рис. 5). Бисфенол А обычно синтезируется конденсацией ацетона и фенола.

При несоответствующих (низкой) температуре нагрева материала и (высокой) скорости печати полученные детали могут растрескиваться. Скорость печати зависит от температуры нагрева поликарбоната; при скорости печати 20-40 мм/с минимальной температурой нужно считать 250-270° С. При печати рекомендуется использовать принтер с закрытым корпусом, подогреваемой платформой и прогреваемой камерой [20, 21].

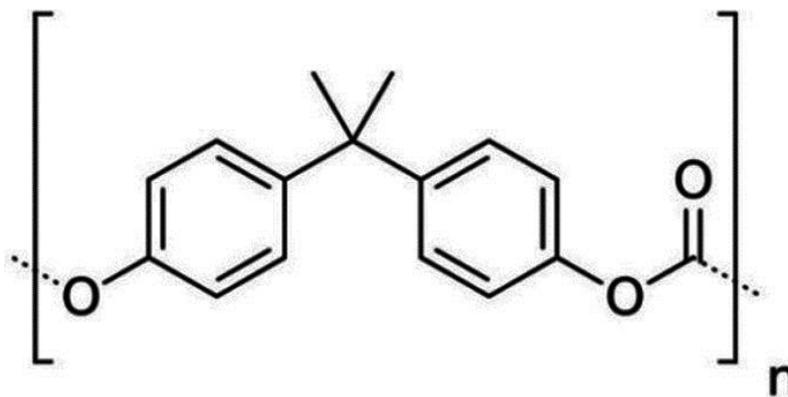


Рис. 5. Химическая формула поликарбоната, полученного на основе бисфенола А

Поликарбонат является гигроскопичным материалом, поэтому во избежание образования пузырьков в слоях при печати его требуется хранить в сухих условиях, влагозащищенных местах.

6. Полиэтилен. Полимер этилена, относящийся к материалам из полиолефинов (рис. 6). Полиэтилен – пластик, максимально распространённый в мире.

Различают полиэтилен низкой плотности или высокого давления (ПЭВД) и полиэтилен высокой плотности или низкого давления (ПЭНД). Отличие друг от друга является структура построения макромолекул.

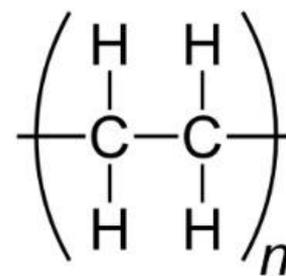


Рис. 6. Химическая формула полиэтилена

Полиэтилен мало представлен для 3D-печати. Однако этот материал очень дешёвый и доступный. Сегодня уже разработаны устройства для переработки ПЭНД отходов (пищевой упаковки, ПЭТ бутылок, и т. д.) в нити для печати на 3D принтерах. Печать следует проводить в помещениях с хорошей вентиляцией.

Температура плавления полиэтилена составляет 130-145° С, а застывания – 100-120° С, поэтому слои, наносимые при печати, не успевают кристаллизоваться [22]. Высокая усадка полиэтилена приводит к закрутке первых слоев, что приводит к деформации модели. При печати полиэтиленом необходима подогреваемая платформа и прогреваемая рабочая камера с точной регулировкой терморегима. Печать необходимо вести на высоких скоростях.

7. Полипропилен – полимер пропилена (рис. 7). Полипропилен применяется в производстве одноразовых шприцев, электроизоляции, упаковочных материалов, труб, посуды и нетканых материалов. Полипропилен достаточно дешев, нетоксичен, обладает химической стойкостью, имеет низкую плотность, устойчив к влаге и из-

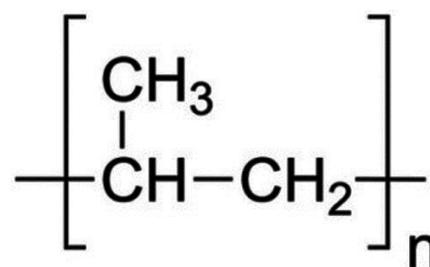


Рис. 7. Химическая формула полипропилена

носу. Недостаток полипропилена – низкая стойкость к отрицательным температурам и уязвимость к воздействию солнечного света.

Главная трудность при печати полипропиленом – при охлаждении проявляется высокая усадка – до 2,5 % от общего объема.

Материал хорошо слипается с холодными (остывшими) поверхностями, печать следует проводить на платформе с подогревом для снижения деформации модели. Рекомендуемая температура нагрева полипропилена – 220° С.

8. Поликапролактон. Синтезируемый из ε-капролактона (рис. 8) биоразлагаемый полиэфир. Отличительной чертой является низкая температура плавления – 60-65° С. Материал подходит для быстрого прототипирования. В США этот материал допущен для медицинского использования. Направление использования этого материала – производство саморассасывающихся хирургических нитей и имплантов [23].

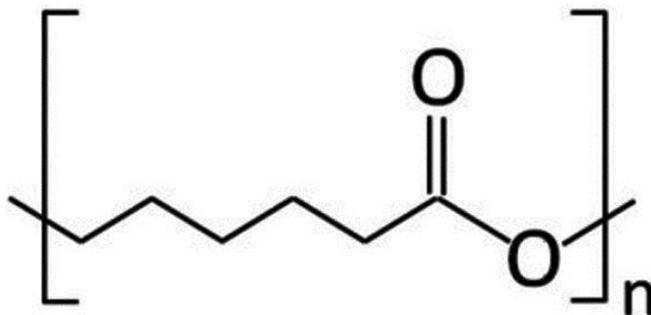


Рис. 8. Химическая формула поликапролактона

Низкая температура плавления поликапролактона для 3D-печати приводит к трудностям из-за того, что не все принтеры могут быть настроены на такой режим работы (60-65° С). Это приводит к перегреву материала, и он теряет ряд своих механических свойств.

Поликапролактон пригоден для создания макетов и пищевой упаковки, также из его сополимерных смол изготавливаются биоразлагаемые пакеты.

9. Полифенилсульфон. Термопластичный высокопрочный полимер (рис. 9), активно используемый в промышленности [24]. Материал обладает прекрасной химической и тепловой устойчивостью и огнеупорен. Полифенилсульфон инертен к биологическим реакциям; это позволяет использовать материал для изготовления посуды и контейнеров для пищи. Диапазон температур – от –50° до +180° С. Материал невосприимчив к воздействию горюче-смазочных материалов и растворителей.

Полифенилсульфон в 3D-печати редко используется из-за высокой температуры, достигающей 370° С. Такие температуры возможны в настольных принтерах при использовании в них керамических сопел.

Сегодня компания Stratasys является единственным активным пользователем этого материала. Компания Stratasys предлагает промышленные 3D-принтеры, печатающие данным материалом под названием Fortus.

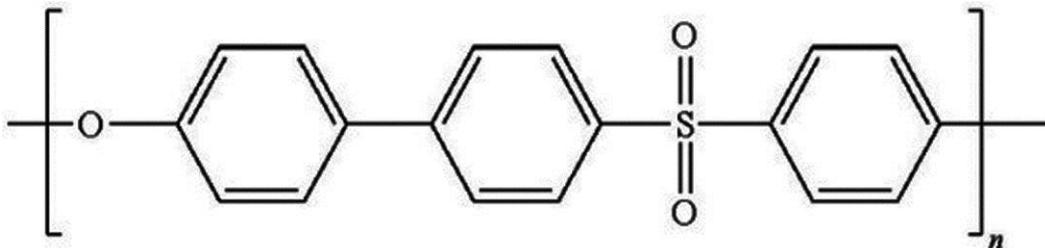


Рис. 9. Химическая формула полифенилсульфона

10. **Полиметилметакрилат (ПММА).** Прозрачный, синтетический, термопластичный виниловый полимер метилметакрилата (рис. 10), известный в бытовом названии как оргстекло. Полиметилметакрилат безопасен для окружающей среды, прочен, легко поддается склеиванию, влагоустойчив и устойчив к воздействию солнечного света [25, 26].

Данный пластик в силу ряда причин не подходит для использования в АТ. ПММА из-за внутренних напряжений не может храниться в виде нити, намотанной на катушку. Быстрое застывание полимера требует высокой скорости печати и постоянного контроля температуры рабочей камеры.

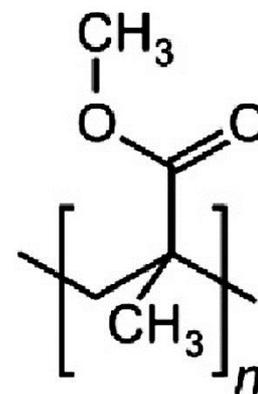


Рис. 10. Химическая формула полиметилметакрилата

Попытки применения данного материала для печати предпринимаются постоянно. Положительные результаты есть, однако при печати моделей избежать проблемы появления пузырьков не удастся.

11. **Полиэтилентерефталат (ПЭТФ).** Материал поликонденсации терефталевой кислоты (или диметилловым эфиром) с этиленгликолем (рис. 11). Данный пластик широко используется для производства медицинской и пищевой тары, а также бутылок. Имеет химическую устойчивость к щелочам, органическим растворителям и кислотам.

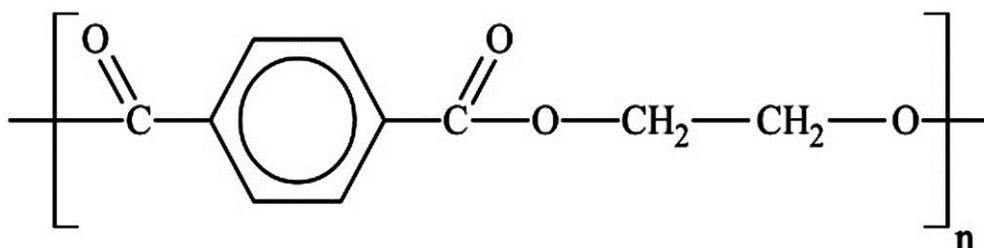


Рис. 11. Химическая формула ПЭТФ

ПЭТФ обладает высокой стойкостью к температурам от -40°C до $+75^{\circ}\text{C}$, легко механически обрабатывается.

Однако печать ПЭТФ проблематична из-за высокой температуры плавления – 260°C и высокой усадки при остывании (до 2 %).

Условия использования ПЭТФ в качестве расходного материала аналогичны печати ABS-пластиком [26, 27]. Для получения прозрачных моделей требуется максимально быстрое охлаждение после прохождения склеивания слоёв до температуры $70\text{-}80^{\circ}\text{C}$.

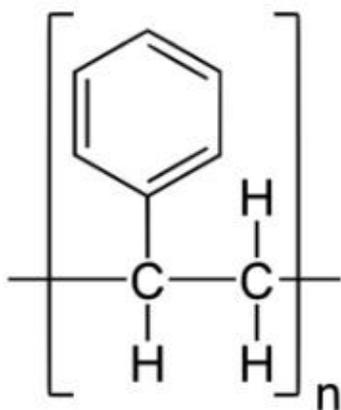


Рис. 12. Химическая формула полистирола

12. Полистирол. Термопластичный полимер (рис. 12), обладает линейной структурой. Широко применяется в промышленности для изготовления игрушек, изделий для быта, стройматериалов, одноразовой посуды, медицинструментов и т. д. [28, 29].

Физические и механические свойства полистирола схожие с пластиком ABS.

Особенность полистирола – это его химические свойства: полистирол легко растворяется в растворителе лимонене. В то же время ABS в лимонене не растворяется, возможно использование полистирола как материала для создания внутренних поддерживающих легко убираемых опор. В сравнении с водорастворимым ПВС полистирол отличается более низкой ценой и устойчивостью к влаге.

Стоит заметить, что некоторые недобросовестные фирмы-изготовители филаментов подменяют ABS более дешевым полистиролом и, как следствие, модели вместе с опорными структурами могут растворяться в D-лимонене. (D-лимонен – терпеновый углеводород, являющийся основным компонентом масла апельсиновой кожуры (до 80-90 %). Является прозрачной, бесцветной жидкостью, имеющей сладкий цитрусовый запах. Используется для удаления структур поддержки и/или постобработки напечатанной детали).

При разогреве полистирола до температуры плавления возможно выделение вредных испарений, поэтому печать рекомендуется осуществлять в помещениях с хорошей вентиляцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленной информации видно большое разнообразие существующих материалов, используемых как в традиционном производстве, так и при FDM-печати.

Применение данных материалов в АТ даёт уникальную возможность получения деталей сложнейшей формы, сильно снижая затраты на технологическую подготовку производства.

3D-принтеры позволяют изготавливать детали с прочностными характеристиками, близкими по характеристикам к деталям, полученным традиционной технологией литья под давлением, при этом весовые параметры деталей, полученных методами АТ, оказываются много меньше.

Сегодня идет тенденция модифицировать представленные материалы путем введения в них разнообразных композитных присадок – это раздвигает границы рассмотренных материалов в АТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3-33.
2. Современные проблемы автоматизации и управления в машиностроении: учеб. пособие: в 4 ч. Ч. 3 / А.А. Игнатьев, М.Ю. Захарченко, В.А. Добряков, С.А. Игнатьев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2020. 88 с.
3. Расходные материалы для 3D-принтеров, а также информация о новейших доступных и разрабатываемых материалах. URL: <https://3dtoday.ru/category/rashodnie-materialy>.
4. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. № 1. С. 2-6.
5. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2-6.
6. Никифоров А.А., Соболева Т.Ю. Литье по выплавляемым моделям. Технологии быстрого прототипирования // Современные материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 27 декабря 2013 года / отв. ред. А.А. Горохов. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2013. С. 251-253.
7. ГОСТ 33366.1-2015. Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Ч. 1. Основные полимеры и их специальные характеристики: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2017-01-01 / Межгосударственный совет по стан-

дартизации, метрологии и сертификации. Официальное изд. Москва: Стандартинформ, 2016. 8 с.

8. ГОСТ 33366.2-2015. Пластмассы. Условные обозначения и сокращения. Ч. 2. Наполнители и армирующие материалы: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2017-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Официальное изд. Москва: Стандартинформ, 2016. 7 с.

9. Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Технологии и материалы 3D-печати. Екатеринбург: Уральск. гос. лесотехнич. ун-т, 2017. 100 с.

10. Обзор существующих пластиков для 3D-печати. URL: <https://cvetmir3d.ru/blog/3d-obzory/3d-svyazuuyushchaya-nit-obzornyy-putevoditel-po-materialam-dlya-fdm-3d-pechati/>

11. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2021-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Официальное изд. Москва: Стандартинформ, 2020. 12 с.

12. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Функциональные материалы, полученные способом FDM-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). С. 44-57. DOI 10.18577/2307-6046-2021-0-3-44-57.

13. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т промышленных технологий и дизайна, 2017. 30 с.

14. Гид по выбору пластика для 3D-печати. URL: https://lider-3d.ru/wiki/nachinayushchim-v-3d-pechati/gid_po_vyboru_plastika_dlya_3d_pechati/

15. Пластики для 3D-печати: сравнение PLA, ABS, PET/PETG, HIPS, PP, ASA, NGEN, PC-ABS, FLEX, нейлона и композитов. URL: <https://www.qbed.space/knowledge/blog/filament-comparison>

16. Полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов (обзор) / А.Х. Шаов, А.М. Хараев, А.К. Микитаев, Г.С. Матвелашвили, З.С. Хасбулатова // Пласт. массы. 1992. № 3. С. 3-7.

17. Расходные материалы для FDM печати. URL: <https://3d-m.ru/rashodnye-materialy-dlya-fdm-pechati/>

18. Варнавский А.Н., Королев А.А., Никифоров А.А. Основы проектирования прессовой оснастки для литья пластмасс: учеб. пособие для студентов машиностр. специальностей. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. 85 с.

19. Оссвальд Т., Тунг Л.-Ш., Грэмман П.Дж. Литье пластмасс под давлением / пер с англ. под ред. Э.Л. Калинцева. СПб: Профессия, 2006. 712 с.

20. Чем печатать: материалы для 3D-печати. URL: <https://top3dshop.ru/blog/materials-for-3dprint.html>
21. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Павлов С.П. Исследование теплофизических характеристик стекло-углепластиков и материалов, сформированных на основе аддитивных технологий по технологиям 3DP FDM // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2018. № 2 (44). С. 26-33.
22. Новаков И.А. Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов: сб. науч. тр. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 1992. 144 с.
23. Зиновьев В.М., Сухинин В.С. Основы промышленного синтеза, свойства и применение пластических масс: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2004. 209 с.
24. Виноградова Ю.М., Воронков Б.Д. Износостойкие материалы в химическом машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
25. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб: Профессия, 2006. 624 с.
26. Обзор высокотемпературных FDM-пластиков для промышленной 3D-печати. URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/409595/>
27. Полимеры в узлах трения машин и приборов: справочник / А.Л. Левин [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
28. Ароматические полиэфиркетоны и полиэфирэфиркетоны / А.Х. Шаов, А.М. Хараев, А.К. Микитаев, А.З. Карданов, А.С. Хасбулатова // Пласт. массы. 1990. № 11. С. 14-17.
29. Нафеев А.Ю. Исследования прочностных характеристик пятиугольной призмы, напечатанной методом FFF/FDM / науч. рук. М.Н. Тимофеев // Современные материалы и технологии: сб. материалов II Междунар. молодеж. конф. Саратов, 19-20 мая 2021 г. Саратов, 2021. С. 188-190.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Андрей Владимирович –
бакалавр кафедры «Технология и системы
управления в машиностроении»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Andrey V. Zhukov –
Bachelor, Department of Control
Systems Technology in Mechanical
Engineering, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Машиностроение и машиноведение

=====

Никифоров Александр Анатольевич –
кандидат технических наук,
директор Института электронной техники
и приборостроения Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander A. Nikiforov –
Director, Institute of Electronic
Engineering and Instrumentation,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Яковишин Александр Сергеевич –
ассистент кафедры «Технология и системы
управления в машиностроении»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Alexander S. Yakovishin –
Assistant Lecturer, Department of
Control Systems Technology in
Mechanical Engineering,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.11.21, принята к опубликованию 17.11.21

Т.Г. Насад, И.П. Насад, К.Т. Шеров

**МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУР В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ
ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. В статье рассмотрены методы определения температур в зоне резания. Выявлено, что наиболее эффективным методом определения влияния теплового фактора на формирование микрогеометрических характеристик при обработке труднообрабатываемых материалов является аналитический метод.

Ключевые слова: формообразование, труднообрабатываемые материалы, технические характеристики, тепловые процессы

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

**METHODOLOGY FOR ANALYSIS
OF TEMPERATURES IN THE CUTTING ZONE WHEN PROCESSING
HARD-TO-MACHINE MATERIALS**

Abstract. The article considers the methods applied to determine the temperatures in the cutting zone. It has been revealed that analytical methodology can be most effectively used to determine effects of the thermal influence on formation of microgeometric properties under processing hard-to-machine materials.

Keywords: forming, hard-to-machine materials, technical characteristics, thermal processes

ВВЕДЕНИЕ

Теплофизический анализ методов механической обработки имеет исключительно важное значение с позиций повышения эффективности обработки. В основе методов главную роль играет тепловой фактор, так как именно он влияет на характеристики всех подсистем исследуемого процесса и, в конечном итоге, способствует формированию качества поверхности и росту производительности обработки.

Анализ известных теплофизических моделей и методов показал, что наибольшими возможностями по установлению связей и зависимостей между параметрами процесса, а также управлению ими, обладает метод тепловых источников. При необходимости повысить точность расчетов с детальным учетом конкретных условий протекания процесса можно использовать численные методы (МКЭ, МКР, МГЭ).

ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее важным направлением теплофизических исследований является определение температур на контактных площадках инструмента и детали, так как именно здесь наблюдаются изменения в поверхностном слое, структурные превращения, возникают технологические остаточные напряжения.

Достаточно полный анализ влияния тепловых процессов на эффективность обработки труднообрабатываемых материалов может быть выполнен, если учитывать концептуальные основы (рис. 1). При этом учитывается распределение внешних и внутренних источников теплоты, а также параметров технологической системы (ТС), к которым относятся:

- конструктивные (форма, масса, кинематические свойства и т. п.);
- физико-механические и теплофизические (прочность, пластичность, твердость, коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и т. п.);
- технологические (свойства окружающей среды, режимы эксплуатации, резания, требования к качеству поверхности и т. п.).

Теплофизический анализ большинства методов обработки с использованием метода источников теплоты представлен обобщенной методикой [6].

Общую мощность тепловыделения при резании полагают эквивалентной механической работе деформирования материала и работе сил трения на контактных площадках инструмента, т. е.

$$W = W_{д} + W_{1Г} + W_{2Г} \quad (1)$$

где $W_{д}$, $W_{1Г}$, $W_{2Г}$ – соответственно мощности тепловыделения источников, возникающих в процессе обработки в области плоскости сдвига на передней и задней поверхности инструмента.

В случае, когда имеет место наложение нескольких видов энергии, кроме основной работы резания, общая мощность тепловыделения определяется выражением

$$W^+ = W_{д}^+ + W_{1Г}^+ + W_{2Г}^+ + W_{в}^+ \quad (2)$$

где $W_{в}^+$ – мощность дополнительных источников (внешних). Знак «+» означает, что рассматривается процесс резания с дополнительной энергией.



Рис. 1. Применение системного подхода к анализу и выбору теплофизической модели

При обычном резании температура от действия подвижного наклонного источника тепла распределяется довольно равномерно [2, 3] и составляет $\approx 0,215\Theta_{пл}$. При обработке на высоких скоростях или с использованием дополнительного нагрева зародившаяся плоскость сдвига является единственной до конца формирования элемента стружки, поэтому деформации и тепловыделения происходят в узкой полосе металла (10-20 мкм), что приводит к росту температуры до $0,65\Theta_{пл}$ и выше [5, 6].

Так как у большинства материалов при таких температурах значительно снижается прочность, целесообразно использовать модели для определения температур в плоскости сдвига с учетом сопротивления обрабатываемого материала пластическому сдвигу τ_p [5, 6]:

$$\tau_p = \tau_0 \left(\frac{1 + 1/B^2}{1/B^2 + tg\gamma} \right)^{0,73\delta} \cdot \exp \left[-7 \left(\frac{0,825\Theta}{\Theta_{пл}} \right)^{3n^{0,135}} \right] \quad (3)$$

$$\Theta = \frac{\tau_p}{c\rho} \sqrt{\frac{Pe}{\pi} \cdot \frac{1/B tg\gamma}{1 + B^2}} \quad (4)$$

где τ_0 – касательные напряжения в образце при относительном сдвиге $\varepsilon = 1$; $B = tg\beta_1$ (β_1 – угол наклона плоскости сдвига); γ – передний угол; δ – относительное удлинение образцов; n – процентное содержание γ' – фазы в жаропрочном сплаве (для других случаев $n = 1$); $\Theta_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала; $c\rho$ – удельная теплоемкость обрабатываемого материала; Pe – критерий Пекле, определяемый выражением

$$Pe = \frac{Va_1}{\omega}, \quad (5)$$

где V – скорость резания, a_1 – толщина среза, ω – коэффициент теплопроводности.

Полученное решение в общей математической модели процесса обработки позволяет с высокой степенью точности рассчитать температуру на контактных площадках инструмента и составляющие силы резания. Условия перехода от обычного резания к локальному сдвигу (для различных групп обрабатываемых материалов):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = - \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \varepsilon}, \quad (6)$$

где ε – деформация сдвига; σ – напряжения текучести в зоне сдвига; T – температура в зоне сдвига.

С увеличением скорости резания температура в зоне резания достигает критического значения, за которым следует локальный сдвиг. Температура сдвига равна

$$T = \frac{1,166\omega\sqrt{aV}\sigma_m \cos \gamma}{(1,166\sqrt{aV} \sin \Phi + \lambda\sqrt{\pi\omega} \sqrt{\operatorname{tg} \Phi}) \cdot \cos(\Phi - \gamma)}, \quad (7)$$

где V – скорость резания; σ_T – напряжения текучести в зоне сдвига.

При расчете производной $\frac{\partial T}{\partial \varepsilon}$, с учетом известных зависимостей для деформации сдвига используют формулу

$$\frac{\partial T}{\partial \varepsilon} = \frac{A \left\{ B \cos(2\Phi - \gamma) + C \left[\frac{\cos(\Phi - \gamma)}{2 \cos^2 \Phi \sqrt{\operatorname{tg} \Phi}} - \sqrt{\operatorname{tg} \Phi} \sin(\Phi - \gamma) \right] \sin^2 \Phi \right\}}{(B \sin \Phi + C \sqrt{\operatorname{tg} \Phi})^2 \cos(2\Phi - \gamma)}, \quad (8)$$

где $A = 1,166\omega V \sqrt{a} \sigma_T$; $B = 1,166\lambda V \sqrt{a}$; $C = \lambda \sqrt{\pi\omega V}$.

Для оценки производной $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$ можно пользоваться интерполяционной зависимостью напряжения от температуры и твердости материала:

$$\sigma = (3,92\sqrt{3} + 4,55 \frac{\varepsilon}{6}) HB \exp(-bT^2). \quad (9)$$

Из приведенных данных следует, что значения критических скоростей определяются главным образом физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, передним углом РИ γ и толщиной срезаемого слоя.

Интересный подход к созданию теплофизической модели предложен в работе [1]. Технология термофрикционной отрезки обладает определенной спецификой, основанной на разупрочнении обрабатываемого материала в зоне резания за счет высокой скорости трения – скольжения, поэтому теплофизическая модель существенно отличается от традиционного подхода.

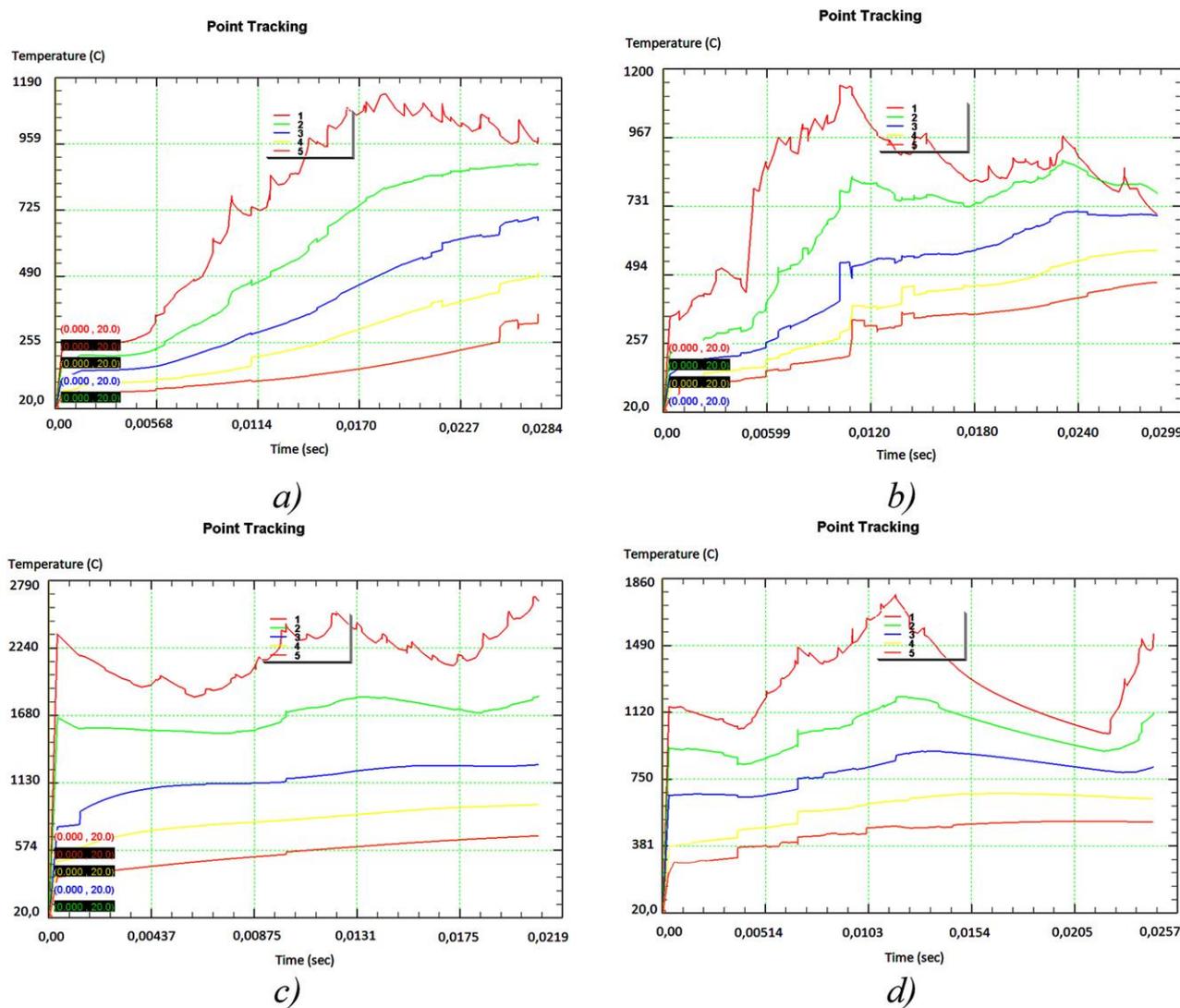
Чем выше скорость вращения инструмента, тем большее количество теплоты аккумулируется в контакте. Вследствие этого обрабатываемый материал подвергается разупрочнению, а режущий диск сохраняет прочностные свойства за счет предложенной конструкции [1].

Применялась модель Джонсона-Кука, параметры которой представлены в табл. 1.

Параметры модели Джонсона-Кука для титанового сплава Ti-5553

A	B	n	C	m
1175	728	0,26	0,09	0,72

В результате моделирования было получено распределение температуры по глубине заготовки в зоне контакта «инструмент – деталь» и получены графические зависимости распределения температуры от времени сегмента с маркировкой контактного слоя, распределенные по глубине заготовки.



$a, c - n\delta = 2000$ об/мин; $b, d - n\delta = 3000$ об/мин; $a, b - L_1 = 18$ мм, $L_2 = 14$ мм;
 $c, d - L_1 = 26$ мм, $L_2 = 6$ мм; $S = 120$ мм/мин

Рис. 2. Графики распределения температуры в зависимости от времени сегмента с маркировкой контактного слоя в глубь заготовки для различных размеров L_1 и L_2

Результаты анализа графиков зависимости изменения температуры от времени работы диска приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа графиков зависимости изменения температуры от времени обработки

Геометрия инструмента		Скорость вращения n_d , р/мин	Время установления процесса обработки, с	Достижимая температура, T , °С
L_1 , мм	L_2 , мм			
18	14	2000	0,0114	800
		3000	0,0059	900
26	6	2000	0,0011	1130
		3000	0,0009	1120

Полученные результаты свидетельствуют о том, что величина времени установления процесса термофрикционной резки при импульсном охлаждении находится в диапазоне 0,0009 (0,0114 с), а значения достигнутой температуры колеблются в пределах $T = 800-1130^\circ \text{C}$.

ВЫВОДЫ

Анализ методов теплофизических исследований показал, что при необходимости изучения связей и зависимостей между параметрами процесса, разработки методов управления процессом резания целесообразно использование метода тепловых источников.

Численные методы моделирования позволяют учесть специфику тепловых процессов, повысить точность расчетов, но обладают определенными ограничениями в рамках протекания исследуемого процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ методов аналитического определения температуры резания при термофрикционной обработке / С.С. Айнабекова, К.Т. Шеров, Т.Г. Насад, А.В. Маздубай, Р. Габдысалык, А.К. Шеров // Механика и Технология. 2020. № 3. С. 14-23.
2. Surface-layer quality after high-speed turning of hard material / I.E. Kiryushin, D.E. Kiryushin, S.B. Venig, T.G. Nasad, M.O. Stepanova, D.V. Terin // Russian Engineering Research. 2014. Т. 34. № 6. С. 423-424.
3. Benefits of high-speed milling / I.E. Kiryushin, D.E. Kiryushin, T.G. Nasad, S.B. Venig // Russian Engineering Research. 2012. Т. 32. № 1. С. 48-49.

4. Nasad T.G., Kochetkov A.V. Highly efficient methods of machining titanium for oil-gas drilling equipment // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Т. 52. № 3. С. 227-230.

5. Насад Т.Г., Шеров К.Т., Насад И.П. Теплофизические аспекты гибридных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 47-52.

6. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 281 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Tatyana G. Nasad – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Technologies and Management in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Irina P. Nasad – Postgraduate, Department of Technologies and Management in Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 03.11.21, принята к опубликованию 17.11.21

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.793

О.А. Маркелова, С.Я. Пичхидзе

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ КАЛЬЦИЙФОСФАТОВ

Аннотация. Методами металлографии и растровой электронной микроскопии исследована микроструктура поверхности плазменных покрытий на основе металлосодержащих кальцийфосфатов. Определены размеры агломератов и отдельных частиц. Установлено, что покрытия состоят из наплавленных частиц размером 50-150 мкм, частицы формируют агломераты размером 150 мкм и более. Использование таких режимов плазменного напыления для порошков металлосодержащих кальцийфосфатов как: ток дуги плазмотрона – 300-350 А, дистанция напыления – 50-100 мм, дисперсность порошка – до 90 мкм, расход транспортирующего газа – 5-7 л/мин позволяет сформировать равномерное покрытие, обладающее достаточной адгезионной прочностью.

Ключевые слова: плазменное напыление, покрытие, металлосодержащие кальцийфосфаты

О.А. Markelova, S.Ya. Pichkhidze

STRUCTURAL, MORPHOLOGICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PLASMA COATINGS BASED ON CALCIUM PHOSPHATE METAL-CONTAINING POWDERS

Abstract. The surface microstructure of plasma coatings based on metal-containing calcium phosphates has been studied by metallography and scanning electron microscopy. The size of agglomerates and individual particles are determined. It has been established that the coatings consist of molten particles of 50-150 microns in size, the particles form

agglomerates with the size of 150 microns or more. The plasma spraying modes for calcium phosphates metal-containing powders included the following: the arc current of the plasma torch of 300-350 A, the spraying distance of 50-100 mm, the powder dispersion up to 90 microns, the flow rate of the transporting gas of 5-7 l/min, allow formation of a uniform coating having sufficient adhesive strength.

Keywords: *plasma spraying, coating, metal-containing calcium phosphates*

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного биоматериаловедения следует по пути разработки новых материалов и покрытий, обладающих повышенным остеоинтеграционным потенциалом и биосовместимостью [1, 2]. Механическое восполнение и коррекцию дефектов костной ткани обычно выполняют с использованием имплантатов, изготовленных из биоинертных материалов (титан, цирконий, тантал) [2].

Для придания внутрикостной части металлических имплантатов биоактивных свойств на их поверхность наносят специальные покрытия, например методом плазменного напыления [3-5]. Принцип плазменного напыления заключается в распылении расплавленного материала (прутка или порошка) и транспортировке его в среде газа на поверхность подложки [6].

Покрытия, сформированные методом плазменного напыления, обладают высокой пористостью наравне с достаточной адгезионной прочностью в отличие от покрытий, полученных с использованием других технологий [7, 8]. К основным параметрам качества покрытий, полученных методом плазменного напыления, относят: толщину, адгезию, пористость, микротвердость, химический состав покрытия и подложки, структуру и морфологию покрытия [6].

Существует множество методов модификации плазменных покрытий, таких как термообработка, ультразвуковая и лазерная обработка и др. [9-11], позволяющих улучшить их структурно-морфологические или механические характеристики.

Перспективной технологией является модификация не полученного покрытия, а напыляемого материала (например, кальцийфосфатов), что позволяет улучшить адгезионные свойства покрытий, придать антибактериальный и другие эффекты. Так, введение магния в структуру такой наиболее распространенной в имплантологии кальцийфосфатной керамики как гидроксипатит позволяет повысить его механические свойства [12].

Использование серебра и цинка в качестве вещества, замещающего часть кальция в структуре кальцийфосфатов, позволяет добиться получения антимикробного эффекта [13, 14].

Таким образом, целью исследования являлось изучение структурно-морфологических и механических характеристик плазменных покрытий на основе по-

рошков металлсодержащих (магний, цинк) кальцийфосфатов (гидроксиапатит, трикальцийфосфат, фторапатит).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Порошки магний (Mg)- и цинксодержащих (Zn) гидроксиапатита (ГА), трикальцийфосфата (ТКФ), фторапатита (ФАП) были синтезированы из водных растворов по известным и оригинальным методикам. Получившийся осадок подвергали старению в течение 24 ч и отжигали при температуре 900° С. Порошок размалывали в ступе в течение 30 мин и подвергали диспергированию, используя сита с размером ячейки 90 мкм.

Покрытие наносили на титановые образцы марки ВТ1-0 размером 15 × 20 × 2 мм. Очистку образцов осуществляли в ультразвуковой ванне при частоте 22-23 кГц в водном растворе поверхностно-активных веществ при температуре до 40° С в течение 10 мин. Образцы подвергали воздушно-абразивной обработке порошком электрокорунда дисперсностью до 300 мкм в течение 4-5 мин.

Анализ морфологии поверхности проводился с использованием металлографического микроскопа МИМ-7 и автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU.

Адгезию покрытия, полученного методом плазменного напыления, определяли методом сдвига на испытательной универсальной машине ИР 5082-100 при скорости перемещения рабочей траверсы не более 0,5 мм/мин. Образцы склеивали напыленными поверхностями при помощи эпоксидного клея «Henkel Loctite EA 3425», который выдерживает удельные нагрузки на разрыв до 40 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изображений, полученных с использованием металлографического микроскопа, показывает, что покрытия, сформированные порошком MgГА (рис. 1 а), состоящим из частиц размером 10-15 мкм, образующих агломераты размером 50-60 мкм. MgТКФ покрытия (рис. 1 б) представлены округлыми частицами размером 15-20 мкм, равномерно распределенными по поверхности подложки, при этом имеются непокрытые участки основы.

Покрытие на основе MgФАП (рис. 1 в) сформировано частицами размером 5-20 мкм, имеются участки подложки, на которых покрытие отсутствует. Таким образом, наибольшей равномерностью отличаются покрытия на основе MgФАП, но покрытия на основе порошка MgГА образуют агломераты, что способствует более плотной компоновке и покрытию всей поверхности подложки.

Для покрытий, сформированных на основе порошка ZnГА (рис. 1 *з*), характерно наличие скопления мелких частиц размером 5-10 мкм, имеются незначительные участки непокрытой подложки. ZnТКФ покрытия (рис. 1 *д*) отличаются равномерностью и однородностью, размер отдельных напыленных частиц составляет 10-15 мкм. Покрытие на основе ZnФАП наиболее неравномерное, имеются значительные непокрытые участки подложки (рис. 1 *е*), размер частиц составляет 20-40 мкм.

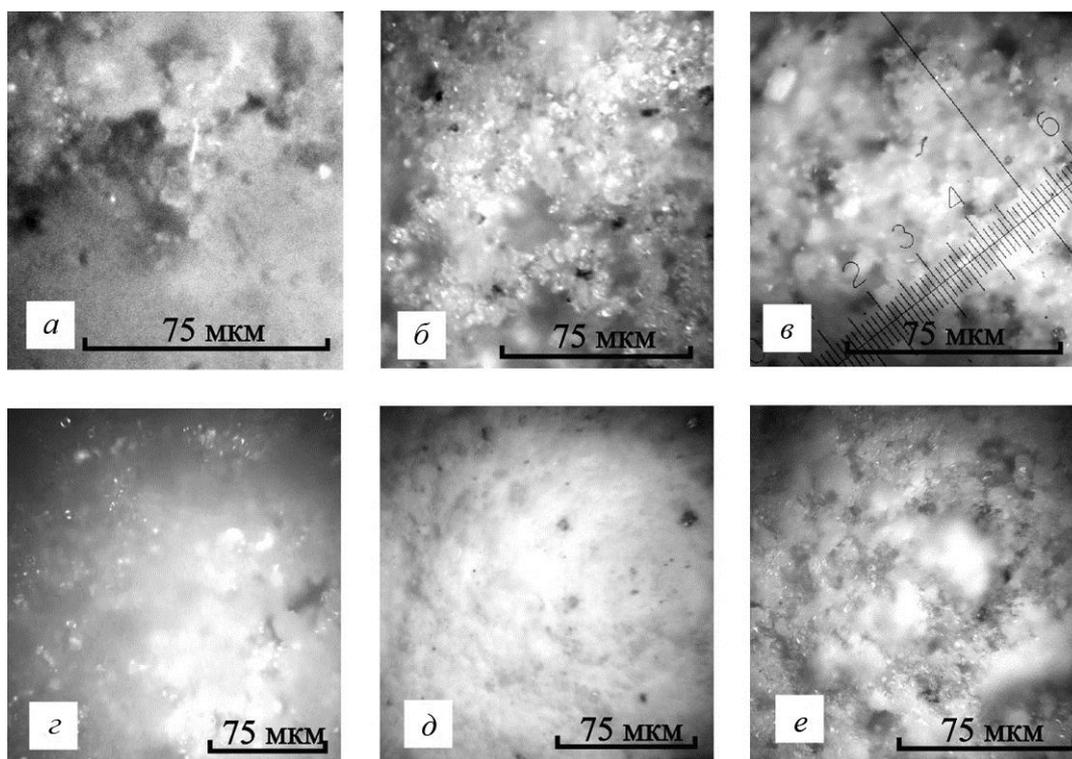


Рис. 1. Микроструктура поверхности образцов с покрытием:
а – MgГА, *б* – MgТКФ, *в* – MgФАП, *з* – ZnГА, *д* – ZnТКФ, *е* – ZnФАП

Анализ результатов растровой электронной микроскопии показывает, что отдельные частицы, из которых образовано покрытие на основе MgГА (рис. 2 *а*), имеют округлую форму, что характерно для всех полученных типов покрытий.

Данный факт связан с кинетикой процесса охлаждения и затвердевания частиц кальцийфосфатов в процессе плазменного напыления. MgТКФ покрытия (рис. 2 *б*) сформированы округлыми частицами размером 5-15 мкм. Зафиксировано наличие мелких пор размером 5-10 мкм. В покрытии MgФАП обнаруживаются частицы вытянутой формы размером 15-20 мкм, на поверхности которых закреплены мелкие частицы размером 2 мкм и менее (рис. 2 *в*).

Плазменное покрытие на основе порошка ZnГА сформировано мелкими частицами 25-30 мкм, на поверхности которых имеются округлые частицы размером 5-10 мкм

и крупными размерами 50-100 мкм (рис. 2 *з*). Покрытие малопористое, с размером пор 2-3 мкм.

Покрытие на основе порошка ZnТКФ (рис. 2 *д*) представлено плоскими проплавленными частицами, на поверхности которых закреплены округлые частицы размером 5-7 мкм и частицы неправильной формы размером 20-30 мкм, обнаружены поры размером 3-5 мкм. Плазменное покрытие на основе ZnФАП отличается наличием частиц размером 2-10 мкм с закрепленными на них мелкими частицами неправильной формы размером менее 2 мкм (рис. 2 *е*).

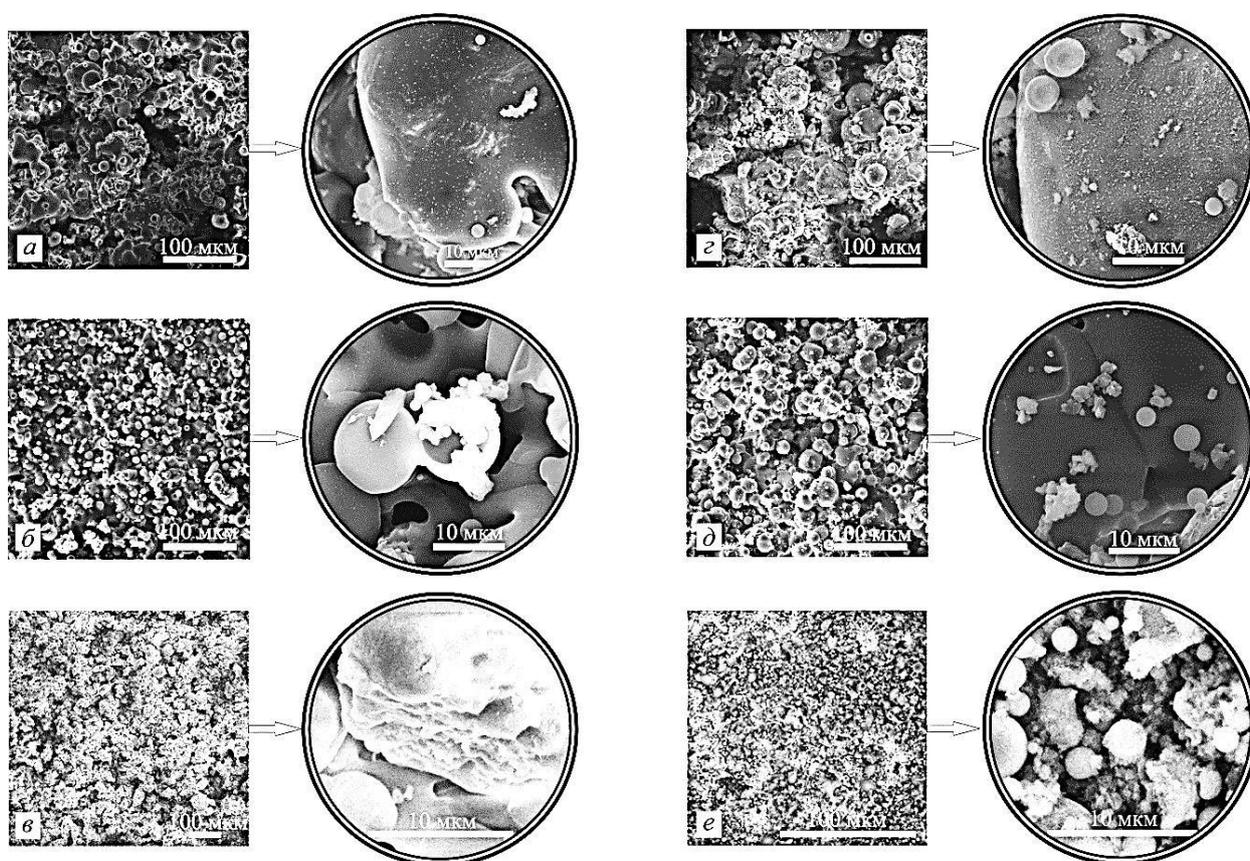


Рис. 2. Микроструктура плазменных покрытий на основе порошков замещенных кальцийфосфатов: *а* – MgГА, *б* – MgТКФ, *в* – MgФАП; *з* – ZnГА, *д* – ZnТКФ, *е* – ZnФАП

Адгезия, или прочность сцепления покрытия с подложкой, является наиболее важным свойством плазменных покрытий. Многие свойства покрытий, в том числе долговечность и срок службы, в значительной степени зависят от величины адгезии.

Наибольшую адгезионную прочность имеют покрытия на основе порошков магнийсодержащих кальцийфосфатов 13-15 МПа (таблица). Покрытия на основе порошков

цинксодержащих кальцийфосфатов имеют адгезионные показатели в пределах 8,5-11 МПа. Данный факт объясняется большей равномерностью поверхности образцов с покрытием на основе магнийсодержащих кальцийфосфатов.

Показатели адгезионной прочности металлсодержащих кальцийфосфатных покрытий

Тип покрытия	Показатели адгезионной прочности, МПа
MgГА	14-14,9
MgТКФ	13-13,5
MgФАП	13-15
ZnГА	9-10
ZnТКФ	8,5-9
ZФАП	10-11

ВЫВОДЫ

Покрытия на основе порошков магнийсодержащих кальцийфосфатов однородны, образованы частицами размером 50-100 мкм и характеризуются достаточной адгезией 13-15 МПа. Покрытия на основе порошков цинксодержащих кальцийфосфатов образованы частицами размером 50-75 мкм, адгезионная прочность покрытий составляет 8,5-11 МПа.

Использование таких режимов плазменного напыления для порошков металлсодержащих кальцийфосфатов как: ток дуги плазмотрона – 300-350 А, дистанция напыления – 50-100 мм, дисперсность порошка – до 90 мкм, расход транспортирующего газа – 5-7 л/мин позволяет сформировать равномерное покрытие, обладающее достаточной адгезионной прочностью.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-63.2019.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко Л.Н. Биоматериаловедение: вклад в прогресс современных медицинских технологий // Клеточная трансплантология и тканевая инженерия. 2005. № 2. С. 56-61.
2. Музыченко П.Ф. Проблемы биоматериаловедения в травматологии и ортопедии // Травма. 2012. Т. 13. № 1. С. 94-98.

3. Рыбакова У.С., Ивасев С.С., Раводина Д.В. Технологии создания биосовместимых покрытий на импланты // Решетневские чтения. 2016. Т. 2. С. 341-342.
4. Effect of the deposition route on the microstructure of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings / M. Chambard, O. Marsan, C. Charvillat, D. Grossin, P. Fort, C. Rey, F. Gitzhofer, G. Bertrand // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 371. P. 68-77.
5. Comparative study of structure and properties of thermal spray coatings using conventional and nanostructured hydroxyapatite powder, for applications in medical implants / P. Gkomoza, M. Vardavoulias, D.I. Pantelis, Ch. Sarafoglou // Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 357. P. 748-758.
6. Фомин А.А. Плазменное напыление порошковых покрытий и электротермическая обработка титановых изделий. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2021. 108 с.
7. Индукционно-термическая обработка стальных пуансонов с металлокерамическими покрытиями и диаграммы предельных деформаций для Стали 45 / А.А. Фомин, М.Е. Федосеев, П.А. Палканов, А. Аман, В.А. Кошуро, А.И. Шумилин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 87-92.
8. Структура и твердость стали X12МФ после электроискрового легирования цирконием и цементации в графитовой пасте / М.Е. Федосеев, В.А. Кошуро, А. Аман, А.А. Фомин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 85-90.
9. Ahmadi M.S. Laser Surface Modification of Air Plasma-Sprayed Al₂O₃/YSZ Multilayer Thermal Barrier Coating to Improve Hot Corrosion Resistance in V₂O₅-Na₂SO₄ Salts / M.S. Ahmadi, R. Shoja-Razavi, Z. Valefi, H. Jamali // Journal of Thermal Spray Technology, 2019. Vol. 28 (8). P. 1906-1918.
10. Modification of vacuum plasma sprayed tungsten coating on reduced activation ferritic/martensitic steels by friction stir processing / H. Tanigawa, K. Ozawa, Y. Morisada, S. Noh, H. Fujii // Fusion Engineering and Design. 2015. Vol. 98. P. 2080-2084.
11. Sure J., Shankar A.R., Mudali U.K. Surface modification of plasma sprayed Al₂O₃-40 wt% TiO₂ coatings by pulsed Nd: YAG laser melting // Optics & Laser Technology. 2013. Vol. 48. P. 366-374.
12. Kannan J. Ferreira. Synthesis and Thermal Stability of Hydroxyapatite-β-Tricalcium Phosphate Composites with Cosubstituted Sodium, Magnesium, and Fluorine // Chem. Mater. 2006. Vol. 18 (1). P. 198-203.
13. Synthesis of antimicrobial monophase silver-doped hydroxyapatite nanopowders for bone tissue engineering / V. Stanic, D. Janackovic, S. Dimitrijevic et al // Appl. Surf. Sci. 2011. Vol. 257. № 9. P. 4510-4518.
14. Effect of several calcination temperature on different concentration zinc substituted calcium phosphate ceramics / M. Wahida, K. Hyieb, C.M. Mardziah, N.R. Nik Roselina, Mo-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Маркелова Ольга Анатольевна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Материаловедение
и биомедицинская инженерия»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

O.A. Markelova –
PhD (Technical Sciences),
Department of Materials Science
and Biomedical Engineering,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Пичхидзе Сергей Яковлевич –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Материаловедение
и биомедицинская инженерия»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

S.Ya. Pichkhidze –
Dr. Sci. Tech., Professor,
Department of Materials Science
and Biomedical Engineering,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.11.21, принята к опубликованию 06.12.21

**Э.Т. Сефералиев, А.Р. Давыдова, Е.В. Барабанова,
И.Ю. Гоц, В.О. Лукьянова, С.Н. Барабанов**

**ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОТВЕРДОСТИ СПЛАВА AL-CE-H,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ КАТОДНОГО
ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Аннотация. Проведены исследования микротвердости сплава Al-Ce-H. Внедрение водорода в матрицу алюминия было произведено при температурах: -20°C , 0°C , 20°C , 50°C . Выявлена зависимость плотности от глубины вдавливания индентора при нагрузках: 0,196 Н, 0,294 Н, 0,392 Н, 0,49 Н соответственно. В ходе исследования было установлено, что показатели плотности поверхности сплава, полученного при температурах: 50°C , 20°C , 0°C , растут, а при -20°C показатели плотности падают.

Ключевые слова: микротвердость, алюминиевый сплав, катодное внедрение, глубина вдавливания, плотность

**E.T. Seferaliev, A.R. Davydova, E.V. Barabanova, I.Yu. Gots,
V.O. Lukyanova, S.N. Barabanov**

**DEPENDENCE OF MICROHARDNESS OF THE AL-CE-H ALLOY
OBTAINED BY THE METHOD OF CATHODIC HYDROGEN
SATURATION UNDER VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS**

Abstract. Microhardness studies have been carried out for the Al-Ce-H alloy. Hydrogen saturation into the aluminum matrix was made at the temperatures -20°C , 0°C , 20°C , and 50°C . Dependence of density on the depth of indentation of the indenter at the loads of 0,196N, 0,294N, 0,392N, and 0,49N, respectively, was revealed. In the course of the study it was found that the density of the surface of the alloy obtained at the temperatures of 50°C , 20°C , and 0°C grow, whereas at -20°C the density indicators fall.

Keywords: micro-hardness, aluminum alloy, cathodic incorporation, indentation depth, density

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач, успешное решение которой во многом будет способствовать дальнейшему прогрессу водородной энергетики, является организация технически и экономически эффективного хранения водорода.

Привлекательность водорода как универсального энергоносителя определяется экологической чистотой, гибкостью и эффективностью процессов преобразования энергии с его участием.

Технология твердофазного хранения водорода основана на свойстве некоторых металлов и их сплавов обратимо поглощать водород. Актуальность проблемы создания эффективных систем обратимого твердофазного хранения водорода определяется ростом потребления высокочистого водорода в различных высокотехнологичных производствах и широким перспективным распространением энергоустановок на базе топливных элементов. В последние годы интерес к металлгидридным технологиям возрос, увеличилось число публикаций, относящихся к разработкам как новых водородопоглощающих материалов, так и металлгидридных устройств. Среди всех видов энергоресурсов неоспоримым преимуществом обладают возобновляемые источники энергии. Например, показана эффективность использования возобновляемых источников энергообеспечения различного типа на основе гидридов алюминия.

Свойство избирательного поглощения водорода твердофазными аккумулирующими материалами обеспечивает высокую степень чистоты выделяемого водорода, даже если при зарядке использовался водород, содержащий примеси.

Однако низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его ожижения, а также высокая взрывоопасность в сочетании с негативным воздействием на свойства конструкционных материалов ставят на первый план проблемы разработки экономически и технически эффективных и безопасных систем хранения водорода.

Именно эти проблемы сдерживают развитие водородной энергетики и технологии в настоящее время [1-4].

Цель работы заключалась в исследовании зависимости плотности поверхностного слоя сплава Al-Ce-H, в котором водород был внедрен при температурах: -20°C , 0°C , 20°C , 50°C , от глубины вдавливания при нагрузках 0,196 Н, 0,294 Н, 0,392 Н, 0,49 Н соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве образцов был взят алюминиевый сплав Al-Ce. Внедрение водорода (H) осуществлялось при помощи потенциостата Р-20Х в течение одного часа при потенциале -1,6 В относительно хлорсеребряного электрода при температурах -20°C , -10°C , 0°C , $10-50^{\circ}\text{C}$ в водно-органическом электролите, в состав которого входят диметилформамид и вода в соотношении 3:7. Температура поддерживалась с помощью термостата ВТ8-2 фирмы Теттех (Россия) с точностью $\pm 0,1^{\circ}$.

При помощи прибора ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) методом статистического вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136° под нагрузкой ин-

дентора (0,196 Н, 0,294 Н, 0,392 Н, 0,49 Н) измерялась микротвердость сплава. По результатам испытания определяли величину диагонали восстановленного отпечатка и рассчитывали число твердости по формуле

$$HV = 0,189 * P / C^2, \quad (1)$$

где P – масса груза, г; C^2 – длина диагонали, мм (ГОСТ 9.450-76). Число параллельных опытов – 4 [2].

Для исследования были взяты образцы:

- 1 – чистый металл;
- 2 – образцы, подвергшиеся внедрению Н.

Ниже на рис. 1 и 2 представлены графики изменения микротвердости сплава Al-Ce-H.

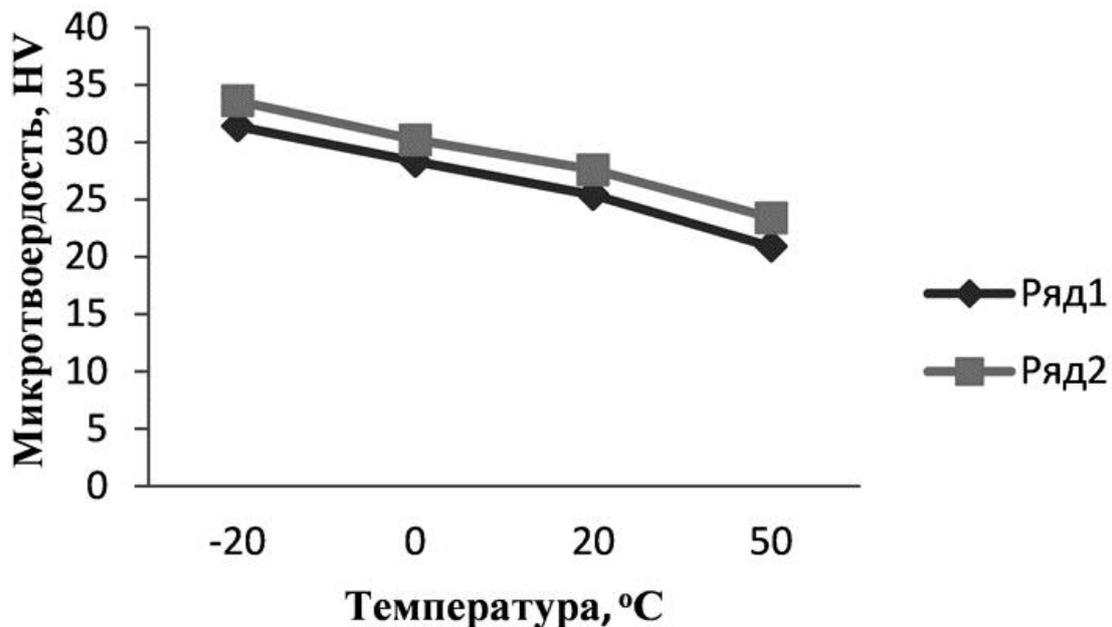


Рис. 1. Зависимость микротвердости сплава Al-Ce от температуры, при которой был внедрен водород при нагрузках 0,49 Н и 0,392 Н:
 ряд 1 – зависимость микротвердости сплава при нагрузке 0,49 Н,
 ряд 2 – зависимость микротвердости сплава при нагрузке 0,392 Н

Исследование показало, что при внедрении водорода (Н) в алюминиевый сплав микротвердость при нагрузках 0,49 Н и 0,392 Н уменьшается в 1,5 и 1,4 раза соответственно.

Из графика на рис. 2 видно, что микротвердость алюминиевого сплава уменьшается в 1,4 и 1,3 раза при нагрузках 0,294 Н и 0,196 Н соответственно.

Нагрузки: 0,196 Н, 0,294 Н, 0,392 Н, 0,49 Н были выбраны для определения глубины вдавливания h , пользуясь формулой (2), при помощи которой возможно определение плотности поверхности:

$$h = \frac{d}{0,1428} \tag{2}$$

где h – глубина отпечатка, d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка.

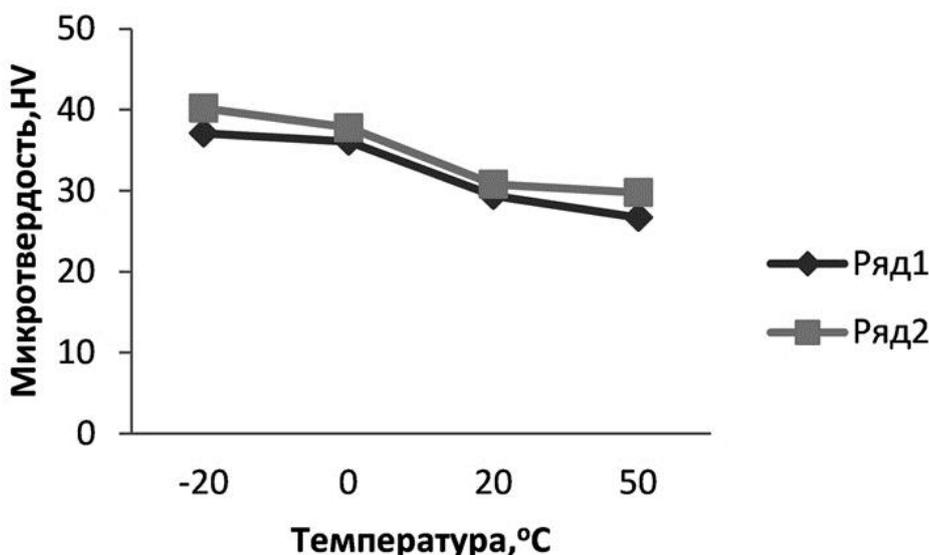


Рис. 2. Зависимость микротвердости сплава Al-Ce от температуры при внедрении водорода (H), при нагрузках 0,49 Н и 0,392 Н: ряд 1 – зависимость микротвердости сплава при нагрузке 0,294 Н, ряд 2 – зависимость микротвердости сплава при нагрузке 0,196 Н

Плотность поверхности определяется формулой (3)

$$p = \frac{HV}{h}, \tag{3}$$

где h – глубина отпечатка, HV – число микротвердости по Виккерсу.

Результаты исследования влияния глубины вдавливания на плотность поверхности алюминиевого сплава Al-Ce-H, полученного при температурах 50° С и 20° С, приведены в табл. 1, 2 и на рис. 3.

Таблица 1

Al-Ce-H (50° С)				
Нагрузка, Н	d_{cp}	h	HV_{cp}	p
0,49	66,1	9,2	20,9	1,1
0,392	58,7	7,9	23,4	2,9
0,294	52,4	6,4	26,7	4,3
0,196	31,1	4,8	29,8	6,2

Таблица 2

Al-Ce-H (20° C)				
Нагрузка, Н	d_{cp}	h	HV _{cp}	p
0,49	57,45	9,54	25,4	2,8
0,392	46,4	7,3	27,6	3,8
0,294	47	6,4	29,4	4,9
0,196	32,2	4,47	30,8	6,6

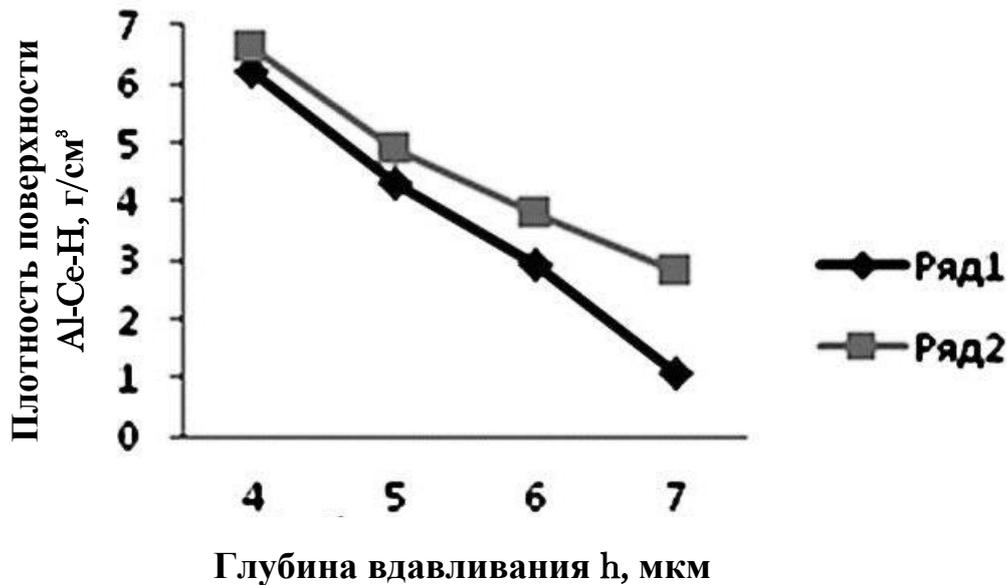


Рис. 3. Графики зависимости плотности от глубины вдавливания индентора:
 ряд 1 – сплав Al-Ce-H, полученный при температуре 50° С,
 ряд 2 – сплав Al-Ce-H, полученный при температуре 20° С

Используя данные из графика на рис. 3, можно сделать следующий вывод.

Плотность сплава, полученного при температурах 50° С и 20° С, уменьшилась в 5,1 и в 2,3 раза соответственно.

Результаты исследования влияния глубины вдавливания на плотность поверхности алюминиевого сплава Al-Ce-H, полученного при температурах 0° С, -20° С, приведены в табл. 3, 4 и на рис. 4.

Таблица 3

Al-Ce-H (0° C)				
Нагрузка, Н	Нагрузка, Н	Нагрузка, Н	Нагрузка, Н	Нагрузка, Н
0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
0,392	0,392	0,392	0,392	0,392
0,294	0,294	0,294	0,294	0,294
0,196	0,196	0,196	0,196	0,196

Таблица 4

Al-Ce-H (-20° С)				
Нагрузка, Н	d_{cp}	h	HV _{cp}	ρ
0,49	60,9	10,2	31,4	3
0,392	57,8	9,6	33,6	3,5
0,294	55,2	7,1	37,1	4,8
0,196	46,2	6,28	40,2	6,4

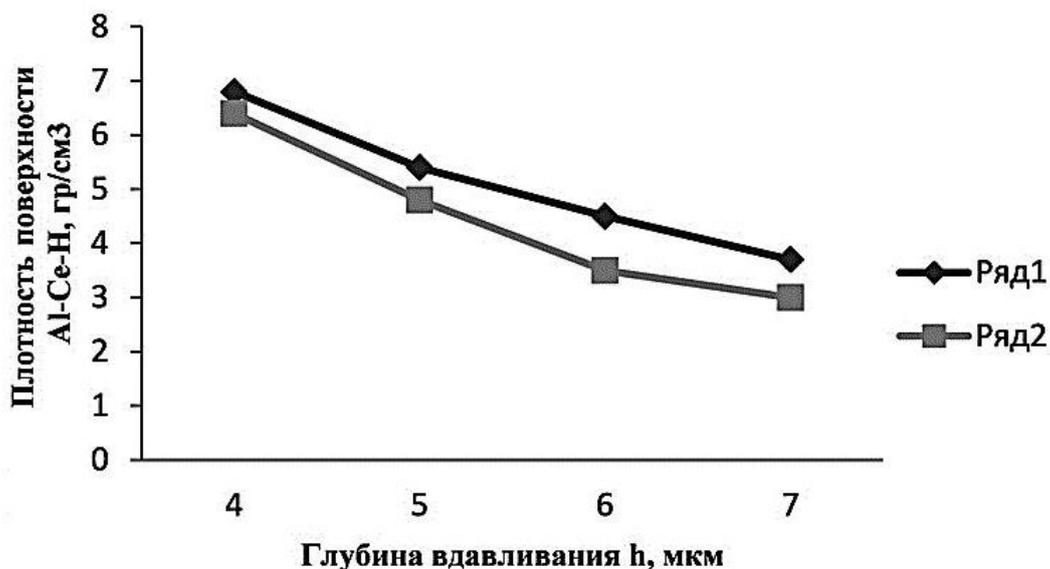


Рис. 4. Графики зависимости плотности от глубины вдавливания индентора:
 ряд 1 – сплав Al-Ce-H, полученный при температуре 0° С,
 ряд 2 – сплав Al-Ce-H, полученный при температуре -20° С

Используя данные из графика на рис. 4, можно сделать следующий вывод.

Плотность сплава, полученного при температурах 0° С и -20° С, уменьшилась в 2,1 и в 1,3 раза соответственно.

Пористость алюминиевого сплава представлена в табл. 5 и на рис. 5 и выражена в виде зависимости на рис. 6.

Таблица 5

Температура, °С	Пористость, %
50	53
20	55
0	57
-20	61

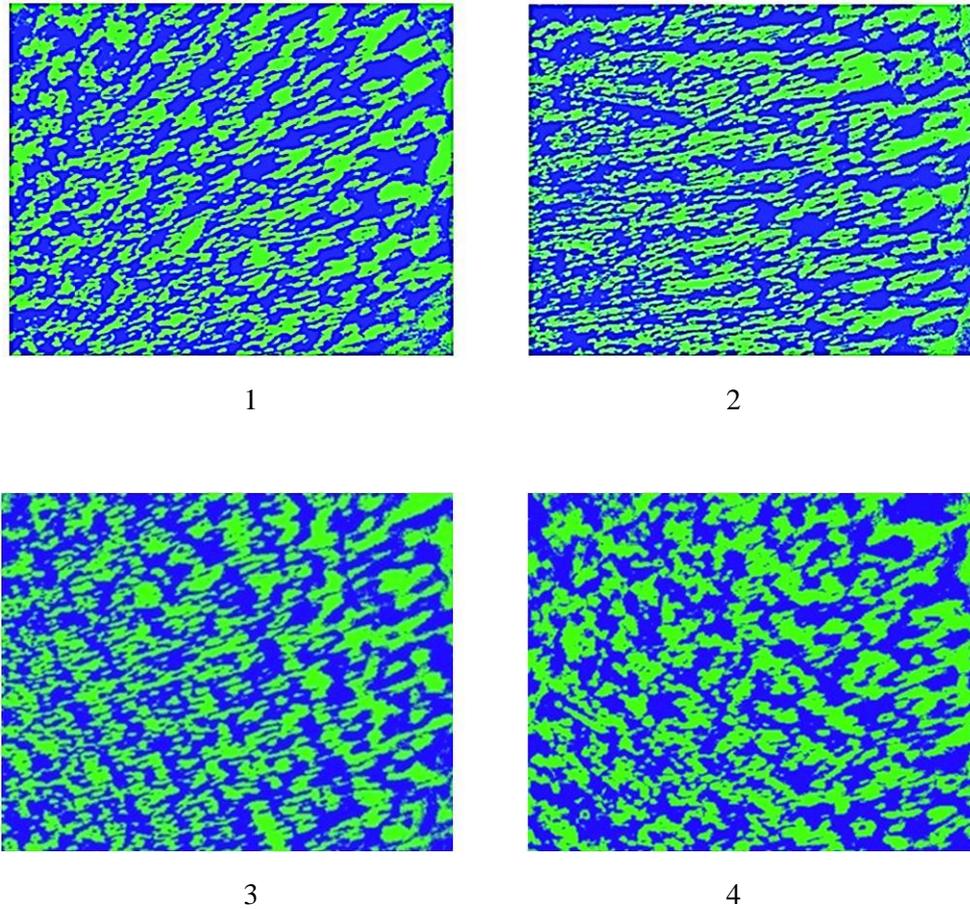


Рис. 5. Алюминиевый сплав Al-Ce-H, полученный:
 1 – при температуре 50° С, 2 – при температуре 20° С.
 Пористость составляет 53 и 55 % соответственно
 3 – при температуре 0° С, 4 – при температуре -20° С.
 Пористость составляет 57 и 61 % соответственно

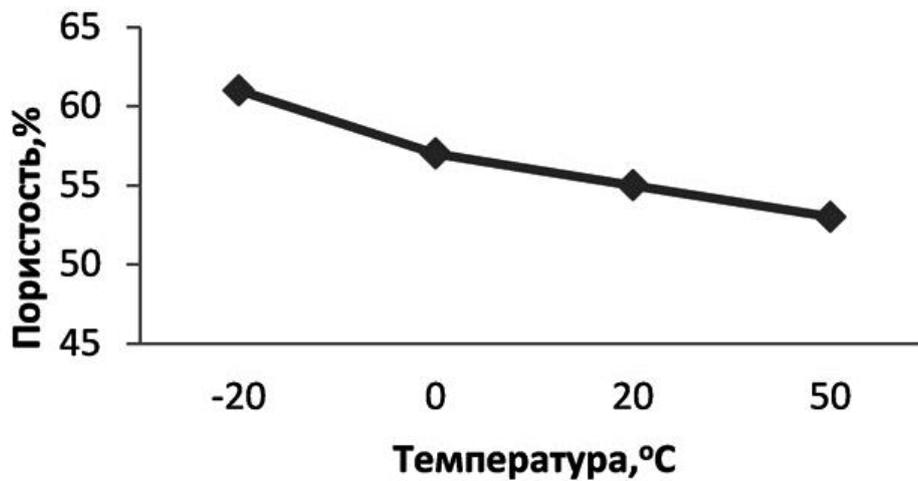


Рис. 6. График зависимости пористости алюминиевого сплава от температуры

ВЫВОД

На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы: увеличение температуры внедрения водорода привело к уменьшению микротвердости сплава в 1,7 раза, что свидетельствует о разрыхлении ее поверхностного слоя и снижении износостойкости.

Вычислив глубину вдавливания индентора при различных нагрузках, выяснили следующее: плотность сплава уменьшилась в 2,7 раза, пористость уменьшилась в 1,15 раза, что приводит к повышению физико-механических свойств, увеличению коррозионной стойкости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-33-90150.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев, Ю.П. Курило, Т.А. Пономаренко, Д.В. Виноградов // Вопросы атомной науки и техники Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2006. № 1. С. 145-152.
2. Проблемы применения водорода в энергетике / Ю.Н. Шалимов, В.И. Кудряш, А.Л. Гусев и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 3. С. 61-74.
3. Тарасов Б.П. Металлогидридные системы обратимого хранения водорода // Безопасность и экономика водородного транспорта (IFSSENT-2003): сб. тез. второго Международного симпозиума // Альтернативная энергетика и экология. 2003. Спецвып. С. 38-39.
4. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляции водорода // Российский химический журнал. 2006. Т. L. № 6. С. 34-48.
5. ГОСТ 6507-1. 2007 (Национальный стандарт Российской Федерации). Измерение твердости по Виккерсу. М.: Стандартинформ, 2008.
6. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
7. Петрий О.А., Левин Э.Е. Водородаккумулялирующие материалы в электрохимических системах // Российский химический журнал. 2006. Т. L. № 6. С. 115-119.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сефералиев Эмир Талибович –

студент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Emir T. Seferaliyev –

Undergraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Давыдова Анастасия Руслановна –

студент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anastasia R. Davydova –

Undergraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Барabanова Елена Витальевна –

студент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Barabanova –

Undergraduate, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Барabanов Сергей Николаевич –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey N. Barabanov –

PhD (Technical), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Гоц Ирина Юрьевна –

кандидат химических наук, доцент кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina Yu. Gots –

PhD (Chemistry), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Металлургия и материаловедение

Лукьянова Виктория Олеговна –
аспирант кафедры «Химия и химическая
технология материалов» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Victoria O. Lukyanova –
Postgraduate, Department of
Chemistry and Chemical Technology
of Materials, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.11.21, принята к опубликованию 06.12.21

Правила оформления и представления статей

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

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

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

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

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

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

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

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

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

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

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

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

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

8. К статье прилагается экспертное заключение.

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

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

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

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

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

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи по следующим научным направлениям и специальностям:

2.3 – Информационные технологии и телекоммуникации (05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление)

2.3.1 (05.13.01) – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки)

2.3.3 (05.13.06) – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки, технические науки) (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ) (технические науки, физико-математические науки)

2.5 – Машиностроение (05.02.00 – Машиностроение и машиноведение)

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

2.5.6 (05.02.08) – Технология машиностроения (технические науки)

2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)

2.6 – Химические технологии, науки о материалах, металлургия (05.16.00 – Металлургия и материаловедение)

2.6.6 – Нанотехнологии и наноматериалы (технические науки, физико-математические науки, химические науки)

2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии (технические науки, химические науки)

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки, химические науки)

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

– **Информатика, вычислительная техника и управление**

– **Машиностроение и машиноведение**

– **Металлургия и материаловедение**

Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!

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