

ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2022

№ 2 (93)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Июнь 2022 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 10.06.2022 Дата выхода в свет 20.06.2022

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 12,5 Уч.-изд. л. 4,5

Тираж 500 экз. Заказ 39

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, 2022

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2022

№ 2 (93)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

June 2022

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: .10.06.2022. Date of publication 20.06.2022

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 12,5

Publication base sheet 4,5

Circulation: 500 printed copies

Order 39

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

eLIBRARY.ru

© Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov, 2022

ISSN 1999-8341

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Володин И.О., Хворостухина Е.В.
РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧИСЛА АВТОМОРФИЗМОВ
ГИПЕРГРАФОВ ОСОБЫХ КЛАССОВ.....5

Филиппов В.И., Горопова О.А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВ С ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ СИГНАЛОВ
ОДНИМ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ И СКАЛЯРОМ15

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В.
ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610 ДЛЯ АНАЛИЗА
СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 1. ОБЗОР ПРОФИЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ22

Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА
СТАНКОВ ПО СТОХАСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.....38

**Финогеев Д.Ю., Макаров Д.А.,
Головченко И.В., Решетникова О.П.**
ВЛИЯНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ЭКСТРУЗИОННЫХ СОПЕЛ ПРИ ПЕЧАТИ КОМПОЗИТНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ.....53

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Бекренев Н.В., Злобина И.В.
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО
УГЛЕПЛАСТИКА В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР
ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ59

**Ганиев И.Н., Алиева Л.З., Бердиев А.Э.,
Алихонова С.Дж., Якубов У.Ш.**
ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЛИТИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ЦИНКОВОГО СПЛАВА ЦАМСв4-1-2,5.....70

Злобина И.В., Бекренев Н.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАГРЕВА УГЛЕ- И СТЕКЛОПЛАСТИКА
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ИХ КОМПОНЕНТОВ82

Ходжаев Ф.К.
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ ГИББСА
СПЛАВОВ СИСТЕМ СВИНЦА С НЕКОТОРЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ 93

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Volodin I.O., Khvorostukhina E.V.
DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR CALCULATION OF THE NUMBER
OF AUTOMORPHISMS OF HYPERGRAPHS OF SPECIAL CLASSES5

Filippov V.I., Toropova O.A.
MODELING SPACES WITH REPRESENTATION OF VARIOUS SIGNALS
BY ONE INTEGER DECOMPOSITION AND A SCALAR15

MECHANICAL ENGINEERING

Zakharov O.V., Yakovishin A.S., Zhukov A.V.
APPLICATION OF FILTERS OF THE ISO 16610 SERIES TO ANALYZE
THE SURFACE STRUCTURE. PART 1. OVERVIEW OF PROFILE FILTERS22

Ignatiev A.A., Dobryakov V.A., Ignatiev S.A.
EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL EVALUATION DYNAMIC QUALITY
OF MACHINE TOOLS BY STOCHASTIC CHARACTERISTICS
OF VIBRATION-ACOUSTIC OSCILLATIONS38

**Finogeev D.Yu., Makarov D.A.,
Golovchenko I.V., Reshetnikova O.P.**
EFFECT OF ABRASIVE WEAR ON THE GEOMETRIC PARAMETERS
OF EXTRUSION NOZZLES WITH COMPOSITE MATERIALS
BY LAYER-BY-LAYER METHOD53

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

Bekrenev N.V., Zlobina I.V.
ASSESSMENT OF CHANGES IN THE LIMITING STATE OF STRUCTURAL
CARBON FIBER IN CONDITIONS OF NEGATIVE TEMPERATURES AFTER
PROCESSING IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD59

**Ganiev I.N., Aliyeva L.Z., Berdyev A.E.,
Alikhanov S.J., Yakubov U.S.**
INFLUENCE OF LITHIUM ADDITIVES ON THERMAL PROPERTIES
AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS ZINC ALLOY TsAMSv4-1-2.570

Zlobina I.V., Bekrenev N.V.
INVESTIGATION OF THE KINETICS OF HEATING OF CARBON
AND FIBERGLASS, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE
OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD
ON THE TEMPERATURE OF THEIR COMPONENTS82

Khodzhaev F.K.
THERMODYNAMIC ACTIVITY AND GIBBS FREE ENERGY OF ALLOYS OF LEAD
SYSTEMS WITH SOME ELEMENTS OF THE PERIODIC TABLE93

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК: 519.179.1; 519.115.2; 004.421

И.О. Володин, Е.В. Хворостухина

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧИСЛА АВТОМОРФИЗМОВ ГИПЕРГРАФОВ ОСОБЫХ КЛАССОВ

Аннотация. Гиперграфы нашли широкое применение в управлении большими системами, в логистике, при моделировании электрических схем и компьютерных сетей. Особый научный интерес представляют задачи, связанные с изучением групп автоморфизмов гиперграфов, поскольку, исследуя свойства группы автоморфизмов гиперграфа, можно получить информацию о самом гиперграфе. В настоящей работе авторы решают задачу о числе автоморфизмов гиперграфов некоторых классов и используют полученные результаты для разработки учебного приложения, позволяющего студентам наглядно изучать такие важные понятия как гиперграф и его автоморфизмы.

Ключевые слова: гиперграф, автоморфизм, учебное приложение, группа автоморфизмов

I.O. Volodin, E.V. Khvorostukhina

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR CALCULATING THE NUMBER OF AUTOMORPHISMS FOR A SPECIAL CLASS OF HYPERGRAPHS

Abstract. Hypergraphs are widely used in the management of large systems, logistics, and modeling electrical circuits and computer networks. The main research ambition includes the problems related to the study of automorphism groups of hypergraphs, since by investigating the properties of the automorphism group of a hypergraph, we can obtain information about the hypergraph. In this paper, the authors solve the problem relating the

number of automorphisms of hypergraphs of some classes and use the results to develop a study guide that allows students to visually learn such important concepts as a hypergraph and its automorphisms.

Keywords: *hypergraph, automorphism, study guide, automorphism group*

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается возросший интерес к изучению задач и методов теории гиперграфов [1]. Это связано с тем, что гиперграфы, являясь естественным обобщением понятий графа, конечной плоскости, разбиения множества, нашли применение в задачах управления большими системами, при моделировании и проектировании электрических схем, компьютерных сетей, автоматизированных процессов, при обработке изображений и во многих других сферах [2].

Многие авторы значительное внимание уделяли исследованию полугрупп эндоморфизмов и полугрупп автоморфизмов гиперграфов [3, 4], так как, исследуя свойства таких полугрупп отображений, можно изучать свойства исходного объекта. В настоящей работе мы продолжаем исследования автоморфизмов гиперграфов, а именно находим комбинаторные формулы для расчета количества автоморфизмов гиперграфов некоторых классов и разрабатываем настольное учебное приложение, использующее эти формулы.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ГИПЕРГРАФОВ

Следуя [1], гиперграфом $H = (V, E)$ называется пара (V, E) , где V – это некоторое конечное множество, элементы которого называются вершинами гиперграфа, а E – набор произвольных подмножеств V , называемых ребрами (или гиперребрами) гиперграфа. Гиперграф $H = (V, E)$ называется конечным, если множество его вершин V является конечным множеством, то есть состоит из конечного числа элементов. Далее в работе будем рассматривать только конечные гиперграфы.

Вершины называются смежными, если они принадлежат одному ребру. Длиной или мощностью ребра e называется количество вершин, принадлежащих данному ребру e . Длина ребра e обозначается как $|e|$.

Автоморфизм гиперграфа $H = (V, E)$ – это взаимно однозначное отображение λ множества вершин V на себя, которое сохраняет смежность, т. е. удовлетворяет условию:

$$(\forall X \subset V)(X \in E \Leftrightarrow \lambda(X) \in E).$$

Множество всех автоморфизмов данного гиперграфа H образует группу относительно операции композиции автоморфизмов, которую принято обозначать $\text{Aut } H$.

Гиперграф $H = (V, E)$ называется k -однородным, если для всякого $e \in E$ имеет место $|e| = k$, или, другими словами, каждое ребро состоит ровно из k вершин. Заметим, что обыкновенный граф, не содержащий петель, является 2-однородным гиперграфом.

k -пересекающийся гиперграф – это гиперграф $H = (V, E)$, любые два ребра которого содержат k общих вершин, т. е. выполняется условие

$$(\forall e, r \in E)(\exists X \subset V \wedge |X| = k)(e \cap r = X).$$

Очевидно, что у k -пересекающегося гиперграфа каждое ребро содержит не менее k -вершин.

Пример 1. На рис. 1 представлен 1-пересекающийся гиперграф, который также является 4-однородным.

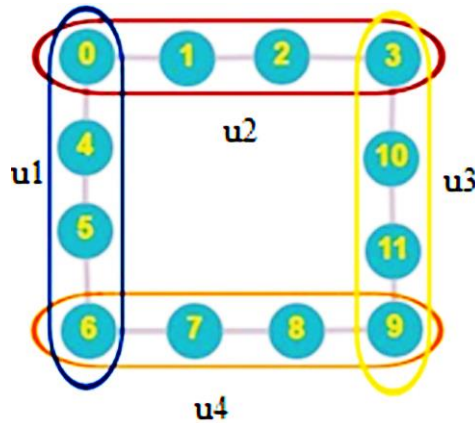


Рис. 1. 1-пересекающийся гиперграф

Строго k -пересекающийся гиперграф – это гиперграф $H = (V, E)$, все ребра которого содержат множество $X \subset V$, состоящее из k вершин, т. е. выполняется условие

$$(\exists X \subset V \wedge |X| = k)(\forall e, r \in E)(e \cap r = X).$$

Заметим, что строго k -пересекающийся гиперграф является также k -пересекающимся гиперграфом, обратное в общем случае неверно.

Пример 2. На рис. 2 представлен строго 1-пересекающийся гиперграф, «общей вершиной» для всех его ребер является вершина 0 : $X = \{0\}$.

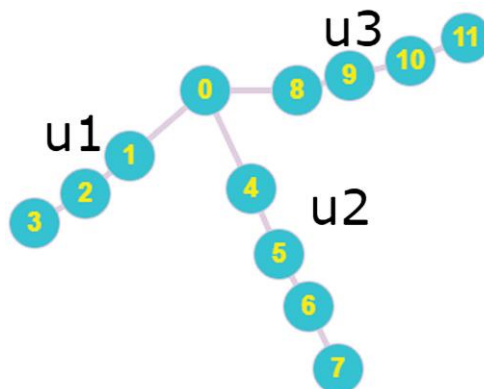


Рис. 2. Строго 1-пересекающийся гиперграф

Пусть $k, m \in \mathbb{N}, m > 3$. Гиперграф $H = (V, E)$ будет называться k -замкнутым, если мы можем так пронумеровать его рёбра, что $|e_1 \cap e_m| = k$ и для каждого ребра $e_i, i = 2, \dots, m-1$, из множества рёбер $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ выполняются условия

$$|e_i \cap e_{i-1}| = |e_i \cap e_{i+1}| = k,$$

$$|e_i \cap e_j| = \emptyset, j \in \{1, \dots, m\} \setminus \{i-1, i, i+1\}.$$

Не нарушая общности, будем считать, что если $H = (V, E)$ – k -замкнутый гиперграф, то множество E уже упорядочено в соответствии с определением.

Пример 3. На рис. 3 изображен 1-замкнутый гиперграф: $\{0\} \subset u_2, u_3, \{7\} \subset u_2, u_1, \{3\} \subset u_3, u_4, \{9\} \subset u_4, u_1$.

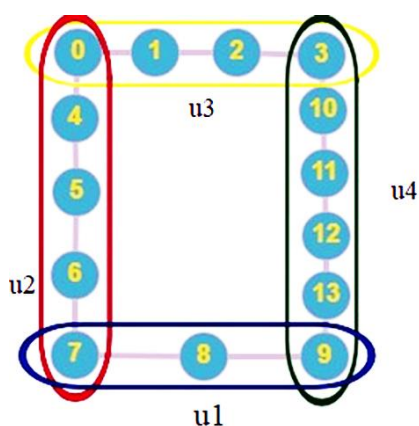


Рис. 3. 1-замкнутый гиперграф H

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧИСЛА АВТОМОРФИЗМОВ ГИПЕРГРАФОВ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ

В работах [5, 6] были найдены формулы для расчета числа автоморфизмов строго k -пересекающегося гиперграфа, в работе [7] была найдена формула для расчета числа автоморфизмов k -замкнутого гиперграфа с ребрами одинаковой длины. В настоящей работе в теореме 1 приводится формула для расчета числа автоморфизмов k -замкнутого гиперграфа с ребрами разной длины.

Теорема 1. Пусть дан k -замкнутый гиперграф $H = (V, E)$, множество ребер которого состоит из m элементов. Пусть n_i – количество вершин в ребре $e_i, i = 1, 2, \dots, m$, причем $n_i \geq 2 * k, n_i \neq n_j, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, m$. Тогда количество автоморфизмов гиперграфа H равно

$$(n_1 - 2 * k)! * (n_2 - 2 * k)! * \dots * (n_m - 2 * k)! * k!^m. \quad (1)$$

Доказательство. По условию теоремы ребра гиперграфа H содержат разные количества вершин. Следовательно, всякий автоморфизм данного гиперграфа может отображать вершины произвольного ребра e гиперграфа H только в вершины этого же ребра e .

Поскольку гиперграф $H = (V, E)$ – является k -замкнутым, в ребре e гиперграфа H имеется множество вершин $X = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ такое, что найдется единственное ребро $u \neq e: (X \subset u)$. Это означает, что вершины v_1, v_2, \dots, v_k можно отображать только в вершины множества X , так как в противном случае вершины из множества X не будут смежными с вершинами ребра u , что противоречит определению автоморфизма. Из этого следует, что всякий автоморфизм λ гиперграфа H удовлетворяет свойству: для любых ребер $e, u \in E$, удовлетворяющих условию $e \cap u = X$, множество X может быть отображено только на множество X , а множество вершин $e \setminus X$ – на множество $e \setminus X$. При этом число перестановок множества X равно $k!$.

Рассмотрим ребро e_1 гиперграфа H . Это ребро содержит n_1 вершин. Ребро e_1 гиперграфа H состоит из множества $e_1 \setminus \{x_1, x_2, \dots, x_k, y_1, y_2, \dots, y_k\}$ и $\{x_1, x_2, \dots, x_k, y_1, y_2, \dots, y_k\}$, где $\{x_1, x_2, \dots, x_k\} = \{e_1 \cap e_m\}$, $\{y_1, y_2, \dots, y_k\} = \{e_1 \cap e_2\}$. Таким образом, множество $e_1 \setminus \{x_1, x_2, \dots, x_k, y_1, y_2, \dots, y_k\}$ должно отображаться только на это же множество. Это множество состоит из $(n_1 - 2 * k)$ вершин. Ясно, что количество таких отображений совпадает с количеством перестановок данного множества. Действительно, переставляя первую вершину в этом ребре, у нас имеется $(n_1 - 2 * k)$ вариантов, переставляя вторую, имеем $(n_1 - 2 * k - 1)$ вариантов, и так далее, переставляя $(n_1 - 2 * k)$ -ю вершину, у нас останется только один вариант. Таким образом, получаем $(n_1 - 2 * k) * (n_1 - 2 * k - 1) * \dots * 1 = (n_1 - 2 * k)!$ вариантов. Число перестановок каждого из множеств $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, $\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ равно $k!$. Аналогичными рассуждениями находим число перестановок вершин для остальных ребер гиперграфа.

Ясно, что каждая перестановка множества вершин гиперграфа H , произведенная в соответствии с введенными правилами, определяет подстановку множества вершин V , сохраняющую смежность вершин, и, следовательно, является автоморфизмом гиперграфа H . А общее число автоморфизмов гиперграфа H определяется по формуле: $(n_1 - 2 * k)! * (n_2 - 2 * k)! * \dots * (n_m - 2 * k)! * k!^m$. Теорема доказана.

Пример 4. На рис. 3 представлен гиперграф H , количество автоморфизмов которого можно рассчитать по теореме 1. Множество ребер данного гиперграфа состоит из четырех ребер ($m = 4$): u_1, u_2, u_3, u_4 мощности 3, 5, 4, 6, соответственно. Гиперграф H является 1-замкнутым, поскольку каждая пара «соседних» ребер имеет одну общую вершину: $\{7\} \subset u_1, u_2, \{0\} \subset u_2, u_3, \{3\} \subset u_3, u_4, \{9\} \subset u_4, u_1$, то есть $k = 1$. Значит, выполняются условия теоремы 3, и мы можем рассчитать количество автоморфизмов гиперграфа H по формуле (1):

$$\begin{aligned} & (n_1 - 2 * k)! * (n_2 - 2 * k)! * (n_3 - 2 * k)! * (n_4 - 2 * k)! * k!^m = \\ & (3 - 2 * 1)! * (5 - 2 * 1)! * (4 - 2 * 1)! * (6 - 2 * 1)! * (1!)^4 = \\ & 1 * 6 * 2 * 24 * 1 = 288 \end{aligned}$$

Таким образом, число автоморфизмов гиперграфа H равно 288.

ОПИСАНИЕ УЧЕБНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧИСЛА АВТОМОРФИЗМОВ

В рамках составления учебно-методического комплекса по дисциплине «Теория графов» было разработано настольное учебное приложение [8], позволяющее рассчитывать количество автоморфизмов гиперграфов определенных классов и выводить все автоморфизмы в отдельный файл.

Схема, описывающая алгоритм работы этой программы, представлена на рис. 4. Формулы, используемые в расчетах, требуют вычисления факториалов и, следовательно, имеют факториальную сложность. Заметим, что в представленном алгоритме теоремы из работ [5, 6] соответствуют номерам 1, 2; теорема из работы [7] имеет номер 4, а доказанная в данной работе теорема 1 записана под номером 3.

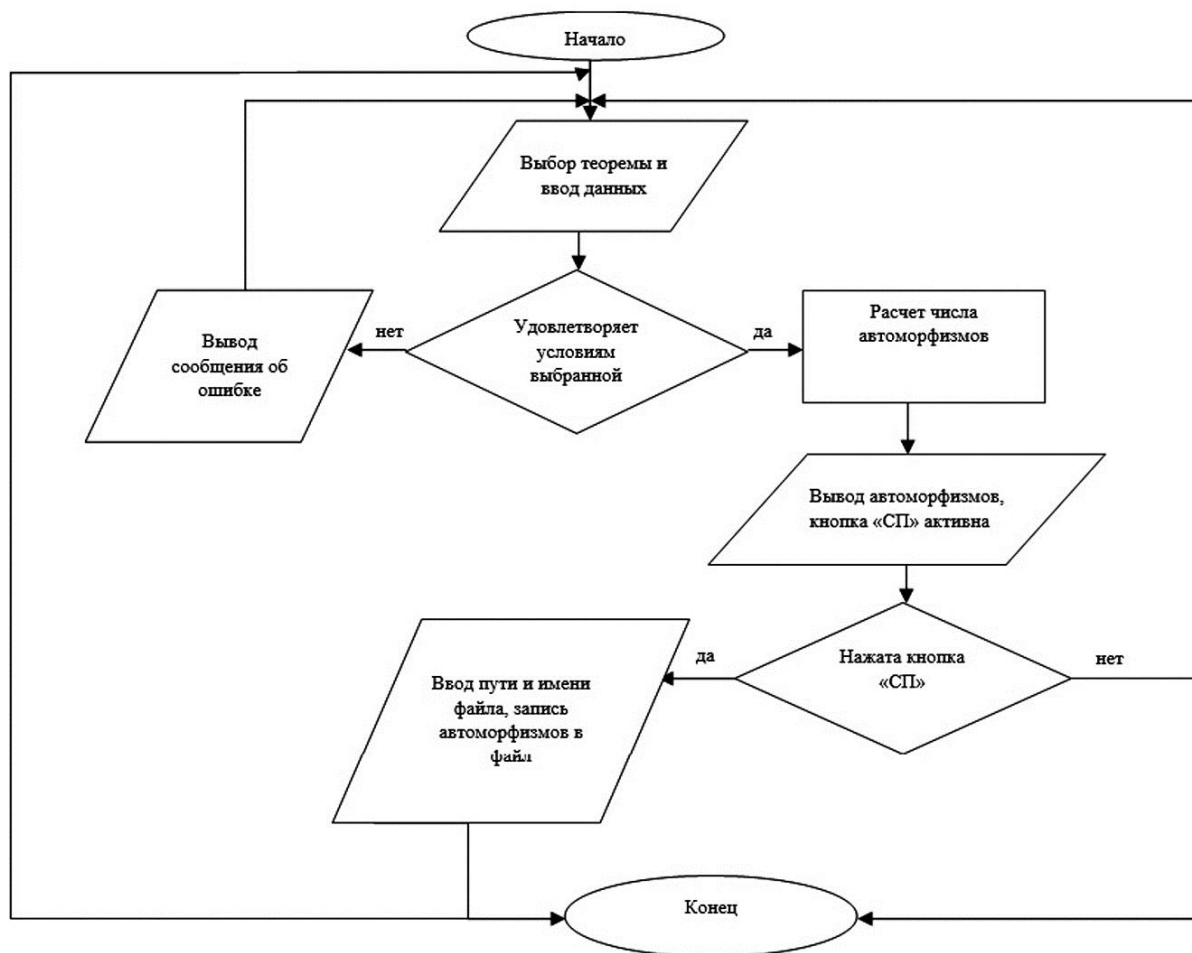


Рис. 4. Блок-схема работы программы

Кратко опишем работу программы. Вначале пользователь может выбрать, согласно какой теореме он хочет рассчитать количество автоморфизмов. Далее он вводит количество гиперребер, количество вершин в каждом гиперребре и количество общих вершин

(если была выбрана теорема 2 или 3) или параметр k для строго k -пересекающихся гиперграфов (если была выбрана теорема 3 или 4). После этого пользователь нажимает кнопку «Выполнить расчет». Далее производится проверка принадлежности гиперграфа соответствующим классам. Если ответ отрицательный, то параметр соответствия условиям теоремы имеет значение «false», и выводится сообщение о том, что нужно рассчитывать количество автоморфизмов, используя другую теорему. Если ответ положительный, то параметр соответствия теоремы изменяет значение на «true», рассчитанное количество автоморфизмов гиперграфа выводится на экран, кнопка «Сохранить перестановки» становится доступной. После нажатия на эту кнопку количество автоморфизмов и все автоморфизмы записываются в файл выходных данных, путь сохранения и название которого пользователь выбирает сам в диалоговом окне.

Данное приложение было реализовано на объектно-ориентированном языке программирования C# в среде разработки «Visual Studio 2017» и содержит библиотеку расчетов и проект визуального представления. Диаграмма классов библиотеки расчетов, состоящая из 4 файлов: Combinatorics.cs, HyperGraph.cs, Matrix.cs, Theorem.cs, представлена на рис. 5.

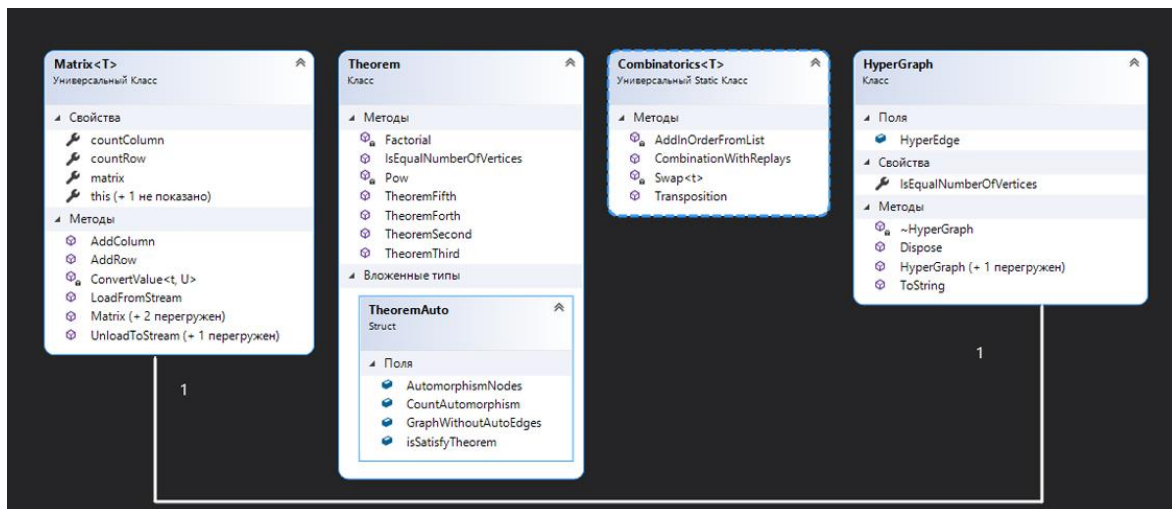


Рис. 5. Диаграмма классов библиотеки расчетов

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Данная программа обладает простым графическим интерфейсом, представленным на рис. 6. Пользователь имеет возможность выбрать теорему, по которой он хочет произвести расчет, ввести количество гиперребер, число общих вершин для теорем 1, 2 и параметр k для строго k -пересекающихся гиперграфов для теорем 3, 4. Также при увеличении количества гиперребер автоматически появляется поле для ввода вершин нового гиперребра, что представлено на рис. 6.

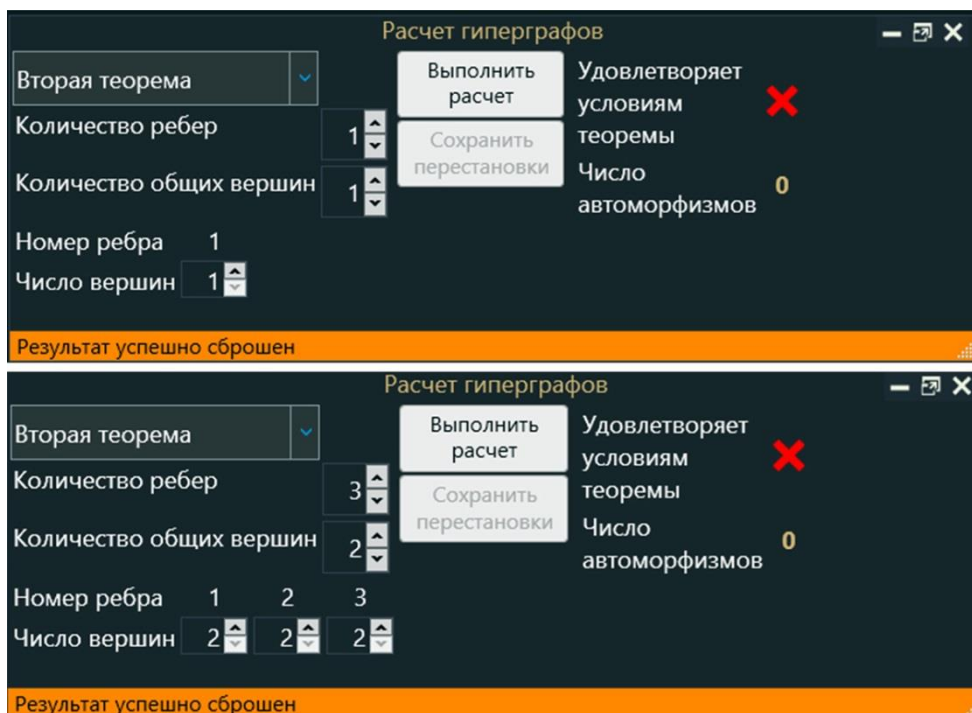


Рис. 6. Интерфейс программы при запуске и интерфейс программы при увеличении количества гиперрёбер

Рассмотрим гиперграф H из примера 4 (см. рис. 3), который является строго 1-пересекающимся (число ребер равно 4, количества вершин в ребрах, соответственно, равны 3, 5, 4, 6). После успешного ввода исходных данных и нажатия кнопки «Выполнить расчет» выводится сообщение об успешном результате расчета и число автоморфизмов, равное 288, и кнопка «Сохранить перестановки» становится доступной для нажатия. Результат работы программы представлен на рис. 7.

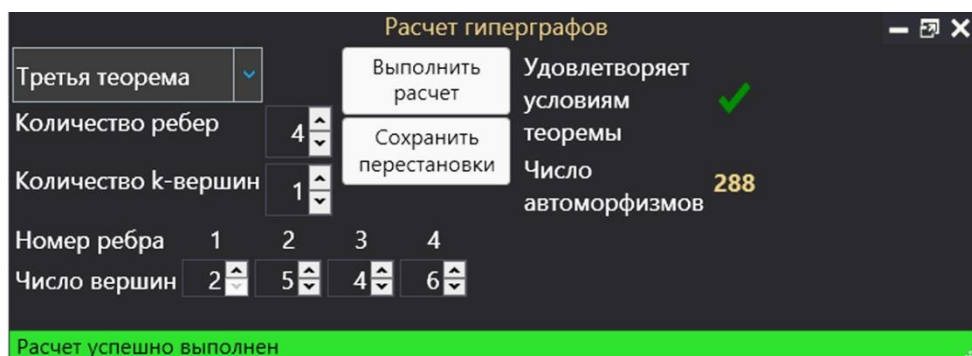


Рис. 7. Результат работы программы для гиперграфа H

При нажатии кнопки «Сохранить перестановки» пользователю предлагается ввести имя файла и выбрать путь сохранения, куда сохраняются все допустимые перестановки подмножеств ребер гиперграфа H , соответствующие автоморфизмам гиперграфа.

Если ввести некорректные данные для гиперграфа, то выведется сообщение с ошибкой. Результат работы программы представлен на рис. 8.

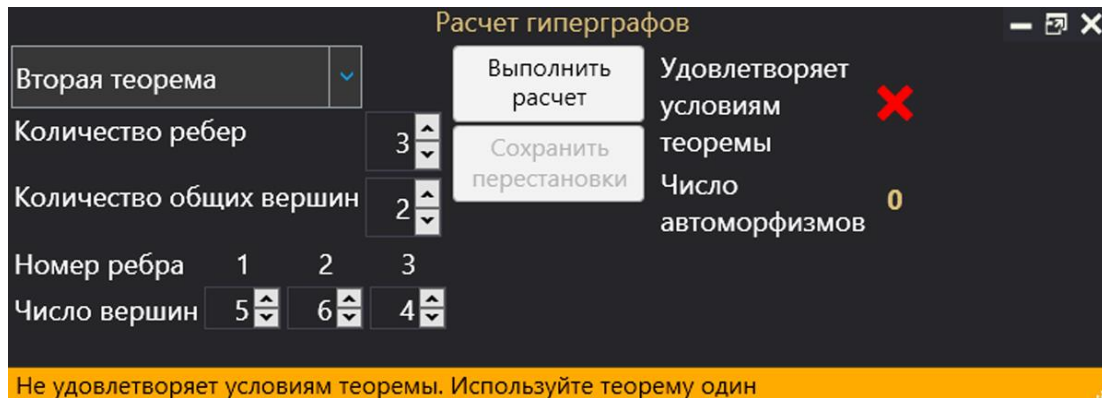


Рис. 8. Результат обработки ошибки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный продукт может быть использован в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся на математических и технических специальностях, осваивающих специальные курсы по дисциплине «Дискретная математика», «Теория графов», при изучении таких важных понятий как граф, гиперграф и их автоморфизмы.

Также данное приложение можно использовать в научных целях для удобного и быстрого подсчета количества автоморфизмов исследователям, изучающим группы автоморфизмов и полугруппы эндоморфизмов графов, гиперграфов и других комбинаторных объектов, поскольку, исследуя свойства таких алгебр отображений, можно получать информацию и о свойствах исходного объекта, а ручной подсчет числа автоморфизмов ввиду факториальной сложности этой задачи чреват ошибками и весьма трудоемок.

Функционал данного программного продукта может быть расширен путем вывода и добавления новых формул для расчета количества морфизмов гиперграфов других классов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bretto A. Hypergraph Theory: An Introduction. NY: Springer, 2013. 117 p.
2. Чуркин Г.М. Использование комбинаторно-логических методов структурного синтеза при выборе концепции технического обеспечения автоматизированных систем // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. Т. 3. № 1 (76). С. 97-104.

3. Хворостухина Е.В. О конкретной характеристике универсальных гиперграфических автоматов // Фундаментальная и прикладная математика. 2008. Т. 14. № 7. С. 223-231.

4. Bondar E.A., Zhuchok Y.V. Representations of the Strong Endomorphism Monoid of Finite n -Uniform Hypergraphs // Journal of Mathematical Sciences. 2014. Vol. 201. № 4. P. 421-430. DOI 10.1007/s10958-014-2001-1.

5. Володин И.О. Автоморфизмы k -пересекающегося гиперграфа // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): сб. тр. VI Междунар. науч. конф., посв. 85-летию Ю.А. Гагарина. Саратов, 2019. С. 693-695.

6. Володин И.О. Автоморфизмы k -пересекающихся гиперграфов с ребрами одинаковой длины // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: сб. тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: ООО Изд. дом «Наука», 2019. С. 7-9.

7. Володин И.О. Автоморфизмы k -замкнутых гиперграфов // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: материалы XVII Междунар. научр-практр. конф. Саратов: ИЦ «Наука», 2021. С. 229-233.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661978. Учебное приложение для вычисления количества автоморфизмов гиперграфов: / И.О. Володин, Е.В. Хворостухина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». Заявка № 2021661068: заявл. 12.07.2021, опубли. 20.07.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Володин Иван Олегович –
магистрант Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan O. Volodin –
Master student,
Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov

Хворостухина Екатерина Владимировна –
кандидат физико-математических наук,
доцент Кафедры «Информационно-
коммуникационные системы и программная
инженерия» Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina V. Khvorostukhina –
PhD, Associate Professor,
Department of Information and
Communication Systems and
Software Engineering,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 16.05.2022, принята к опубликованию 06.06.2022

В.И. Филиппов, О.А. Торопова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВ С ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ
РАЗЛИЧНЫХ СИГНАЛОВ ОДНИМ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫМ
РАЗЛОЖЕНИЕМ И СКАЛЯРОМ**

Аннотация. В работе приводятся результаты о целочисленном разложении элементов многомерных пространств $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, по системам функций, состоящих из сжатий и сдвигов одной функции с произвольным параметром уменьшения. Приводятся модели, когда разные целочисленные разложения сигналов представляются в виде одного целочисленного разложения. Эти исследования могут быть интересны, также для специалистов по передаче и обработке цифровой информации, так как дается простой алгоритм приближения функций из пространств $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, с указанными свойствами.

Ключевые слова: целочисленное разложение, ряды типа Фурье с целыми коэффициентами, системы функций из сжатий и сдвигов одной функции, пространства $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, цифровая обработка информации, цифровая передача информации

V.I. Filippov, O.A. Toropova

**MODELING OF SPACES WITH REPRESENTATION OF VARIOUS
SIGNALS BY A SINGLER INTEGER DECOMPOSITION AND SCALAR**

Abstract. The paper presents the results on the integer decomposition of elements of multidimensional spaces $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, by the systems of functions consisting of compressions and shifts of one function with an arbitrary reduction parameter. The models are given when different integer decomposition of signals are represented as a single integer decomposition. The given research may also be of interest to in digital information transmission and processing, since a simple algorithm is proposed for approximating functions from the spaces $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, characterized by the above mentioned properties.

Keywords: integer decomposition, Fourier type series with integer coefficients, systems of functions from compressions and shifts of one function, the $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$ spaces, digital information processing, digital information transfer

ВВЕДЕНИЕ

Данные результаты продолжают исследования, опубликованные в работах [9-14, 16]. В связи с исследованиями вейвлетов и фреймов возник интерес к исследованию систем функций состоящих из сжатий и сдвигов одной функции. Мы получаем разложение элементов пространств L_p непосредственно по данной системе, состоящей из сжатий и сдвигов одной функции. При данном разложении допускается значительная неточность в расчете первоначальных коэффициентов. При этом ошибки в вычислении коэффициентов в предложенном алгоритме корректируются.

При построении и моделировании разных сложных технических устройств, в том числе компонентов искусственного интеллекта, возникает необходимость обобщать данные от разных устройств в виде одного скаляра. В достижении этой цели может помочь использование многомодулярных пространств [14].

Возможность равномерного приближения непрерывных функций с любой точностью многочленами с целыми коэффициентами на сегменте вещественной оси изучалась, начиная с 1914 г., в работах I. Pal, Kakeya, M. Fekete, И.Н. Хлодовского, С.Н. Бернштейна, Л.В. Канторовича и других авторов. Автор статьи [1] продолжил эти исследования и сформулировал некоторые результаты, приведенных выше авторов и других исследователей, по этому вопросу. В [15] дается результат о существовании последовательности тригонометрических полиномов с целыми коэффициентами, сходящихся к нулю почти везде.

Результаты авторов [17] связаны с восстановлением сигналов и приложениями вейвлетов Хаара и, в частности, в пространствах $L_p(R^d)$, $0 < p < 1$. Для этих приложений важны разреженность и сжатие.

Рассмотренные нами системы функций, многомодулярные пространства, методы и модели могут быть использованы для получения примеров математических моделей в исследованиях, проведенных в работах [2-8].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим функцию

$$s(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in (0,1]; \\ 0, & \text{если } t \notin (0,1]. \end{cases} \quad (1)$$

Пусть

$$S(t) = S(t_1, t_2, \dots, t_m) = s(t_1) \cdot s(t_2) \cdots s(t_m), \quad t_i \in (0,1], \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Рассмотрим функциональные системы следующего вида

$$\{S_{n,j}\} = \{S_{n,j_1,j_2,\dots,j_m}\} = \left\{ \alpha_k s(2^{n-1}t_1 - j_1 - 1) \cdot s(2^{n-1}t_2 - j_2 - 1) \cdots s(2^{n-1}t_m - j_m - 1) \right\} = \{S_i\} \quad (2)$$

$$\alpha_k \downarrow 0, \quad \alpha_k > 0, \quad n = 1, 2, \dots, \quad j_i = 1, \dots, 2^{n-1}, \quad t_i \in (0,1],$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad l = 1, 2, \dots$$

Последовательность $\{\alpha_k\}$ назовем *параметром уменьшения*. Элементы системы нумеруем сплошной конкретной нумерацией. Можно занумеровать элементы системы внутри пачки и по-другому, от этого доказательство теоремы не измениться.

Пусть $f \in L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$. Рассмотрим ряд

$$\sum_{l=0}^{\infty} a_l^* S_l = \sum_{i=0}^{\infty} \left(\sum_{j_1=1}^{2^{i-1}} \sum_{j_2=1}^{2^{i-1}} \dots \sum_{j_m=1}^{2^{i-1}} a_{i,j_1,j_2,\dots,j_m}^* S_{i,j_1,j_2,\dots,j_m} \right), \quad (3)$$

где

$$f_{k+1} = f_k - \sum_{j_1=1}^{2^{k-1}} \sum_{j_2=1}^{2^{k-1}} \dots \sum_{j_m=1}^{2^{k-1}} a_{k,j_1,j_2,\dots,j_m}^* S_{k,j_1,j_2,\dots,j_m}, \quad f_1 = f, \quad k \geq 1,$$

коэффициенты $a_l^* = a_{k,j_1,j_2,\dots,j_m}^* = a_{k,j}^*$ целые и вычисляются специальным образом.

Теорема 1. Пусть $f \in C\{(0,1]^m\}$. Тогда ряд (3) по системе (1) с образующей функцией S как в (2) сходится по норме пространства $C\{(0,1]^m\}$ к f .

Рассмотрим теперь более общий случай для функции S , чем в теореме 1. Пусть

$$S \in L_p\{(0,1]^m\}, \quad 1 \leq p < \infty, \quad \int_T S(t) dt = \beta \neq 0, \quad t \in T, \quad T = \{(0,1]^m\}, \quad S(t) = 0, \quad t \notin T.$$

$$\{S_{n,j}\} = \alpha_k \lambda_0 \{S(2^n t_1 - j_1 + 1, 2^n t_2 - j_2 + 1, \dots, \quad (4)$$

$$2^n t_m - j_m + 1)\} = \{S\}, \quad \alpha_k \downarrow 0, \quad \alpha_k > 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad j_i = 1, \dots, 2^n,$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad l = 1, 2, \dots,$$

где λ_0 определяется функцией S . Соответствие нумерации n, j_1, j_2, \dots, j_m и l такое же, как в (2).

Теорема 2. Для произвольной функции $f \in L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, существует ряд $\sum_{l=0}^{\infty} a_l^* S_l$ по системе (4), где $a_l^* \in Z$, который сходится по норме пространства $L_p\{(0,1]^m\}$, $1 \leq p < \infty$, к f .

ПРИМЕРЫ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ

Пример 1. Рассмотрим пример сжатия выходного сигнала в виде поверхности эллиптического параболоида. Пусть функция $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$, $x_1 \in [0,1]$, $x_2 \in [0,1]$, а точность приближения $\delta = 0,11$ и

$$s(t) = \begin{cases} 1, & t \in (0,1], \\ 0, & t \notin (0,1]. \end{cases}$$

Пусть $\alpha_k = \frac{1}{2^k}$, $k = 1, 2, \dots$ и

$$\{S_{n,j_1,j_2}(x_1, x_2)\} = \frac{1}{2^{n-1}} s(2^{n-1} x_1 - j_1 - 1) \cdot s(2^{n-1} x_2 - j_2 - 1),$$

$$n \geq 1, \quad j_i = 1, 2^{n-1}, \quad i = 1, 2.$$

Найдем сумму $\sum_{l=1}^{84} a_l s_l(t) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j_1=1}^{2^{i-1}} \sum_{j_2=1}^{2^{i-1}} a_{i,j_1,j_2} S_{i,j_1,j_2}(x_1, x_2)$.

После вычислений коэффициентов получим функцию

$$\begin{aligned}
 P_5 = & x_1^2 + x_2^2 - 1 \cdot s_{2,2,1} - 1 \cdot s_{2,1,2} - 2 \cdot s_{2,2,2} - 1 \cdot s_{3,2,2} - 1 \cdot s_{3,4,1} - 1 \cdot s_{3,1,4} \\
 & - 1 \cdot s_{3,2,4} - 1 \cdot s_{3,4,2} - 2 \cdot s_{3,4,4} - 1 \cdot s_{4,4,1} - \\
 & - 1 \cdot s_{4,1,4} + 1 \cdot s_{4,5,1} + 1 \cdot s_{4,1,5} - 1 \cdot s_{4,7,1} - 1 \cdot s_{4,1,7} - 3 \cdot s_{4,8,1} - \\
 & - 3 \cdot s_{4,1,8} - 1 \cdot s_{4,3,2} - 1 \cdot s_{4,2,3} - 1 \cdot s_{4,4,2} - 1 \cdot s_{4,2,4} + 1 \cdot s_{4,5,2} - \\
 & + 1 \cdot s_{4,2,5} - 1 \cdot s_{4,8,2} - 1 \cdot s_{4,2,8} - 1 \cdot s_{4,8,3} - 1 \cdot s_{4,3,8} - 1 \cdot s_{4,4,4} - \\
 & - 1 \cdot s_{4,6,4} - 1 \cdot s_{4,4,6} - 2 \cdot s_{4,8,4} - 2 \cdot s_{4,4,8} + 2 \cdot s_{4,5,5} + 1 \cdot s_{4,6,5} + \\
 & + 1 \cdot s_{4,5,6} - 1 \cdot s_{4,8,5} - 1 \cdot s_{4,5,8} - 1 \cdot s_{4,7,6} - 1 \cdot s_{4,6,7} - 2 \cdot s_{4,8,6} - \\
 & - 2 \cdot s_{4,6,8} + 1 \cdot s_{4,7,7}
 \end{aligned}$$

Как видим, из 84 коэффициентов 42 коэффициента не равны 0, а остальные все равны 0. Погрешность приближения удовлетворяет заданной точности приближения в среднем и по норме пространства L_2 .

$$\begin{aligned}
 \|P_5\|_2^2 &= \int_0^1 dx_1 \int_0^1 |P_5(x_1, x_2)|^2 dx_2 < 0,01, \\
 \left(\int_0^1 dx_1 \int_0^1 |P_5(x_1, x_2)|^2 dx_2 \right)^{\frac{1}{2}} &< 0,101.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_5 = & 1 \cdot s_{2,2,1} + 1 \cdot s_{2,1,2} + 2 \cdot s_{2,2,2} + 1 \cdot s_{3,2,2} + 1 \cdot s_{3,4,1} + 1 \cdot s_{3,1,4} + 1 \cdot s_{3,2,4} + 1 \cdot s_{3,4,2} \\
 & + 2 \cdot s_{3,4,4} + 1 \cdot s_{4,4,1} + \\
 & + 1 \cdot s_{4,1,4} + 1 \cdot s_{4,5,1} + 1 \cdot s_{4,1,5} + 1 \cdot s_{4,7,1} + 1 \cdot s_{4,1,7} + 3 \cdot s_{4,8,1} + \\
 & + 3 \cdot s_{4,1,8} + 1 \cdot s_{4,3,2} + 1 \cdot s_{4,2,3} + 1 \cdot s_{4,4,2} + 1 \cdot s_{4,2,4} - 1 \cdot s_{4,5,2} + \\
 & + 1 \cdot s_{4,2,5} + 1 \cdot s_{4,8,2} + 1 \cdot s_{4,2,8} + 1 \cdot s_{4,8,3} + 1 \cdot s_{4,3,8} + 1 \cdot s_{4,4,4} + \\
 & + 1 \cdot s_{4,6,4} + 1 \cdot s_{4,4,6} + 2 \cdot s_{4,8,4} + 2 \cdot s_{4,4,8} - 2 \cdot s_{4,5,5} - 1 \cdot s_{4,6,5} - \\
 & - 1 \cdot s_{4,5,6} + 1 \cdot s_{4,8,5} + 1 \cdot s_{4,5,8} + 1 \cdot s_{4,7,6} + 1 \cdot s_{4,6,7} + 2 \cdot s_{4,8,6} + \\
 & + 2 \cdot s_{4,6,8} - 1 \cdot s_{4,7,7}, \\
 \|f - D_5\|_2 &< \delta.
 \end{aligned}$$

Пример модели 2. Рассмотрим задачу, например трансляция или сохранение телевизионного, аудио-, видеосигналов и температуры окружающей среды с помощью его разложения на целые числа. При этом получается и сжатие образов. Воспользуемся обозначениями работы [14], пусть $\psi(t) = |t|^2$, тогда получим $\psi_3(L) = \psi_3^*(L) = E_\psi^3$ (заметим, что индекс 3 вверху и внизу означает, что рассматривается тримодулярное пространство), где $E_{\rho_1} = E_\psi$ – это $L_2\{(0,1]^2\}$, $E_{\rho_2} = E_\psi$ – это $L_2(0,1]$, а $E_{\rho_3} = E_\psi$ – это $L_2(0,1]$. Пространство $L_2\{(0,1]^2\}$ нами используется для приближения в нем изображений по системе (3) в фиксированный момент времени t_l . Пространство $L_2(0,1]$ нами используется дважды для приближения в нем аудиосигнала и температуры окружающей среды по системе (3) в течение момента времени (t_l, t_{l+1}) . Таких моментов при обычной трансляции, например, может быть 24 в одну секунду. Если при этом в изображении много ста-

ционарных зон, то можно от момента к моменту передавать только информацию об измененных зонах. Рассмотрим систему функций $\{S_{n,j_1,j_2}^1; S_{n,l}^2; S_{n,l}^3\} = \{S_l\}$, где l нумерует сначала элементы в n -й пачке системы $\{S_{n,j_1,j_2}^1\} = \{S_l^1\}$, потом – в n -й пачке системы $\{S_{n,l}^2\} = \{S_l^2\}$, а затем – в n -й пачке системы $\{S_{n,l}^3\} = \{S_l^3\}$.

Назовем систему $\{S_l\}$ *системой разложения (системой целочисленного разложения)* в пространстве E_ψ^3 , если существует ряд $\sum_{l=1}^{\infty} c_l S_l$ ($\sum_{l=1}^{\infty} c_l^* S_l$, $c_l^* \in Z$) такой, что для любого элемента $f = (f_1(x_1, x_2), f_2(t), f_3(t)) \in E_\psi^3$, где $f_1(x_1, x_2)$ – это изображение в момент времени t_l , $f_2(t)$ – это аудиосигнал в период времени (t_l, t_{l+1}) , а $f_3(t)$ – это температура окружающей среды в период времени (t_l, t_{l+1}) , который сходится по ψ – норме пространства E_ψ^3 .

Заметим, что сходимость по норме эквивалентна в данном пространстве ψ -сходимости, то есть сходимости в среднем в каждом из пространств, а значит и со сходимостью по норме. Учтем также, что норма является модуляром [14]. Таким образом, при задании погрешности приближения $\delta > 0$, который назовем *результатирующим скалярным показателем*, мы можем построить сумму $\sum_{l=1}^{l_0} c_l^* S_l = \sum_{l=1}^{l_0^1} c_{1,l}^* S_l^1 + \sum_{l=1}^{l_0^2} c_{2,l}^* S_l^2 + \sum_{l=1}^{l_0^3} c_{3,l}^* S_l^3$, $c_l^* \in Z$ такую, что

$$\|f - \sum_{l=1}^{l_0} c_l^* S_l\|_\varphi^2 = \frac{1}{3} \|f_1 - \sum_{l=1}^{l_0^1} c_{1,l}^* S_l^1\|_2^2 + \frac{1}{3} \|f_2 - \sum_{l=1}^{l_0^2} c_{2,l}^* S_l^2\|_2^2 + \frac{1}{3} \|f_3 - \sum_{l=1}^{l_0^3} c_{3,l}^* S_l^3\|_2^2 < \delta,$$

при этом в этой сумме будет много нулевых коэффициентов c_l^* .

Уменьшая δ , получаем более четкое изображение и звук, а также более точное значение температуры. Затем транслируем или запоминаем номера коэффициентов и их значения (целочисленные).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заметим, что вместо тримодулярного пространства можно рассматривать модели с n -модулярными пространствами. Моделирование в многомодулярных пространствах эффективно, когда n большое, например более 100.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Альпер С.Я. О приближении функций многочленами с целыми коэффициентами на замкнутых множествах // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1964. 28:5. С. 1173-1186.
2. Волошин И.П. Управление доступом на основе блокчейн // Информационная безопасность регионов. 2017. № 3-4 (28-29). С. 5-8.

3. Гусятников В.Н., Безруков А.И., Каюкова И.В. Количественные методы оценки уровня компетенций для систем управления качеством образования // Современные технологии управления. 2015. № 3 (51). С. 30-35.

4. Кублин И.М., Верещагина Л.С. О методологии формирования производственной программы промышленного предприятия // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2010. № 5 (34).

5. Торопова О.А., Кумова С.В. Modern business internet technology: Trends, perspectives and risks // Advances in Intelligent Systems and Computing 2017. № 543. pp. 810-815.

6. Львов А.А., Торопова О.А., Литовка Ю.В. Brain tissues volume measurements from 2D MRI using parametric approach // Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV, 107171U (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2315104, Event: Saratov Fall Meeting 2017, 2017, Saratov, Russian Federation.

7. Львов А.А., Торопова О.А., Литовка Ю.В., Аскарлова А.Х. Метод оценки объема опухолевых объектов по МРТ изображениям мозга (статья на английском языке) // Proc. SPIE 11067, Saratov Fall Meeting 2018: Computations and Data Analysis: from Nanoscale Tools to Brain Functions, 110670C (3 June 2019).

8. Торопова О.А., Карпова Г.Г., Кумова С.В. Информационные технологии в медицине нового поколения: тенденции и направления развития (статья на английском языке) // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): сб. тр. VI Междунар. науч. конф. / под ред. А.А. Львова и М.С. Светлова. Саратов: ООО СОП «Лоди», 2019. 707 с.

9. Филиппов В.И. Системы сжатий и сдвигов одной функции в многомерных пространствах E_φ // Вестник СГСЭУ. 2011. № 1 (35). С. 120-122.

10. Филиппов В.И. О подсистемах системы Фабера-Шаудера в функциональных пространствах // Изв. вузов. Математика. 1991. № 2. С. 78-85.

11. Филиппов В.И. Системы представления, полученные из сжатий и сдвигов одной функции в многомерных пространствах E_φ // Изв. РАН. Сер. матем. 2012. Т. 76. № 6. С. 193-206.

12. Филиппов В.И. Об обобщениях системы Хаара и других систем функций в пространствах E_φ // Изв. вузов. Математика. 2018. 62:1. С. 87-92.

13. Филиппов В.И. Об усилении результатов А.Н. Колмогорова о рядах Фурье и сопряженных функциях // Изв. вузов. Математика. 2012. № 7. С. 21-34.

14. Филиппов В.И. Многомодулярные пространства и их свойства // Изв. вузов. Математика. 2017. 61:12. С. 57-65.

15. Fekete M. Uber die Verteilung der Wurzeln bei gewissen algebraischen Gleichungen.

16. Fillipov V.I., and Oswald P. Representation in L_p by series of translates and dilates of one function // Journal of Approximation Theory. 1995. V. 82. № 1. P. 15-29.

17. Benedetto J.J., Njeunje F.O.N. Haar approximation from within for $L_p(R^d)$, $0 < p < 1$ // Sampl. Theory Signal Process. Data Anal. 19, 2 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43670-020-00001-z>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Филиппов Вадим Иванович –

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Информационные
системы и моделирование» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Vadim I. Filippov –

Dr. Sci. (Physics and Mathematics),
Professor, Department
of Information Systems and Modeling,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Торопова Ольга Анатольевна –

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Прикладные
информационные технологии» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Olga A. Toropova –

PhD (Technical Sciences),
Associate Professor, Head:
Department of Applied Information
Technologies, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.04.2022, принята к опубликованию 06.06.2022

УДК 681.2

О.В. Захаров, А.С. Яковишин, А.В. Жуков

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610 ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 1. ОБЗОР ПРОФИЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ

Аннотация. Вашему вниманию предлагается цикл статей, посвященных применению серии стандартов ISO 16610 для фильтрации профиля и структуры поверхности. Необходимость данного обзора обусловлена двумя причинами. Во-первых, в настоящее время не все стандарты серии ISO 16610 утверждены и представляют собой предмет обсуждения. Во-вторых, только два стандарта серии переведены на русский язык и доступны метрологам. Поэтому нами планируется выполнить подробный анализ серии стандартов с позиции преимуществ и недостатков отдельных методов фильтрации. Это позволит исследователю в каждом конкретном случае выбрать наиболее подходящий метод или комбинацию методов фильтрации. В настоящей статье, которая открывает цикл, будет дан общий обзор профильных фильтров, включающий линейные, робастные и морфологические. Описание методов построено по следующей схеме: определения, принципы построения, математические модели, примеры использования для поверхностей после различных методов обработки. В последующих статьях данного цикла будут более детально рассмотрены отдельные группы и конкретные фильтры и определены условия их эффективного применения.

Ключевые слова: измерение, метрология поверхности, фильтрация, профильный фильтр

O.V. Zakharov, A.S. Yakovishin, A.V. Zhukov

APPLICATION OF FILTERS OF THE ISO 16610 SERIES TO ANALYZE THE SURFACE STRUCTURE. PART 1. OVERVIEW OF PROFILE FILTERS

Abstract. The authors present a series of articles devoted to application of the ISO 16610 standard series for filtering the profile and surface texture. This review is important for

two reasons. First, not all the standards in the ISO 16610 series have been approved and can be the subject for discussion. Secondly, only two standards of the series have been translated into Russian and are available to metrologists. Therefore, we plan to perform a detailed analysis of the standard series in terms of advantages and disadvantages of individual filtering methods. In each specific case, this will allow researchers to choose the most appropriate method or combination of filtration methods. This article, which opens the cycle, will give a general overview of profile filters, including linear, robust and morphological. The description of the methods is made in line with the following scheme: definitions, principles of construction, mathematical models, examples for the use of surfaces after various processing methods. In subsequent articles of this cycle, individual groups and specific filters will be considered in more detail and the conditions for their effective use will be determined.

Keywords: *measurement, surface metrology, filtration, profile filter*

СЕРИЯ СТАНДАРТОВ ISO 16610

Под фильтрацией понимают операцию, применяемую для создания неидеальной характеристики путем понижения информационного уровня неидеальной характеристики. Другими словами, фильтрация представляет собой способ разделения структуры на компоненты с различными длинами волн [1]. В современных приборах используют цифровые фильтры, построенные на числовой обработке данных. В метрологии поверхности применяют только пространственную фильтрацию.

Фильтрация в процессе анализа структуры поверхности преследует несколько целей. Основная цель – отделить длинномасштабные компоненты от мелкомасштабных, иными словами, отделить волнистость от шероховатости и рассчитать параметры в соответствии со спецификацией. Морфологический фильтр обычно используется для компенсации радиуса щупа прибора на необработанных данных [3, 4]. Фильтр удаления выбросов может потребоваться для очистки данных, измеренных оптическим датчиком. В некоторых случаях требуется сглаживающий фильтр λ_s или S-фильтр для сравнения данных, измеренных различными приборами.

Стандарт ISO 3274:1996 «Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Nominal characteristics of contact (stylus) instruments» определяет схему измерения (рис. 1). Профиль, измеренный профилометрами, называется извлеченным профилем. Он подвергается дискретизации, оцифровывается и представляет собой модель реальной поверхности. Реальная поверхность моделируется механической поверхностью (границей) при измерении щуповым прибором или электромагнитной поверхностью, воспринимаемой оптическим датчиком. Следующим этапом является удаление компоненты формы путем подбора номинальной формы компонента и применения метода наименьших квадратов. Затем следует этап фильтрации λ_s для удаления микрошероховатости, которая обычно возникает из-за шума прибора или окружающей среды. Иногда

этот этап пропускается. Полученный профиль называется первичным профилем. По этому профилю можно рассчитать некоторые Р-параметры. Затем применяется фильтр λ_c , отделяющий волнистость от шероховатости. После этого можно рассчитать параметры шероховатости или волнистости.

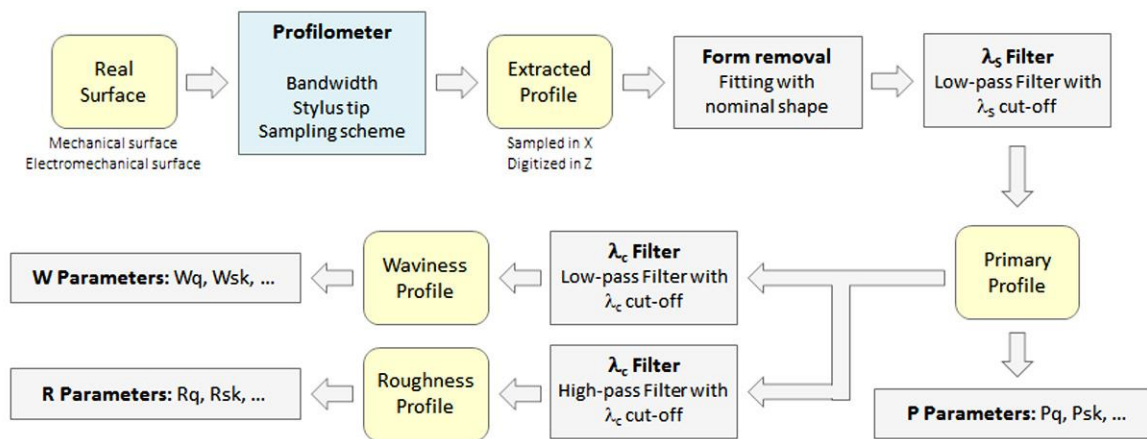


Рис. 1. Схема контактного измерения профиля поверхности [2]

Методы фильтрации регламентируют международные стандарты серии ISO 16610, объединенные общим названием «Геометрические характеристики изделий. Фильтрация». Эта фундаментальная серия стандартов позволяет выбрать наиболее подходящий фильтр под конкретные условия. Согласно матрице фильтров (рис. 2), все фильтры разделены на две большие группы: профильные и пространственные. В свою очередь, эти фильтры разделены на три группы: линейные, робастные, морфологические. Более мелкое разделение определяет: общие аспекты и концепцию (части 20, 30, 40, 60, 70, 80), конкретные фильтры (части 21-25, 31-35, 41-45, 61-65, 71-75, 81-85), как использовать фильтр (части 26-28, 36-38, 46-48, 66-68, 76-78, 86-88) и фильтры переменного разрешения (части 29, 39, 49, 69, 79, 89).

General	Filters: ISO 16610 series					
	Part 1					
Fundamental	Profile filters			Areal filters		
	Part 11 ^a			Part 12 ^a		
	Linear	Robust	Morphological	Linear	Robust	Morphological
Basic concepts	Part 20	Part 30	Part 40	Part 60	Part 70	Part 80
Particular filters	Parts 21–25	Parts 31–35	Parts 41–45	Parts 61–65	Parts 71–75	Parts 81–85
How to filter	Parts 26–28	Parts 36–38	Parts 46–48	Parts 66–68	Parts 76–78	Parts 86–88
Multiresolution	Part 29	Part 39	Part 49	Part 69	Part 79	Part 89

^a At present included in Part 1.

Рис. 2. Матрица стандартов серии ISO 16610

В настоящий момент серия стандартов ISO 16610 состоит из следующих частей:

- part 1: Overview and basic concepts;
- part 20: Linear profile filters: Basic concepts;
- part 21: Linear profile filters: Gaussian filters;
- part 22: Linear profile filters: Spline filters;
- part 28: Profile filters: End effects;
- part 29: Linear profile filters: Spline wavelets;
- part 30: Robust profile filters: Basic concepts;
- part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters;
- part 40: Morphological profile filters: Basic concepts;
- part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters;
- part 49: Morphological profile filters: Scale space techniques;
- part 60: Linear areal filters: Basic concepts;
- part 61: Linear areal filters: Gaussian filters;
- part 71: Robust areal filters: Gaussian regression filters;
- part 85: Morphological areal filters: Segmentation.

В стадии разработки находятся следующие части:

- part 26: Linear profile filters: Filtration on nominally orthogonal grid planar data sets;
- part 27: Linear profile filters: Filtration on nominally orthogonal grid cylindrical data sets;
- part 32: Robust profile filters: Spline filters;
- part 45: Morphological profile filters: Segmentation;
- part 62: Linear areal filters: Spline filters;
- part 69: Linear areal filters: Spline wavelets;
- part 70: Robust areal filters: Basic concepts;
- part 72: Robust areal filters: Spline filters;
- part 80: Morphological areal filters: Basic concepts;
- part 81: Morphological areal filters: Sphere and horizontal planar segment filters;
- part 89: Morphological areal filters: Scale space techniques.

Отечественные стандарты направлены на прямое применение международного стандарта, и на момент написания статьи из серии ISO 16610-1:2015 используются только два стандарта:

- ГОСТ Р 8.895-2015 «ГХИ. Фильтрация. Часть 1. Обзор и основные понятия» (соответствует ISO 16610-1:2015);
- ГОСТ Р ИСО 16610-21-2015 «ГХИ. Фильтрация. Часть 21. Линейные профильные фильтры. Фильтры Гаусса» (соответствует ISO 16610-21:2011).

• ГОСТ Р 8.895-2015 дает следующие основные определения для понимания процесса фильтрации. Индекс вложения – число или набор чисел, показывающие относительный уровень вложения базовой математической модели. Модели с меньшим индексом содержат больше информации о поверхности. Индекс вложения указывает на размер, при котором происходит разделение характеристик. Основные математические модели были разработаны для обобщения понятия полосы пропускания длин волн. Устойчивость (робастность) – инвариантность выходных данных относительно воздействия на входные данные. Обычно под робастностью понимается способность фильтра учитывать выбросы и дефекты поверхности.

ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Профильный фильтр есть оператор, состоящий из операции фильтрации для применения на поверхностном профиле. К профильным фильтрам относят: линейный фильтр Гаусса (ГОСТ Р ИСО 16610-21-2015), линейный сплайн фильтр (ISO 16610-22:2006), сплайн вейвлет фильтр (ISO 16610-29:2020), регрессионный фильтр Гаусса (ISO 16610-31:2016) и морфологический фильтр (ISO 16610-41:2015 и ISO 16610-49:2015). Из перечисленных фильтров к робастным относятся только регрессионный фильтр Гаусса. Известные преимущества и недостатки различных фильтров можно свести в таблицу (на основе ГОСТ Р 8.895-2015).

Преимущества и недостатки фильтров

Тип фильтра	Преимущества	Недостатки	Особенности
Гаусса	Хорошо известен Легко вычислить Определяется длиной волны Легко интерпретировать	Ненадежный Чувствительный к выбросам Требуется вычитание низкочастотной составляющей Краевые эффекты	Линейная система, основанная на Фурье-преобразовании
Сплайн	Легко вычислить Определяется длиной волны Не требуется вычитание низкочастотной составляющей Краевые эффекты устранимы Возможен анализ данных со случайным шагом	Диапазон применения не полностью установлен	Возможна линейная/нелинейная Фурье-интерпретация

Окончание таблицы

Тип фильтра	Преимущества	Недостатки	Особенности
Сплайн вейвлет	<ul style="list-style-type: none"> Определяет выбросы Легко вычислить Не требуется вычитание низкочастотной составляющей Нет краевых эффектов 	<ul style="list-style-type: none"> Много различных типов материнских вейвлетов Трудно интерпретировать Диапазон применения не полностью установлен 	<ul style="list-style-type: none"> Включает В-сплайны Отличается от Фурье длин волн
Морфологический	<ul style="list-style-type: none"> Естественно надежный Имитирует контактные явления Краевые эффекты устранимы Не требуется вычитание низкочастотной составляющей Возможен анализ данных со случайным шагом 	<ul style="list-style-type: none"> Диапазон применения не полностью установлен 	<ul style="list-style-type: none"> Нелинейный фильтр Отличается от Фурье длин волн Определяется кривизной, а не длиной волны

ЛИНЕЙНЫЕ ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Первичный профиль разделяется на компоненты шума, шероховатости, волнистости и формы (рис. 3). Разложение основано на гауссовой фильтрации. Эта фильтрация использует три длины волны отсечки: λ_s , λ_c и λ_f .

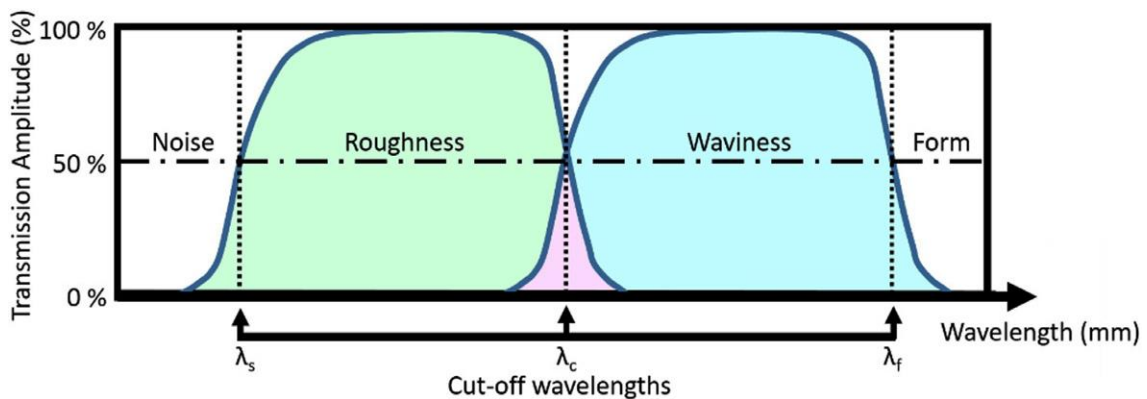


Рис. 3. Разделение амплитуд длин волн профиля [5]

Профильные фильтры Гаусса – наиболее используемые профильные фильтры. Функция Гаусса является идеальным фильтром, который может удовлетворять минимальному произведению ширины времени и ширины частоты, определяемому плотностью момента энергии. Математическая основа профильного фильтра Гаусса изложена в [6]. Отечественные исследования по этому направлению отражены в [7].

Теоретическая весовая функция для открытого фильтра Гаусса определяется по формуле

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_C} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_C} \right)^2 \right], \quad -L_C \lambda_C \leq x \leq L_C \lambda_C,$$

где x – расстояние от центра весовой функции, λ_C – длина волны среза, L_C – константа среза весовой функции, $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi} \approx 0,4697$ – константа для обеспечения 50 % пропускания амплитуды на длине волны среза.

Передаточная характеристика длинноволновой (низкочастотной) компоненты открытого профиля определяют при помощи преобразования Фурье весовой функции:

$$\frac{a_1}{a_0} = \exp \left[-\pi \left(\frac{\alpha \lambda_C}{\lambda} \right)^2 \right],$$

где a_0, a_1 – амплитуда синусоидального профиля до фильтрации и по средней линии соответственно, λ – период синусоидального профиля.

Ограниченная весовая функция является аппроксимацией неограниченной весовой функции Гаусса (рис. 4). Поэтому при свертке ограниченной функции будет присутствовать ошибка по сравнению с неограниченной функцией. Ошибка не должна превышать приемлемого уровня для константы среза L_C . Для $L_C = 0,5$ ошибка составляет 0,76 %.

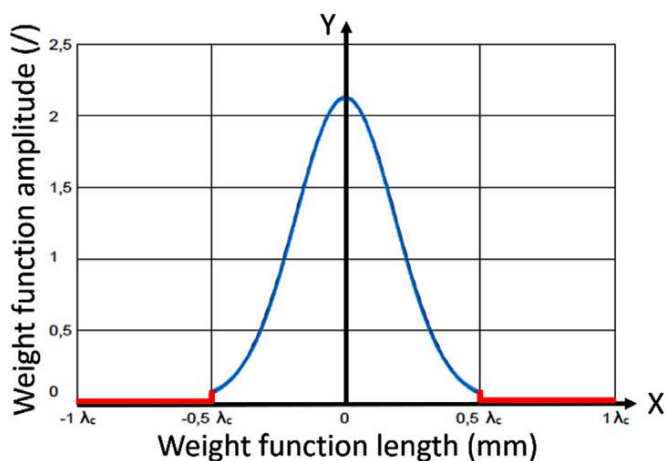


Рис. 4. Ограниченная весовая функция Гаусса [5]

Когда фильтры Гаусса используются для фильтрации открытых профилей, возникает так называемый краевой эффект [8, 9]. Эффективная часть весовой функции на обоих концах будет превышать край профиля. Поэтому свертка весовой функции и данные конца профиля будут неожиданно изменяться, то есть данные на обоих концах профиля после фильтрации искажаются. В ISO 16610-28:2016 предложены три общих метода расширения профиля: заполнения нулями, линейной экстраполяции и симметричного расширения.

Терминология и концепция сплайн-фильтров дана в ISO 16610-22:2015. В первую очередь они были предложены для решения проблемы краевых эффектов. Реализация сплайн-фильтров основана на использовании вариационных подходов и метода регуляризации Тихонова [10]. Функционал сплайнового фильтра представляет собой компромисс между минимизацией погрешности аппроксимации (энергетического функционала) и сохранением гладкости полученного решения. Баланс между этими требованиями осуществляется с помощью весового коэффициента Лагранжа.

С практической точки зрения Фильтр сплайн-профиля определяется с помощью алгоритма матричной декомпозиции [8]. Стандарт определяет два условия: аperiodическое и периодическое для фильтрации с открытым и закрытым профилями соответственно. Сплайновый фильтр устраняет краевые эффекты путем настройки граничных условий P и Q , где P – член линейного сплайна, а Q – член кубического сплайна. Уравнение фильтра для аperiodического фильтра профиля сплайна:

$$[1 + \beta\alpha^2 P + (1 - \beta)\alpha^4 Q] \cdot W = Z, \quad \alpha = \frac{1}{2 \sin(\pi \Delta x / \lambda_c)},$$

где Z , W – вектор входных и выходных (фильтрованных) данных соответственно, Δx – интервал дискретизации, β – параметр натяжения (подобие характеристики передачи фильтра Гаусса), $0 \leq \beta \leq 1$.

Передаточная характеристика длинноволновой компоненты аппроксимируется следующим выражением:

$$\frac{a_1}{a_0} = \left[1 + \beta\alpha^2 \sin^2 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} + 16(1 - \beta)\alpha^4 \sin^4 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} \right]^{-1}.$$

В [12] было выполнено сравнение вычислительной эффективности сплайнового гауссова фильтров и выявлено, что сплайновый фильтр быстрее. Профильный фильтр сплайна может устранить влияние краевых эффектов (рис. 5). В [12] был не только построен кубический сплайн-фильтр, но и введено численное решение матриц P и Q . В дальнейшем были предложены нелинейные и робастные сплайновые фильтры высокого порядка [13]. С увеличением порядка сплайна характеристики передачи становятся более плавными. Однако к настоящему времени эти типы фильтров не прошли утверждение из-за сложности с соответствием характеристик линейному фильтру Гаусса.

Вейвлеты – небольшие волны, которые носят колебательный характер и имеют ограниченный диапазон. Вейвлеты представляют собой наборы базисных функций особого типа, которые полезны при описании функциональных пространств [8]. Вейвлет-преобразование разработано на основе быстрого преобразования Фурье. Вейвлет-технология может разлагать сигнал профиля на различные частотные компоненты, после чего соответствующие частотные компоненты могут быть исследованы с использованием различных масштабных разрешений. Основной процесс вейвлет-анализа состоит из

Машиностроение

разложения исходного сигнала на масштабное пространство, преобразования сигнала во временной области в масштабный сигнал и использования узкого и широкого временных окон для выполнения частотно-временного анализа на высоких и низких частотах соответственно. Как показано на рис. 6, структура с несколькими разрешениями делит сигнал на низкочастотную (a1) и высокочастотную составляющие (b1). Затем низкочастотные составляющие дополнительно разлагаются, и так до нужного номера слоя. Конечной целью декомпозиции является построение базиса ортогональных вейвлетов, аппроксимирующего пространство по частоте. Эти ортогональные вейвлеты с разным разрешением по частоте соответствуют полосовым фильтрам с разной шириной полосы.

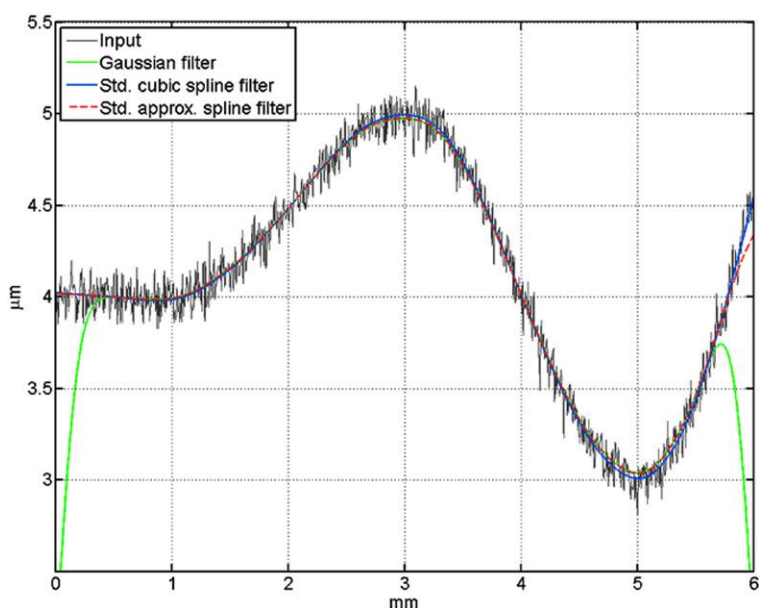


Рис. 5. Результат фильтрации сплайновым и Гаусса фильтрами [11]

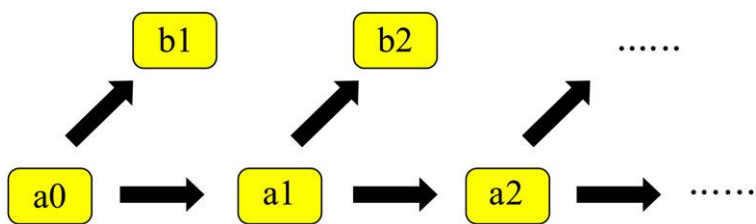


Рис. 6. Принцип многомасштабного анализа [8]

В настоящее время вейвлеты имеют модели первого, второго и третьего поколений. Базовый биортогональный вейвлет первого поколения удовлетворяет трем требованиям к фильтрации сигнала: линейная фаза, конечная импульсная характеристика и полная реконструкция. Поэтому исследователи часто используют базовые биортогональные

вейвлеты для вейвлет-анализа. Биортогональные вейвлеты, построенные по схеме подъема (второго поколения) преодолели недостатки вычисления вейвлетов первого поколения, сохранив при этом характеристики базового биортогонального вейвлета. Сплайновый вейвлет с кубической интерполяцией в ISO 16610-29:2020 использует схему подъема. Однако кубический интерполяционный сплайновый вейвлет имеет проблему искажения амплитудно-частотной характеристики. Таким образом, вейвлет кубического интерполяционного сплайна подходит для анализа топографии поверхности, но не рекомендуется для извлечения средней линии профиля поверхности. Вейвлет третьего поколения использует теорию сложного вейвлет-преобразования, которая обладает трансляционной инвариантностью и селективностью по направлению, а также может извлекать такие характеристики, как линейность поверхности и царапины на кривой.

РОБАСТНЫЕ ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Робастность обычно трактуется как нечувствительность фильтра к особенностям текстуры поверхности в виде наклона, ступенек, выступов (шипов), впадин (царапин). Классическим примером является профиль внутренней поверхности гильзы цилиндра двигателя. Структура поверхности имеет глубокие впадины, сочетающиеся с большими плато. Впадины служат в качестве карманов для смазки, а плато воспринимают основную нагрузку. Такая поверхность ранее носила название стратифицированной, а в последнее время называется мультифункциональной. Пример приведен на рис. 7.

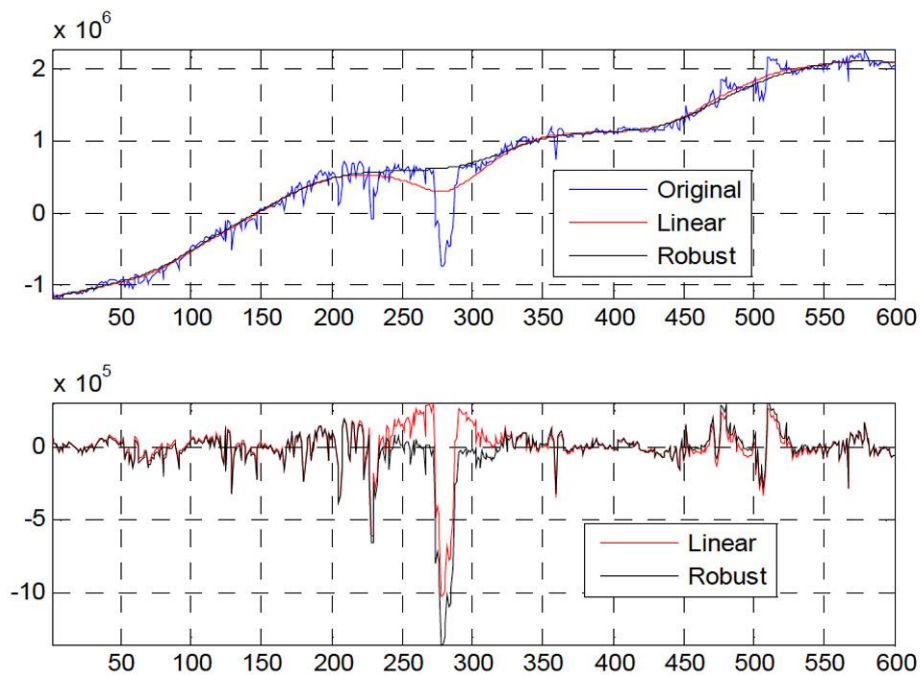


Рис. 7. Результат фильтрации хонингованной поверхности [14]

На текущий момент в качестве робастного утвержден только регрессионный фильтр Гаусса (ISO 16610-31:2016). Робастный сплайн фильтр не получил необходимого подтверждения спецификаций и вновь находится в стадии разработки. Морфологический фильтр может считаться естественно надежным, но вынесен в отдельную группу. Регрессионный фильтр Гаусса рекомендуется использоваться для стратифицированных поверхностей вместо двухступенчатого фильтра Гаусса по ISO 13565-1:1996.

Робастный регрессионный фильтр Гаусса рассчитывается рекурсивно за несколько итераций [15]. Вначале проводится фильтрация линейным фильтром Гаусса и определяется расхождение x_n между первичным профилем и результатом фильтрации. Рассчитываются модули расхождения $r_n = |x_n|$, медиана $\text{median}(x)$, пороговая константа $C = 4,4478\text{median}(|x_n|)$ и поправочные коэффициенты:

$$\delta_n = \begin{cases} (1 - (r_n / C)^2)^2 & \text{при } r_n \leq C, \\ 0 & \text{при } r_n > C. \end{cases}$$

В большинстве случаев поправочные коэффициенты близки к единице. При выбросах, где отклонение профиля превышает 3σ , они обращаются в ноль. Затем профиль корректируется умножением на поправочные коэффициенты. Далее скорректированный профиль повторно обрабатывается линейным фильтром Гаусса. Уже после второй итерации результаты бывают приемлемыми.

Регрессионный фильтр Гаусса нулевого порядка может лучше охватывать профиль и практически лишен краевого эффекта (рис. 8). Преимущества робастного регрессионного фильтра Гаусса перед другими, в том числе историческими предшественниками – простым регрессионным и двухступенчатым, показаны в [16, 17]. При этом отмечена сравнительно низкая производительность фильтра.

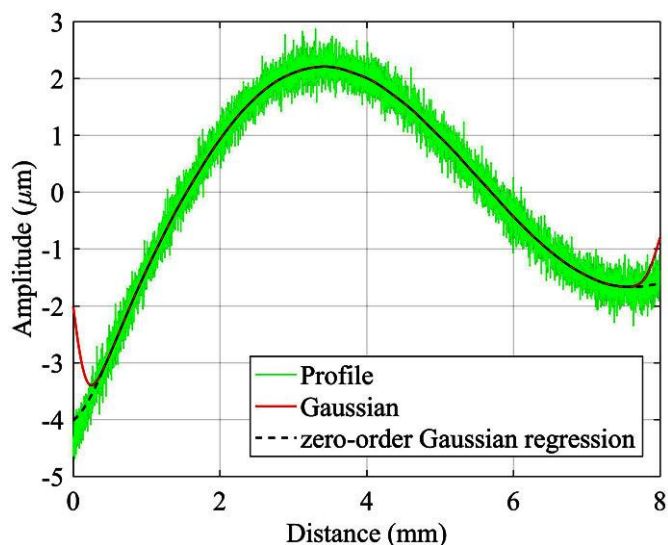


Рис. 8. Результаты фильтрации линейным и регрессионным фильтрами Гаусса [8]

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОФИЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

В основе морфологических фильтров лежит математическая морфология. Существуют две основные морфологические операции – наращивание и эрозия и две вторичные операции – замыкание и размыкание (рис. 9). Операторы замыкания и размыкания представляют собой простые морфологические фильтры. Для проведения операций морфологической фильтрации необходимо выбрать структурный элемент в виде диска или горизонтального сегмента прямой. Индекс вложения есть размер структурного элемента, т. е. радиус диска.

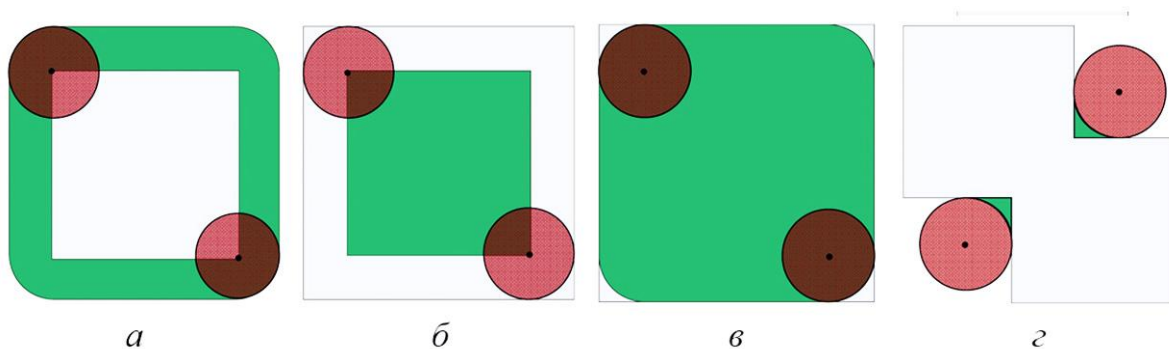


Рис. 9. Морфологические операции: а – наращивание,
б – эрозия, в – размыкание, г – замыкание

Основополагающей работой по морфологическим фильтрам стала [18]. В ней было показано, что разделение шероховатости, волнистости и погрешности формы контролируется радиусом окружности качения. Дискретный алгоритм, представленный в [19], заложил основу стандарта ISO 16610-41:2015. Основная идея алгоритмов наращивания и эрозии заключалась в размещении начала структурного элемента в каждой точке исходных данных и их суммировании. Экстремальные значения в каждой точке выборки собирались и представлялись в качестве выходных данных (рис. 10). Особенности алгоритма стало то, что структурный элемент благодаря симметрии описывался только в первом квадранте, а операции наращивания и эрозии выполнялись с учетом конечных эффектов. После принятия стандарта ISO 16610-41:2015 дискретный алгоритм был реализован в отечественном программном обеспечении [20].

В [21] показано, что замыкающий фильтр подавляет впадины на профиле размером меньше радиуса диска, в то время как пики остаются неизменными. Размыкающий фильтр подавляет пики на профиле, размер которых меньше радиуса диска, но сохраняет впадины. Дальнейшим развитием стало создание переменных симметричных морфологических фильтров ISO 16610-49:2015. Они представляют собой комбинацию замыкающих и размыкающих фильтров.

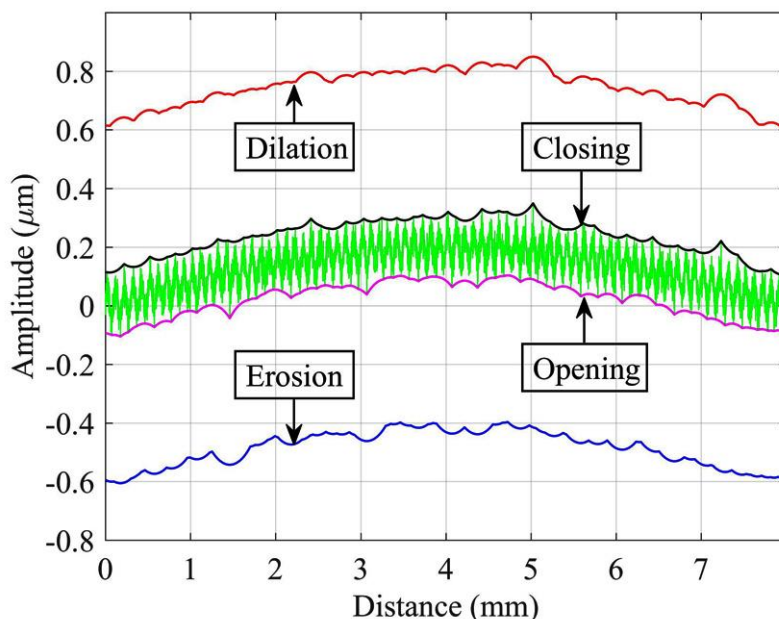


Рис. 10. Результаты морфологических операций [21]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Серия международных стандартов ISO 16610 представляет достаточно полную систему фильтрации, но все еще много трудностей остается при применении технологии фильтрации на практике. Пакет прикладного программного обеспечения для анализа структуры и шероховатости поверхности включает множество технологий фильтрации и оставляет выбор за пользователем. Применимость выбранного фильтра должна быть тщательно проверена для ожидаемой стратегии оценки. Для исследователей важно установить связь между процессом анализа и функциями, которые они отслеживают.

Наибольшее применение для анализа шероховатости поверхности в настоящее время получил линейный фильтр Гаусса (ISO 16610-21:2015). Он включен во все прикладные программы мировых производителей измерительной техники. Вместе с тем ему присущи определенные ограничения. Первое ограничение связано с необходимостью предварительного исключения компоненты формы из первичного профиля. Второе ограничение обусловлено краевыми эффектами, для минимизации которых предложены три стратегии в ISO 16610-28:2016.

Преодолеть указанные сложности, в первую очередь, краевые эффекты, призваны сплайн фильтры ISO 16610-29:2020. Линейные сплайновый и вейвлет фильтры в значительной мере подавляют краевые эффекты. К тому же они более производительны. Однако диапазон их применения не до конца установлен. При фильтрации одного и того же профиля возникают значительные различия в извлеченных значениях параметра шерохо-

ватости. Дополнительно для вейвлет сплайнового фильтра имеется большое количество материнских вейвлетов, что затрудняет их выбор.

Робастный регрессионный фильтр Гаусса (ISO 16610-31:2016) предназначен в первую очередь для анализа мультифункциональных поверхностей. Он лишен основного недостатка линейных фильтров – краевых эффектов. В то же время он крайне чувствителен к выбросам и требует предварительного исключения компоненты формы из первичного профиля. Как альтернативу можно рассматривать морфологический фильтр ISO 16610-41:2015 и его разновидность – симметричный переменный фильтр ISO 16610-49:2015. Морфологические фильтры считаются естественно робастными. Они не требуют исключения компоненты формы. Фильтр является нелинейным и вместо передаточной характеристики использует индекс вложения в виде размера структурного элемента. Морфологические фильтры перспективны, но для соответствия результатов фильтру Гаусса требуют подбора значений индекса вложения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01269).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Whitehouse D.J. Handbook of Surface and Nanometrology, Second Edition, CRC Press – Taylor & Francis Group, Boca Raton FL, London, 2011.
2. Filtration Techniques for Surface Texture. URL: <https://guide.digitalsurf.com>.
3. Трошин А.А., Захаров О.В. Методы фильтрации при измерении на координатно-измерительных машинах // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 59-67.
4. Лукьянов В.С., Лысенко В.Г. Исследование влияния аппроксимации на погрешность измерения параметров шероховатости дискретным методом // Измерительная техника. 1982. № 2. С. 16-19.
5. Schoeters S., Dewulf W., Kruth J.-P., Haitjema H., Voeckmans B. Description and validation of a circular padding method for linear roughness measurements of short data lengths // MethodsX. 2020. Vol. 7. pp. 101122.
6. Krystek M. The digital implementation of the Gaussian profile filter according to ISO 11562. Beuth-Verlag, Berlin, 2005.
7. Порошин В.В., Богомолов Д.Ю., Лысенко В.Г. Исследование погрешности фильтрации текстуры поверхности пространственным фильтром Гаусса // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 19-23.

8. He B., Zheng H., Ding S., Yang R., Shi Z. A review of digital filtering in evaluation of surface roughness // *Metrology and Measurement Systems*. 2021. Vol. 28. pp. 217-253.
9. Hüser D. Selected Filtration Methods of the Standard ISO 16610, 5 Precision Engineering, PTV. 2016.
10. Порошин В.В., Богомолов Д.Ю., Лысенко В.Г. Исследование погрешности фильтрации неровностей поверхности сплайновым пространственным фильтром // *Измерительная техника*. 2018. № 3. С. 27-32.
11. Tong M., Zhang H., Ott D., Zhao X., Song J. Analysis of the boundary conditions of the spline filter // *Measurement Science and Technology*. 2015. Vol. 26. pp. 095001.
12. Krystek M. Discrete L-spline filtering in roundness measurement // *Measurement*. 1996. Vol. 18. pp. 129-138.
13. Goto T., Miyakura J., Umeda K., Kadowaki S., Yanagi K. A robust spline filter on the basis of L2-norm // *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29. pp. 157-161.
14. Zeng W., Jiang X., Scott P. A generalised linear and nonlinear spline filter // *Wear*. 2011. Vol. 271. pp. 544-547.
15. Марков Б.Н., Шулепов А.В. Алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости // *Измерительная техника*. 2015. № 7. С. 4-7.
16. Seewig J. Linear and robust Gaussian regression filters // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. Vol. 13. pp. 254-257.
17. Lou S., Zeng W.H., Jiang X.Q., Scott P.J. Robust Filtration Techniques in Geometrical Metrology and Their Comparison // *International Journal of Automation and Computing*. 2013. Vol. 10. pp. 1-8.
18. Radhakrishnan V. Selection of an enveloping circle radius for E-system roughness measurement // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. 1972. Vol. 12. pp. 151-159.
19. Srinivasan V. Discrete morphological filters for metrology // *Proceedings of the sixth IMEKO ISMQC symposium on metrology for quality control in production, TU Wein, Austria, September 8-10, 1998*.
20. Применение морфологической пространственной фильтрации неровностей поверхности для трёхмерной параметрической оценки текстуры / В.В. Порошин, Д.Ю. Богомолов, О.В. Порошин, В.Г. Лысенко // *Метрология*. 2016. № 2. С. 3-14.
21. Lou S., Jiang X., Scott P.J. Applications of morphological operations in surface metrology and dimensional metrology // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 483, pp. 012020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Захаров Олег Владимирович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.

Oleg V. Zakharov –
Dr. Sci. Tech., Professor,
Department of Mechanical
Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Яковишин Александр Сергеевич –
ассистент кафедры «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

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

Жуков Андрей Владимирович –
студент Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey V. Zhukov –
Undergraduate, Yuri Gagarin
State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.04.2022, принята к опубликованию 16.05.2022

А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, С.А. Игнатьев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА СТАНКОВ
ПО СТОХАСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

Аннотация. Рассматривается применение запаса устойчивости динамической системы, интегральных оценок автокорреляционных функций и спектров виброакустических колебаний в станках для оценки их динамического качества и назначения режима резания, что теоретически обосновывается решением стохастического уравнения колебаний в системе «резец-деталь».

Ключевые слова: станки, динамическое качество, виброакустические колебания, автокорреляционная функция, спектральная плотность, запас устойчивости, интегральные оценки, качество обработки

A.A. Ignatiev, V.A. Dobryakov, S.A. Ignatiev

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL EVALUATION
OF DYNAMIC QUALITY OF MACHINE TOOLS
USING STOCHASTIC CHARACTERISTICS
OF ACOUSTICALLY-INDUCED VIBRATIONS**

Abstract. The article considers application of the stability margin in dynamic systems, integral estimates of autocorrelation functions, and spectra of vibro-acoustic processes in machines in order to estimate their dynamic quality and assignment of the cutting mode, which is theoretically justified by solution of stochastic equation of vibrations in the «cutter-part» system.

Keywords: machines, dynamic quality, acoustically-induced vibrations, autocorrelation function, spectral density, stability margin, integral estimates, processing quality

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы обеспечения технологической прецизионных автоматизированных металлорежущих станков (АМС), включающие повышение точности формооб-

разующих перемещений рабочих органов, жесткости динамической системы (ДС), минимизацию тепловых деформаций и ряд других, хорошо известны [1-8], однако они имеют определенные пределы совершенствования.

При высокоточной обработке деталей в машино- и приборостроении существенное влияние на формирование макро- и микрогеометрических параметров точности деталей и физико-механические характеристики их поверхностного слоя оказывают виброакустические колебания (ВА) в ДС станков [9-21]. Прецизионная обработка на АМС деталей с размерами до 100 мм по 1...3 квалитетам отличается малыми снимаемыми припусками на последнем проходе инструментом (5...50 мкм) и небольшими силами резания (10...100 Н). Именно на этом этапе окончательно формируются заданные параметры точности (размер, волнистость, шероховатость) обработанной поверхности, что обуславливает необходимость учета ВА колебаний в паре «инструмент – деталь» ДС станка.

Указанные колебания фактически определяют динамическое качество АМС, которое может изменяться при вариации режимов резания, износе инструмента, изменении материалов заготовки и инструмента и т. п., причем следует отметить, что колебания в целом носят стохастический характер [13, 22, 23]. Это обусловлено тем, что на ДС оказывают воздействие несколько независимых источников ВА колебаний с различными спектрами (электродвигатели, шпиндели, процесс резания и т. п.). Их суммарное воздействие в диапазоне частот до нескольких килогерц определяет стохастическую составляющую силы резания, которую можно рассматривать как «ограниченный белый шум». На самом деле реальная стохастическая составляющая колебаний является «цветным» ограниченным шумом, как указано выше, однако сигнал типа «белый шум» более удобен для анализа. Отсюда следует, что оценку динамического качества АМС целесообразно проводить на основе экспериментально-аналитических методов анализа стохастических характеристик ВА колебаний ДС.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Виброакустические колебания АМС, имея в целом стохастический характер, содержат в общем случае детерминированную и стохастическую компоненты [10, 13, 15, 24]. Детерминированные колебания обусловлены вибрацией в подшипниках шпинделей и двигателей, а также собственными колебаниями отдельных узлов, однако в прецизионных АМС реализованы технические решения, позволившие свести эту компоненту к минимуму [6, 7, 15, 18, 25]. Соответственно на первый план выходит стохастическая компонента, обусловленная на прецизионных АМС в основном про-

цессом резания, и анализ которой дает возможность сформировать оценку их динамического качества [15, 17, 22, 23].

Для теоретического обоснования применимости стохастических характеристик ВА колебаний для оценки динамического качества станков рассмотрим модель колебаний в паре «инструмент – деталь» при следующих условиях и ограничениях [23, 26, 27]:

1) в силу взаимосвязи колебаний по трем координатным осям рассматриваются колебания только по одной оси, наибольшим образом влияющие на параметры геометрической точности детали;

2) износ инструмента за время обработки одной детали считается пренебрежимо малым;

3) процесс резания рассматривается как устойчивый, причем сила резания рассматривается как стационарный случайный процесс типа «белый шум» $\xi(t)$ [10, 13].

В этом случае стохастическая составляющая ВА колебаний $\overset{\circ}{h}(t)$, возникающая под действием сигнала типа «белый шум» $\xi(t)$, определяется выражением [28, 29]:

$$\overset{\circ}{h}(t) = \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-\alpha(t - \tau)\} \xi(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau. \quad (1)$$

Следовательно, имеет место преобразование стохастического процесса $\xi(t)$ в стохастический процесс $\overset{\circ}{h}(t)$, причем если исходный процесс является стационарным случайным с нулевым математическим ожиданием, то и преобразованный относится к тому же типу.

Реальная ДС станка является нелинейной и нестационарной, однако если рассматривать ее за время обработки одной детали (несколько десятков секунд), то ее можно рассматривать как линейную, что, как показали исследования [20, 23], является вполне адекватным.

В этом случае используется математический аппарат теории автоматического управления для линейных систем для идентификации ДС по стохастическим характеристикам ВА колебаний в виде передаточной функции замкнутой системы $W_3(p)$. Для этого на основе регистрации ВА колебаний при различных значениях параметров режима резания вычисляется автокорреляционная функция $K(\tau)$ (АКФ) и определяется передаточная функция из формулы, математически обоснованной в работе [30]:

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W_3(p)W_3(-p), \quad (2)$$

где $K(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K(\tau)$.

Далее с помощью специализированного программно-математического обеспечения (ПМО) определяются интегральные оценки АКФ и спектральной плотности мощно-

сти (СПМ) ВА колебаний или запас устойчивости ДС, вычисленный из передаточной функции $W_3(p)$, для различных значений частоты вращения шпинделя, подачи инструмента и т. п. [15, 17, 31].

Затем на основе сопоставления их с результатами контроля качества деталей оценивается динамическое качество АМС, целесообразный режим обработки, обеспечивающий высокую производительность и сохранение заданных значений геометрических параметров точности и физико-механических характеристик поверхностного слоя деталей как при шлифовании, так и при точении [22, 23].

Выбор режима резания осуществляется по максимуму запаса устойчивости ДС или минимуму интегральных оценок при варьировании значениями параметров технологического режима. Запас устойчивости оценивается либо по критерию Михайлова, либо по показателю колебательности ДС, причем чем ближе показатель колебательности к значению $1,1, \dots, 1,3$, тем выше запас устойчивости; повышение его значения снижает запас устойчивости) [33].

Перейдем к анализу колебаний в паре «резец-деталь». Уравнение колебаний имеет вид

$$M \cdot \ddot{y} + H \cdot \dot{y} + Cy = \xi(t), \quad (3)$$

где M, H, C – приведенные к резцу массы, коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы, $\xi(t)$ – сила резания, воздействующая на систему, $y(t)$ – относительные колебания резца и заготовки.

Уравнение (3) является стохастическим дифференциальным уравнением, поэтому в явном виде относительно выходной переменной $y(t)$ решение затруднительно, однако относительно моментной функции 2-го порядка, в качестве которой рассматривается АКФ $K_{\xi\xi}(\tau)$, оно может быть решено [32].

Преобразуем уравнение (3) к виду

$$\ddot{y} + 2\rho\dot{y} + \omega_0^2 y = \xi(t), \quad (4)$$

где $\rho = H/2M, \omega_0^2 = C/M$.

Известно [33], что сигнал типа «белый шум» имеет АКФ вида

$$K_{\xi\xi}(\tau) = S_0 \delta(\tau), \quad (5)$$

где $\delta(\tau)$ – дельта-функция, S_0 – постоянная величина.

В этом случае уравнение (4) трансформируется в следующую форму

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + 2\rho \frac{\partial}{\partial \tau} + \omega_0^2 \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} - 2\rho \frac{\partial}{\partial \tau} + \omega_0^2 \right) \cdot K_{yy}(\tau) = K_{\xi\xi}(\tau). \quad (6)$$

Решение уравнения (6) имеет вид затухающей косинусоиды

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0}{4\omega_0\rho} e^{-p\tau} \left(\cos\omega_1\tau + \frac{\rho}{\omega_1} \sin\omega_1(\tau) \right), \quad (7)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2}$ – собственная частота, вычисленная с учетом демпфирования ($\rho < \omega_0$).

При $\omega_1 \gg \rho$ формула (7) преобразуется к более простому виду

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0}{4\omega_0\rho} e^{-p\tau} \cos\omega_1\tau. \quad (8)$$

Таким образом, результаты анализа уравнения динамики для пары «резец – деталь» в стационарном режиме резания показывают, что АКФ ВА колебаний могут служить оценкой качества процессов с ДС. На основе обработки записей ВА колебаний при резании идентифицируется аналитическое выражение для АКФ $K_{yy}(\tau)$, а затем вычисляется передаточная функция замкнутой ДС $W_3(\rho)$ по формуле (2). Далее оценивается запас устойчивости ДС через вычисление показателя колебательности [33] или определяются интегральные оценки АКФ и СПМ. Эквивалентность указанных оценок динамического качества отражена математическими соотношениями в работах [34, 35].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТОКАРНЫХ И ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ

Снижение значений микрогеометрических параметров точности обработанной поверхности (волнистость, шероховатость) связано с минимизацией влияния ВА колебаний в ДС, в том числе и с определением рационального режима резания, которые базируются на оперативном определении динамического качества АМС. Оценка динамического качества АМС одной модели проводится путем сравнения запаса устойчивости ДС или интегральных оценок АКФ и СПМ при условии обработки одинаковых или близких деталей, инструментов и режимов резания.

Определение АМС с наиболее высоким динамическим качеством позволяет дать рекомендации по ремонтно-профилактическим работам на станках для улучшения их технического состояния. В результате вариации значений параметров режима резания или по мере износа инструмента изменяется уровень вибраций в ДС. Соответственно изменяются передаточные функции, что и характеризует изменение динамического качества станка. Это позволяет назначить целесообразный режим резания для каждого станка индивидуально.

Для регистрации ВА колебаний ДС на токарных и шлифовальных АМС использовался виброизмеритель ВШВ-003М2 с датчиком ДН-3. Вибродатчик на магнитной опоре на токарных станках устанавливался на резцовый блок, а на шлифовальных станках – на

опоре кольца подшипника вблизи зоны резания. Сигнал с виброизмерителя обрабатывался на компьютере специализированным ПМО, позволяющим вычислять АКФ $K(\tau)$ и СПМ $S(\omega)$ (рис. 1), их интегральные оценки, а также запас устойчивости ДС по показателю колебательности.

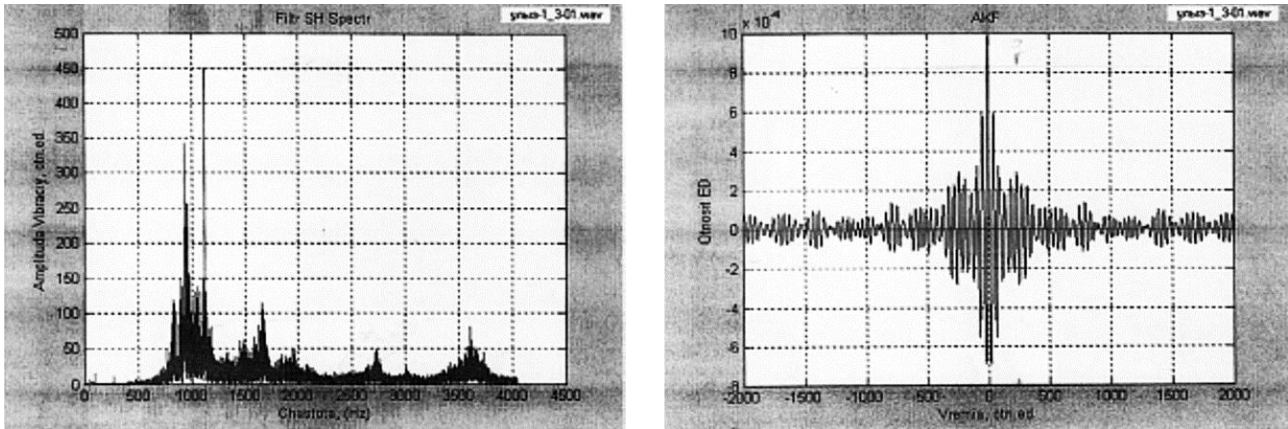


Рис. 1. Типичный вид спектра и автокорреляционной функции виброакустических колебаний динамической системы

Для сравнения динамического качества прецизионных токарных модулей типа ТПАРМ проведены исследования связи шероховатости поверхности с интегральными оценками АКФ ВА колебаний. На станках осуществлялось предварительное точение одинаковых деталей из алюминиевого сплава с одинаковыми значениями параметров режима резания. Сравнительный анализ показал (рис. 2), что имеется взаимосвязь шероховатости R_a с интегральными оценками АКФ, а модуль № 30, у которого они минимальны, имеет наименьшее значение шероховатости. Отсюда следует, что при проведении соответствующего технического обслуживания модули можно приблизить по динамическому качеству к модулю № 30.

Для сравнения круглошлифовальных станков SWaAGL-50 по динамическому качеству выполнены исследования по установлению связи точности обработки колец подшипников с запасом устойчивости ДС [36, 37]. На станках шлифовались дорожки качения колец из стали ШХ-15 примерно одного типоразмера, кругом из одного и того же материала и с близкими значениями параметров технологического режима. Сравнительный анализ показал (рис. 3), что имеется взаимосвязь волнистости дорожки качения с запасом устойчивости ДС, а станок № 230, обладающий наибольшим запасом устойчивости (показатель колебательности M имеет наименьшее значение), обеспечивает более высокую геометрическую точность шлифованной поверхности. Экспериментально подтверждено, что запас устойчивости ДС станка может служить оценкой его динамического качества, что согласуется с положениями, рассмотренными ранее В.А. Кудиновым [9]. Ранее это было доказано экспериментально на модулях типа ТПАРМ [5].

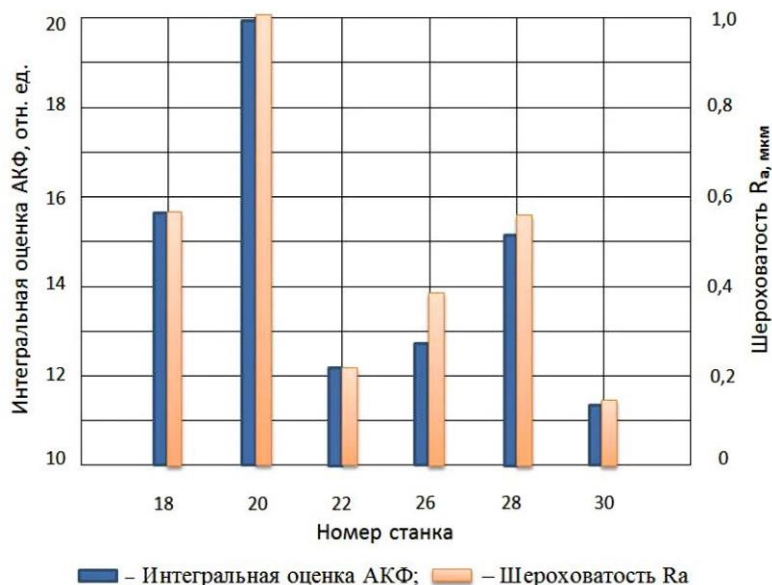


Рис. 2. Значения шероховатости поверхности и интегральные оценки АКФ при обработке деталей на токарных модулях типа ТПАРМ

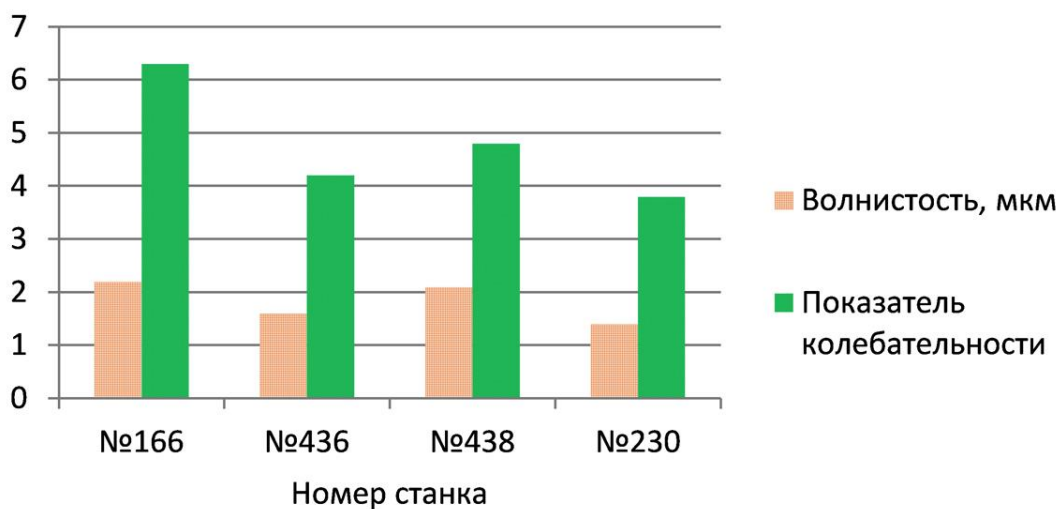


Рис. 3. Значения волнистости дорожек качения колец подшипников и показатель колебательности ДС круглошлифовальных станков SWaAGL-50

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, связанных с назначением режима резания с учетом динамического качества ДС.

На рис. 4 приведены результаты для токарного модуля ТПАРМ-100М, которые показывают, что минимальное значение интегральной оценки спектра ВА колебаний соответствует минимуму шероховатости поверхности Ra при $n = 1600$ об/мин, причем минимальное значение показателя колебательности соответствует максимальному запасу устойчивости ДС. Указанное хорошо согласуется с данными работы [15].

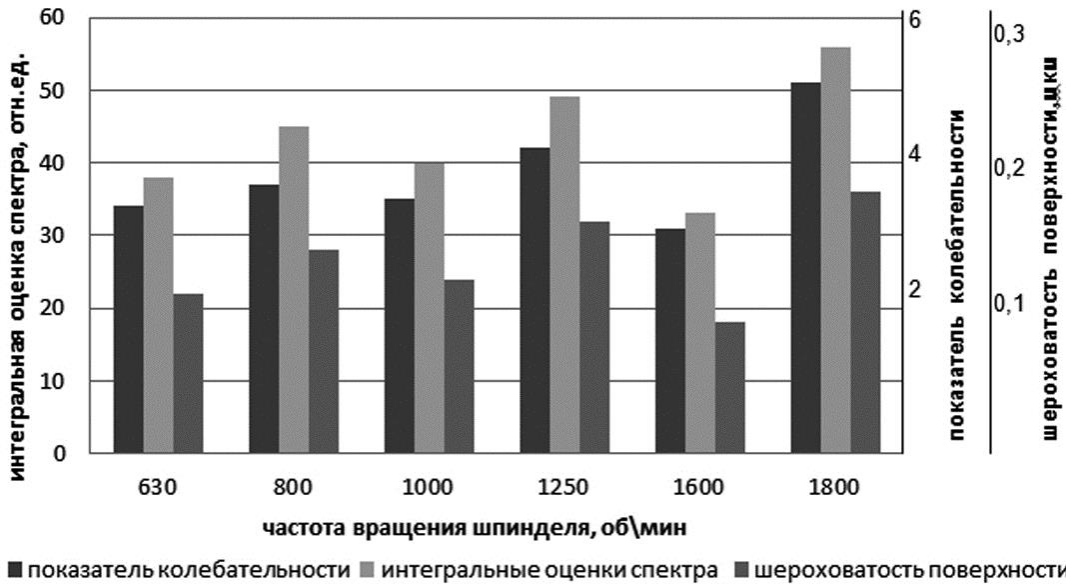


Рис. 4. Интегральные оценки спектра, показатели колебательности и шероховатость поверхности Ra при обработке на токарном модуле типа ТПАРМ при изменении частоты вращения шпинделя

На рис. 5 отражены результаты, полученные на внутришлифовальном станке SIW-5. Измерения ВА колебаний и качества поверхности колец подшипников выполнены на каждой подаче для трех последовательно обработанных колец и произведено усреднение. Стандартное отклонение (СКО) по качеству колец составляет не более 0,4 балла, т. е. не превышает 8 %, а по запасу устойчивости – не более 5 %.

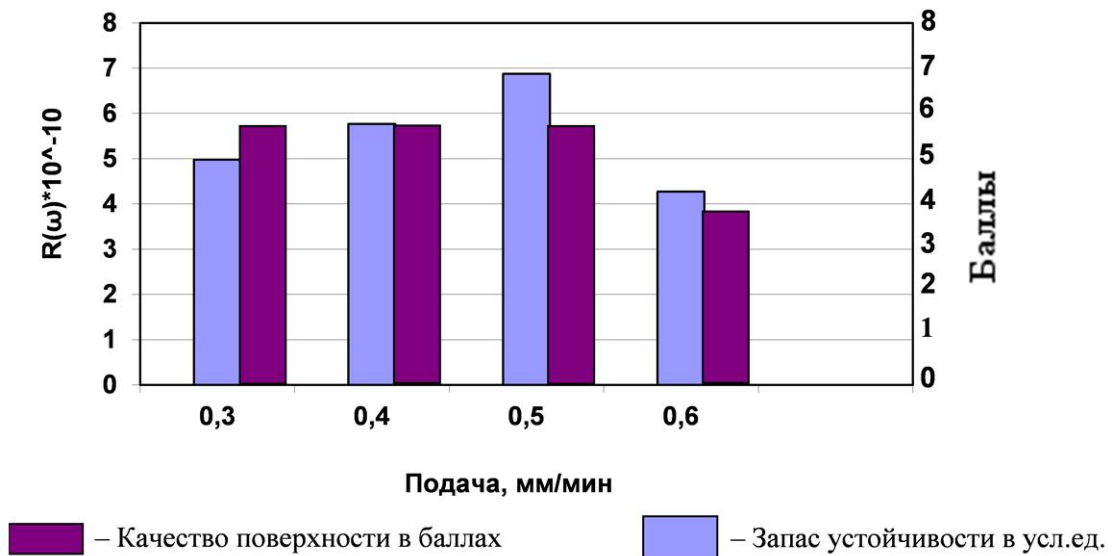


Рис. 5. Зависимость запаса устойчивости ДС и качества поверхности от подачи круга при шлифовании на станке SIW-5

Запас устойчивости оценивался по критерию Михайлова [22, 33]. Из рисунка видно, что при повышении подачи от 0,3 мм/мин до 0,5 мм/мин запас устойчивости незначительно возрастает. Однако с увеличением подачи до 0,6 мм/мин запас устойчивости снижается и по данным вихретокового контроля ухудшается качество поверхностного слоя дорожки качения кольца подшипника, что объясняется повышением скорости съема припуска [38, 39].

Определение рационального режима по максимуму запаса устойчивости ДС, выбранному из полученных для различных подач, рекомендуется применять при предварительном шлифовании и на черновых проходах, когда подача круга достаточно велика. При этом достигается хорошее качество поверхности качения колец при практически максимальной производительности, что способствует получению их высокого качества после чистовых операций шлифования.

Рассмотрим результаты исследований, направленных на определение времени целесообразной замены резца при токарной обработке или осуществления правки абразивного круга при шлифовании. Диагностирование состояния инструмента является важнейшим моментом в эксплуатации АМС, поэтому ему уделяется внимание во многих работах, в которых указывается на измерение сил резания, температуры резания, вибраций, момента на шпинделе и т. п., контроле с помощью механических, оптических и других датчиков [5, 8, 21-23, 40, 41].

В реальном производстве для АМС важно иметь информацию о наступлении недопустимого износа инструмента, приводящего к браку изготовленных деталей. В работе [14] рассмотрен метод определения предельного износа резца на основе измерения вибраций, однако алгоритм обработки данных достаточно сложен для практического применения. В нашем случае анализируются ВА колебания с вычислением запаса устойчивости ДС и формируется критерий для замены резца при катастрофическом износе или для осуществления правки круга [22, 23, 42-45].

В соответствии с принятой на предприятии технологией при окончательном точении наружных колец подшипников 42822 принудительная замена резца осуществлялась через 39...40 колец, обуславливая неполное использование его режущих свойств, что экономически нецелесообразно [25]. В реальных условиях производства измерение ВА колебаний и размеров деталей показало, что катастрофический износ резца наступает после 43...48 детали.

Анализ диаграммы (рис. 6) указывает, что значение показателя колебательности постепенно увеличивается от 1-го до 42-го кольца, а на 43-м кольце резко возрастает (более чем на 20 %). Верхняя диаграмма соответствует исходному ряду показателей колебательности, средняя – сглаженному ряду методом скользящего среднего, нижняя – ряду из первых разностей показателей колебательности. Более четко существенное изменение показателя колебательности видно на диаграмме изменения его первых разностей, свидетельствуя о со-

ответствующем снижении запаса устойчивости и наступлении начальной фазы катастрофического износа резца на 43-м кольце. Именно первые разности используются в специальном программно-математическом обеспечении (ПМО) для выявления катастрофического износа резца. Вычисление запаса устойчивости позволяет оперативно выявлять его начальную фазу и, соответственно, повышает эффективность использования дорогостоящего инструмента.

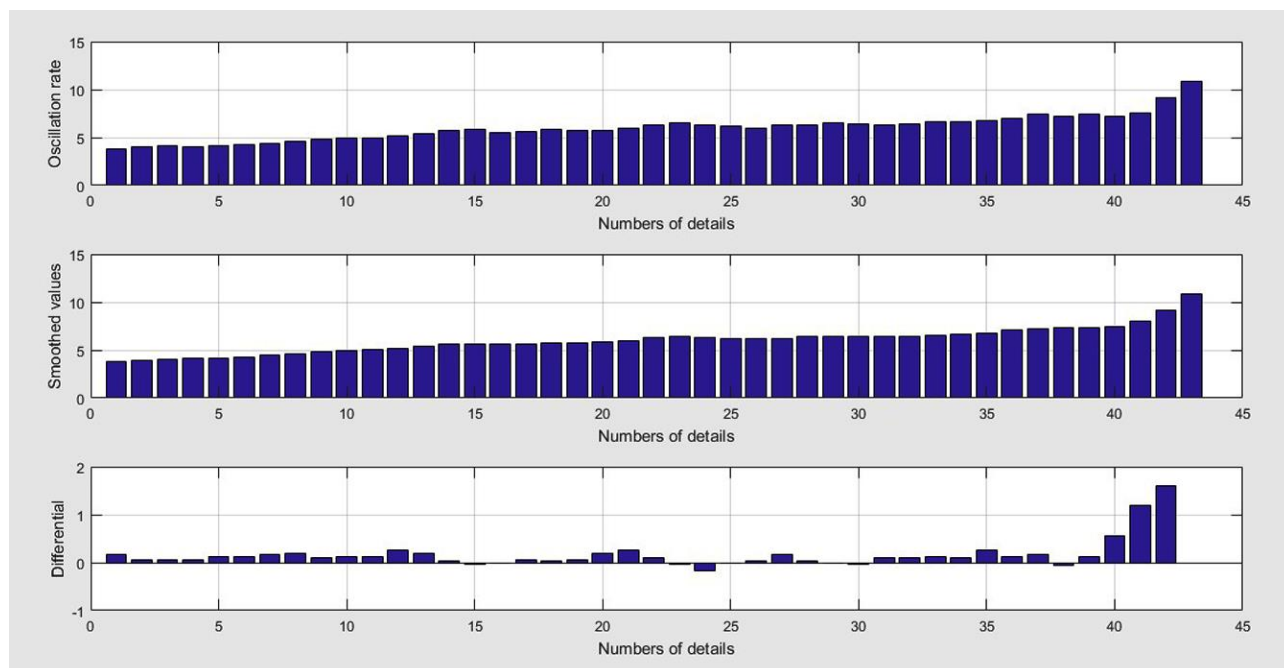


Рис. 6. Изменение показателей колебательности динамической системы и их первых разностей при окончательной обработке дорожки качения колец 42822/01 на токарном станке модели ПАБ-350

Для оценки изменения запаса устойчивости ДС по мере износа абразивного круга проведён эксперимент на круглошлифовальном станке SWaAGL-50 В производственных условиях правка предусмотрена через 5 колец. В эксперименте обработка осуществляется до того момента, когда качество поверхностного слоя дорожки качения колец существенно ухудшалось. В качестве показателя качества использовалась неоднородность структуры поверхностного слоя, обусловленная различными дефектами. Оценка качества осуществлялась вихретоковым методом с помощью автоматизированного прибора ПВК-К2М в баллах (5 баллов – отличное состояние, 2 балла – брак) [17, 22, 39]. Запас устойчивости оценивался в условных единицах по критерию Михайлова.

Вычисление запаса устойчивости при обработке колец показало (рис. 7), что уровень ВА колебаний и запас устойчивости почти не изменялся со 1-го по 10-е кольцо, а начиная с 12-го кольца повысился уровень ВА колебаний и резко понизился запас устойчивости, что коррелирует с показателем качества поверхностного слоя дорожки качения.

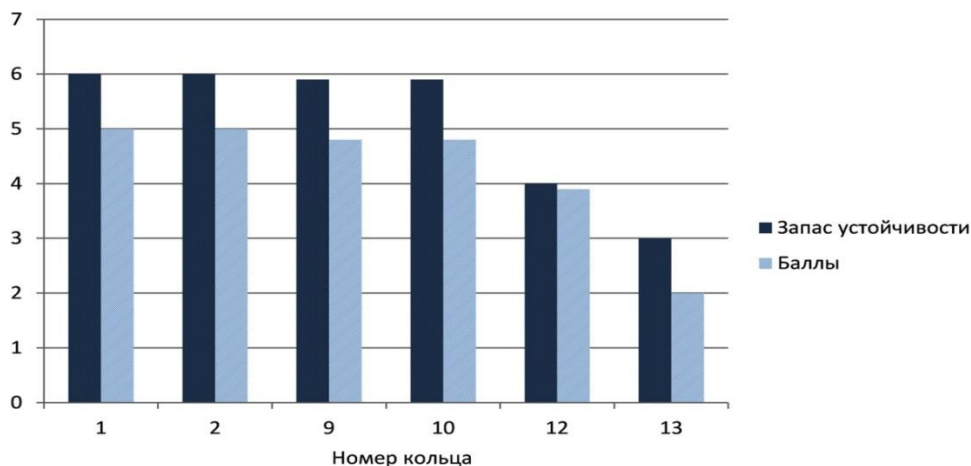


Рис. 7. Зависимость запаса устойчивости ДС и качества поверхностного слоя дорожки качения кольца от периодичности правки инструмента на круглошлифовальном станке SWaAGL-50

Из изложенного следует, что правку круга можно осуществлять не через 5 колец, как принято по технологическому циклу, а через 10 колец, что повышает производительность при сохранении качества поверхностного слоя, увеличивает срок эксплуатации круга и экономит алмазный правящий инструмент. Аналогичные результаты были получены для круглого шлифования валов малого диаметра, для которого цикл правки круга был увеличен с 30 деталей до 75 [42].

Дальнейшее развитие и внедрение результатов приведенных исследований связано с применением интеллектуальных технологий, в частности экспертных систем и нейронных сетей, что существенно повышает их эффективность [46, 47].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований виброакустических колебаний токарных и шлифовальных станков различных моделей установлено, что динамическое качество станков может оцениваться, во-первых, по запасу устойчивости ДС, вычисляемого из ее передаточной функции, полученной на основе идентификации по АКФ колебаний, во-вторых, по интегральным оценкам АКФ и СПМ колебаний. Оценка динамического качества автоматизированных станков позволяет, во-первых, осуществить их сравнение по этому параметру и провести профилактические работы на АМС с пониженным динамическим качеством, во-вторых, выбрать режим резания для обработки высокоточных деталей с наиболее качеством, в-третьих, выявить начальную фазу катастрофического износа резца для своевременной замены и более полного использования ресурса, а также увеличить периодичность правки абразивного круга, что способствует повышению эффективности шлифования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Технологическая надежность станков / под ред. А.С. Проникова. М.: Машиностроение, 1971. 342 с.
2. Точность и надежность станков с ЧПУ / под ред. А.С. Проникова. М.: Машиностроение, 1982. 256 с.
3. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1988. 336 с.
4. Дружинский И.А. Концепция конкурентоспособных станков. Л.: Машиностроение, 1990. 247 с.
5. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. Ч. 1 / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1992. 160 с.
6. Пуш А.В. Основные принципы проектирования прецизионных и сверхпрецизионных станков // СТИН. 1999. № 3. С. 12-14.
7. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века // СТИН. 2003. № 9. С. 3-7; № 10. С. 3-7.
8. Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г. Обеспечение качества деталей при обработке резанием в автоматизированном производстве. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 412 с.
9. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
10. Попов В.И. Динамика станков / В.И. Попов, В.И. Локтев. Киев: Техника, 1975. 136 с.
11. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
12. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
13. Lin Z.H., Hodgson D.C. In-process measurement and assessments of dynamics characteristics of machine tool structures // Int. J. Mach. Tools Manufact. 1988. V. 28. № 2. P. 93-101.
14. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1988. 136 с.
15. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. Ч. 2 / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1994. 156 с.
16. Юркевич В.В. Динамические характеристики металлообрабатывающих станков // Технология машиностроения. 2008. № 1. С. 28-35.
17. Игнатьев С.А., Горбунов В.В., Игнатьев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 160 с.

18. Улучшение динамических характеристик прецизионного токарного станка среднего типоразмера / Ю.Н. Санкин, В.И. Жиганов, Р.Ш. Халилов, С.В. Жиганов // СТИН. 2012. № 7. С. 8-12.
19. Козочкин М.П. Влияние динамических характеристик станков на вибрации при резании // СТИН. 2014. № 2. С. 4-9.
20. Ignat'ev A.A., Karakozova V.A. and Ignat'ev S.A. Transfer Function and Margin of Stability in the Dynamic System of a Grinding Machine // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. № 2. P. 123-125.
21. Мониторинг состояния станков и станочных систем / А.К. Тугенгольд, В.П. Димитров, Р.Н. Волошин, Л.В. Борисова // СТИН. 2017. № 3. С. 11-17.
22. Игнатьев А.А., Каракозова В.А., Игнатьев С.А. Стохастические методы идентификации в динамике станков. Саратов: СГТУ, 2013. 124 с.
23. Игнатьев С.А., Коновалов В.В., Игнатьев С.А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов: СГТУ, 2014. 92 с.
24. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
25. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
26. Игнатьев А.А. Стохастические модели в динамике станков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2014. С. 53-55.
27. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Полуэктова А.М. Условия идентификации динамической системы станка по автокорреляционной функции виброакустических колебаний при резании // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2020. С. 17-22.
28. Адомиан Дж. Стохастические системы / пер. с англ. Н.Г. Волкова. М.: Мир, 1987. 376 с.
29. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 424 с.
30. Складчиков А.Н. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М.: Наука, 1965. 457 с.
31. Выбор режима резания на автоматизированном токарном станке на основе оценки запаса устойчивости динамической системы / А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, С.А. Игнатьев и др. // СТИН. 2018. № 6. С. 25-29.
32. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. М.: Наука, 1979. 336 с.
33. Бесекерский В.А., Попов Е.В. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

34. Игнатьев А.А., Самойлова Е.М., Шамсадова Я.Ш. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 90-98.
35. Игнатьев А.А., Шамсадова Я.Ш., Игнатьев С.А. Применение интегральных оценок спектральных плотностей виброакустических колебаний для оценки динамического качества станков // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 94-98.
36. Игнатьев А.А., Гаврилова А.В., Игнатьев С.А. Теоретические экспериментальные исследования динамического качества шлифовальных станков для обработки дорожек качения колец подшипников // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 1 (21). С. 124-133.
37. Игнатьев А.А., Гаврилова А.В., Игнатьев С.А. Применение запаса устойчивости для оценки динамического качества шлифовальных станков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2017. С. 39-41.
38. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А. Автоматизированный контроль в системе управления качеством изготовления деталей подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 14-25.
39. Automated measurements in process monitoring system in bearing production / Ignat'ev A.A., Dobrykov V.A., Ignat'ev S.A. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 1515(2020) 052057 (ICMIT-2020 – Metrological Support of Innovative Technologies: International Scientific Conference. Saint Petersburg-Krasnoyarsk, 2020. March 4).
40. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 2. С. 23-28.
41. Мониторинг состояния станков и станочных систем / А.К. Тугенгольд, В.П. Димитров, Р.Н. Волошин, Л.В. Борисова // СТИН. 2017. № 3. С. 11-17.
42. Управление периодичностью правки круга при шлифовании с применением интеллектуальных технологий / А.А. Игнатьев, Е.М. Самойлова, Д.В. Козлов, В.В. Коновалов. Саратов: СГТУ, 2016. 100 с.
43. Применение методов теории автоматического управления при анализе процессов в динамической системе шлифовального станка / А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, С.А. Игнатьев, А.В. Гаврилова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 2 (85). С. 31-37.
44. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А. Автоматизированное распознавание катастрофического износа инструмента по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний. Саратов: СГТУ, 2020. 84 с.

45. Игнатьев А.А., Казинский Н.А., Игнатьев С.А. Моделирование динамической системы токарного станка с ЧПУ и оценка ее запаса устойчивости при изменении режима резания // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 1 (21). С. 134-141.

46. Игнатьев А.А., Гаврилова А.В., Игнатьев С.А. Экспертная система поддержки принятия решения при контроле динамического качества шлифовальных станков. Саратов: СГТУ, 2018. 104 с.

47. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей интегрированного производства: в 3 ч. Ч. 2. Динамическая экспертная система поддержки принятия решения. Саратов: СГТУ, 2018. 100 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игнатьев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

I Alexander A. Ignatyev – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Добряков Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Dobryakov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Игнатьев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav A. Ignatyev – Dr. Sci. Tech., Professor, Department of Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.03.2022, принята к опубликованию 16.05.2022

**Д.Ю. Финогеев, Д.А. Макаров,
И.В. Головченко, О.П. Решетникова**

**ВЛИЯНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРУЗИОННЫХ СОПЕЛ ПРИ ПЕЧАТИ
КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ**

***Аннотация.** В статье рассмотрена проблема абразивного износа экструзионного сопла FDM 3D-принтера после печати композитным материалом. Рассмотрен наглядный пример износа двух видов сопел из разных конструкционных материалов.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, абразивный износ, композитные материалы, FDM*

**D.Yu. Finogeev, D.A. Makarov,
I.V. Golovchenko, O.P. Reshetnikova**

**THE EFFECTS OF ABRASIVE WEAR ON GEOMETRIC
PARAMETERS OF EXTRUSION NOZZLES WHEN PRINTING WITH
COMPOSITE MATERIALS USING THE LAYER-BY-LAYER METHOD**

***Abstract.** The article discusses the problem of abrasive wear of the FDM 3D printer extrusion nozzle after printing with a composite material. A visual aid is provided to the wear of two types of nozzles made from different structural materials.*

***Keywords:** additive technologies, 3D-printing, abrasive wear, composites, FDM*

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие аддитивных технологий (АТ) и внедрение их в существующие производства внесло большой вклад в понимание процессов, происходящих при печати методом экструзии (FDM/FFF) [1]. Так, использование такой технологий показало, что требования к печати возросли не только со стороны возможности оборудования, но и со стороны используемых материалов.

Стал актуальным вопрос о печати конструкционными композитными пластиками, которые позволяют получить детали с более высокими физико-механическими свойствами. Печать такими пластиками имеет большой ряд нюансов, например печать должна производиться в термокамерах с программируемыми режимами температуры бокса и экструзии для ликвидации геометрических деформаций в момент построения изделия.

Наряду со сложностями печати возникают сопутствующие проблемы при построении изделий. К ним можно отнести некачественное сплавление слоев, недостаточное и неравномерное экструдирование, образование натеков на предыдущие слои и т. д. Приведенные примеры в большинстве случаев зависят от экструзионного сопла и степени его износа [2].

Возникающие проблемы печати композиционными материалами обусловлены как структурными свойствами самого материала, так и режимами послойного наплавления. Различные виды наполнителей для производства нитей (филамента) по-разному влияют на износ сопла. К примеру, нити, наполненные углеродным волокном, воздействуя на поверхность экструзионной части сопла, оставляют глубокие задиры. При этом происходит изменение геометрии калибрующей части сопла, что влечет за собой искажение параметров экстрагируемого слоя.

Следствие всего этого – появление брака при изготовлении деталей. Проанализируем влияние абразивного износа на геометрические параметры экструзионных сопел из двух разных материалов. Приведем статистические данные зависимости износа калибрующей части.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для испытания абразивной стойкости экструзионных сопел был выбран композиционный материал на основе нейлонового сополимера с добавлением углеродного волокна «PolyMide™ PA6-CF» [3]. В настоящее время такой вид материалов приобретает особую популярность, так как позволяет получить изделие с высоким модулем упругости, улучшенной химической и термической устойчивостью. В табл. 1 приведены механические свойства материала.

Таблица 1

Механические свойства материала «PolyMide™ PA6-CF»

Модуль Юнга, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²
7453 ± 656	105,0 ± 5,0	169,0 ± 4,7	13,34 ± 052

В качестве объектов исследования были выбраны два сопла марки E3D V6 – латунное и стальное, с диаметром калибрующей части 0,5 мм (рис. 1, 2). Данный диаметр выбран из оптимальных параметров свободного прохождения частиц расплавленного композитного материала без засорения экструзионного канала.



Рис. 1. Сопло из латунного сплава В135



Рис. 2. Сопло из закаленной стали А2

Исследование производилось на оборудовании PICASO 3D-Designer. Данный принтер позволяет печатать согласно рекомендуемым параметрам для экструзии используемого в исследовании материала. Для фиксации результатов использовался оптический микроскоп «БиОптик СМ-400».

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

В качестве модели, для испытания, используется куб объемом 8000 мм³. Подготовка управляющей программы (УП) производилось в программном обеспечении «Ultimaker Cura». Подготовленная программа не изменяется на всем протяжении всего исследования. Настройки параметров печати приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры настройки в программном обеспечении «Ultimaker Cura»

Температура сопла, t°	Температура стола, t°	Охлаждение зоны печати, %	Скорость печати, мм/с	Толщина слоя, мм
295	60	85	60	0,3

После генерации УП по расчетным параметрам программы, получаем время печати – 57 минут и количество требуемого пластика на один образец 18 г. Производим наладку принтера и осуществляем печать модели с последующим контролем износа сопла. Контроль сопла будем производить после каждого изготовления детали, доводя испытываемые сопла до максимального истирания.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение экструзионных сопел из закаленного и латунного сплава после печати показало значительные результаты по изменению исходных геометрических характеристик. В процессе 3D-печати происходит как линейный, так и диаметральный износ. Линейное истирание происходит за счет постоянного следования пятна расплавленного композиционного материала по координатам перемещения. Такое влияние материала приводит к большому изнашиванию торца экструзионного сопла. Это подтверждают приведенные замеры высоты сопла (рис. 3). Помимо линейного износа, происходит и диаметральный износ калибрующего экструзионного отверстия сопла. Изменение диаметральных размерных характеристик представлено на рис. 4.

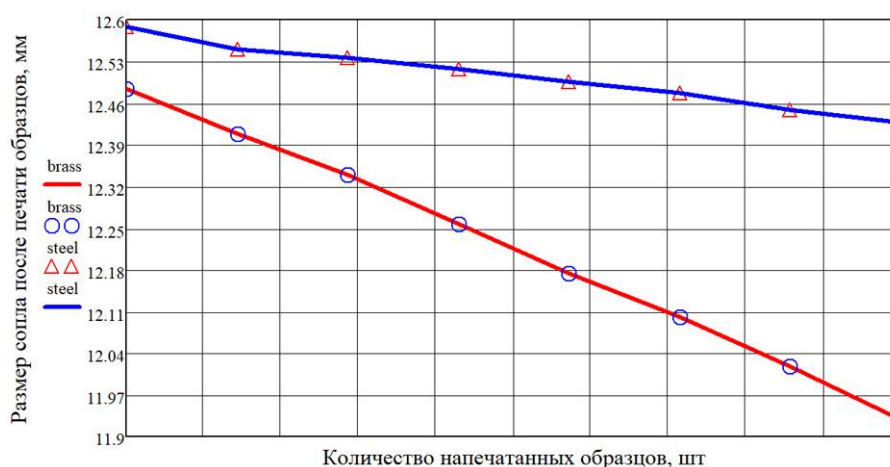


Рис. 3. График зависимости линейного износа экструзионных сопел из латунного сплава В135 и закаленной стали А2

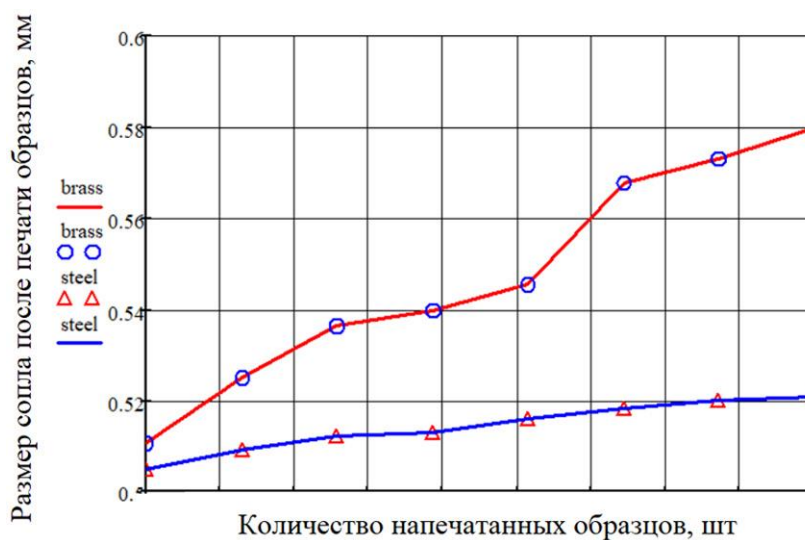


Рис. 4. График зависимости диаметрального износа экструзионных сопел из латунного сплава В135 и закаленной стали А2

Полученные данные свидетельствуют о значительном отрицательном влиянии композиционного материала «PolyMide™ PA6-CF» на стандартные экструзионные сопла, выполненные из латунного сплава, и в меньшей мере – на закалённое сопло. Истирающий эффект происходит за счет абразивного износа инструмента (сопла) углеродными микроволокнами. Размер волокон хорошо виден в сравнении с величиной слоя в 0,3 мм (рис. 5).

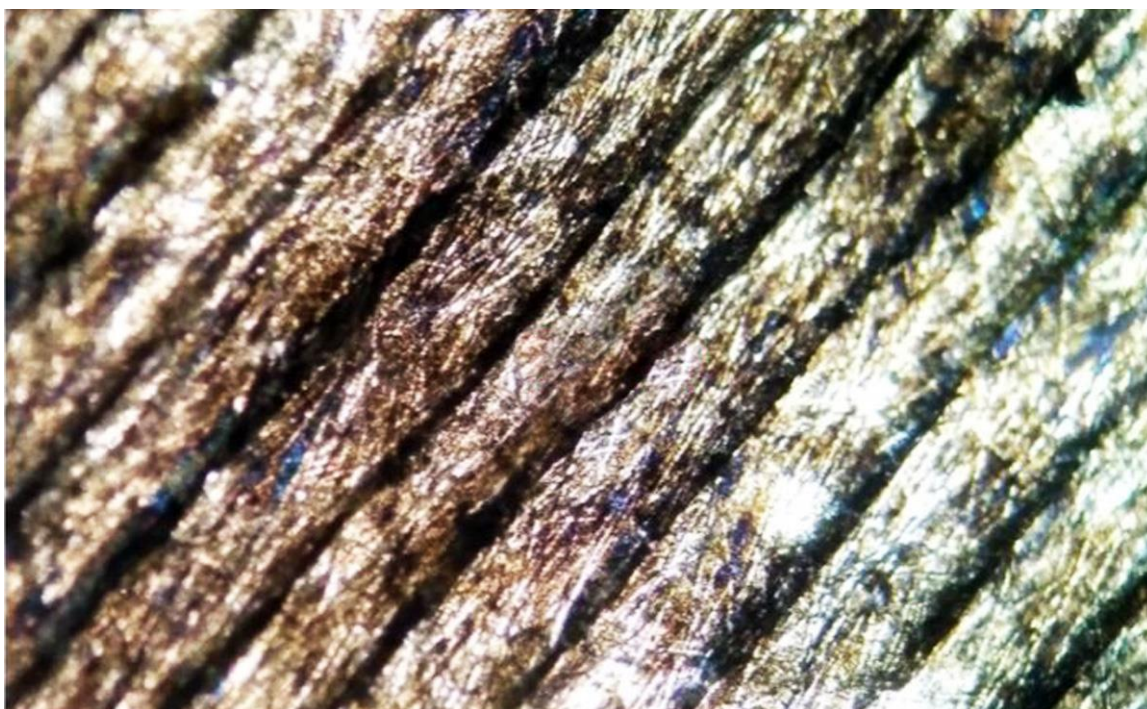


Рис. 5. Структура детали из материала «PolyMide™ PA6-CF»

ВЫВОДЫ

Выполненное испытание и изучение экструзионных сопел после продолжительного воздействия материала «PolyMide™ PA6-CF» показало значительное влияние абразивного износа при печати высоконаполненными композиционными материалами. Лучшие показатели износостойкости показало сопло, изготовленное из закаленной стали. В дальнейшем планируется провести исследование с соплами, изготовленными из углеродистой инструментальной стали и твердых сплавов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П. Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения, // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 63-71.

2. Холодилов А.А., Пузынина М.В. Проблемы, возникающие при трехмерной печати объектов с использованием технологии FDM // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований: материалы Междунар. (заоч.) науч.-практ. конф., Прага, 09 февраля 2017 г.. Прага: Науч.-изд. центр «Мир науки», 2017. С. 199-204.

3. Каталог продукции Polymaker, 2022. URL: <https://eu.polymaker.com/product/polymide-раб-cf/>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Финогеев Даниил Юрьевич –
магистрант Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Daniil Yu. Finogeev –
Master student,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Макаров Денис Алексеевич –
инженер-технолог ПАО «СЭЗ им. Серго
Орджоникидзе», Саратов

Denis A. Makarov –
Industrial Engineer, PAO «Sergo
Ordzhonikidze SEZ», Saratov

Головченко Илья Вячеславович –
магистрант Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Ilya V. Golovchenko –
Master student,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Решетникова Ольга Павловна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного техниче-
ского университета имени Гагарина Ю.А.

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

Статья поступила в редакцию 16.05.2022, принята к опубликованию 06.06.2022

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО УГЛЕПЛАСТИКА В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Аннотация. В статье изложены результаты оценки по критерию Цая – Ву предельного состояния контрольных и обработанных в СВЧ электромагнитном поле (опытных) образцов отвержденного углепластика, находящегося при температуре -20°C , в сравнении с образцами, находящимися в нормальных условиях производственного помещения. Показано, что отрицательные температуры приводят к увеличению критерия Цая – Ву как контрольных, так и опытных образцов. При этом величина критерия для опытных охлажденных образцов остается практически на уровне контрольных образцов в нормальных условиях, что свидетельствует о повышении надежности в предельном состоянии конструкций из углепластика после СВЧ воздействия.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластик, экстремальные условия эксплуатации, прочность, сложное нагружение, предельное состояние, критерии, СВЧ электромагнитное поле

N.V. Bekrenev, I.V. Zlobina

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE LIMIT STATE OF STRUCTURAL CARBON FIBER-REINFORCED PLASTICS AT NEGATIVE TEMPERATURES AFTER TREATMENT IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

Abstract. The article presents the estimation results provided in line with the Tsai – Wu criterion of the limit state for control samples of toughened carbon fiber-reinforced plastic

treated in the microwave electromagnetic field at -20°C , in comparison with the samples preserved under standard conditions in the production room. It is shown that negative temperatures lead to an increase in the Tsai – Wu criterion for both control and test samples. At the same time, the rate of the criterion for the test cooled samples remains almost at the level of control samples under standard conditions, which testifies to an increase in reliability of the limit state of carbon fiber-reinforced plastic structures after microwave exposure.

Keywords: *polymer composite materials, carbon fiber-reinforced plastics, extreme operating conditions, strength, complex loading, limit state, criteria, microwave electromagnetic field*

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в различных областях техники и строительства, что обусловлено особенностями их качественного, количественного состава и строения, а также большим разнообразием материалов, выполняющих роли связующего и наполнителя и вариативностью их сочетаний [1-5]. Прогнозируется расширенное применение ПКМ для объектов энергетики, строительства и транспортных систем, применяемых в районах Крайнего Севера [6-9]. Специфические климатические условия в указанных регионах (суточные и сезонные перепады температур, длительный период отрицательных температур) приводят к старению матрицы ПКМ и потере первоначальных прочностных характеристик материала [10, 11]. В этой связи представляется важной объективная оценка на стадии проектирования конструкций надежности ПКМ в предельном состоянии, вызванном сложными внешними факторами и различными схемами нагружения.

Надежность конструкций из ПКМ, находящихся в сложном напряженно-деформированном состоянии, определяется с использованием различных критериев: Цая – Ву, Цая – Хилла, Ямады – Суна, Хоффмана, Коуина, Ханкинсона, Норриса, Пака, Хашина, Кристенсена, LaRC, Кунце и другие [12-18].

Наиболее простыми из используемых в настоящее время являются критерии по максимальным предельным значениям напряжений или деформаций, возникающих в анализируемом слое ПКМ. Критерий максимальных напряжений описывает наступление разрушения при превышении одного из значений тензора напряжений соответствующего предела прочности.

Критерий максимальных деформаций описывает наступление разрушения, когда наибольшая компонента тензора деформаций превышает предельное значение [12]. Преимущества критериев по предельным значениям заключаются в простоте анализа прочности конструкции, практически полном отсутствии математических вычислений. К недостаткам относят низкую точность при сложной схеме нагружения, что связано с тем, что в данных критериях все виды разрушения считаются взаимно независимыми, и раз-

рушение конструкции наступает при простом достижении критического значения одной компоненты нагрузки.

Более точным является тип критериев разрушения, объединяющих все компоненты тензора напряжения или деформации в одно выражение. Широко применяют полиномиальное описание такой связи. Критерий Цая – Хилла основывается на обобщенной теории прочности Хилла для ортотропных пластичных материалов, адаптированной для композитов. Критерий Хоффмана является расширенным вариантом критерия Цая – Хилла и учитывает свойства при растяжении или сжатии в одном критерии. Наиболее универсальным считается критерий Цая – Ву в виде полинома второго порядка [12]. Этот критерий выражает связь свойств композиционного материала в направлениях 1 и 2 и определяется при испытании на двухосное нагружение, для которого получают предел прочности.

В отличие от полиномиальных, где все компоненты тензора напряжений образца рассматривались совместно в одном выражении, следующим вариантом анализа предельного состояния ПКМ были предложенные Хашином и Паком критерии, основанные на разделении разрушения по их виду в отдельные анализируемые выражения. Разрушения матрицы и волокон рассматриваются отдельно, также отдельно исследуется разрушение этих элементов при сжатии или растяжении.

Во всех критериях рассматривается разрушение отдельного слоя, обычно упрощенно принимаемое как разрушение всей конструкции. Критерии также дают возможность рассматривать прогрессирующее разрушение конструкции, ослабленной на один разрушенный слой. Данные критерии соответствуют структурно-феноменологическому подходу при решении задач прочности ПКМ.

Практическое использование большинства критериев в представлении приведенных источников является достаточно сложным для инженерной практики. Для оценки предельного состояния ПКМ, находящихся под воздействием отрицательных температур или градиентов температур, представляется целесообразным использование критерия Цая–Ву в модификации, предложенной в [19].

В результате критического анализа литературных источников, посвященных вопросам формирования микроструктуры ПКМ в процессе изготовления изделий из них, определены основные структурные и технологические параметры, оказывающие влияние на процесс их структурирования и определено, что с целью повышения прочности и надежности конструкций из ПКМ, особенно эксплуатируемых в экстремальных условиях, целесообразно применять модификацию ПКМ. Принципиально ее можно представить со структурной и технологической точек зрения. К структурной можно отнести изменения в составе матрицы путём дополнительного введения компонентов, выполняющих роль наполнителя – в настоящее время это направление представлено большим числом работ по введению наночастиц, различных по своей природе – шунгит, терморасширенный графит,

алмазный порошок, силаны и др. Модификация матриц выполняется путем смешивания полимеров, использования процесса сополимеризации, привитой блок-сополимеризации, процесса сшивания и введением функциональных групп в состав полимерной цепи. Среди технологических процессов модификации можно выделить использование физических методов, в том числе ультразвука, ультрафиолетового излучения и СВЧ электромагнитного поля [20, 21]. СВЧ технологии преимущественно применяются к неотвержденным системам ПКМ и выполняют функцию ускорения процесса отверждения, повышения адгезии, повышения степени равномерности наполнителя в объеме матрицы – для случаев с дисперсно-упрочненными композитами [22-27].

Результаты, полученные авторами статьи и рядом зарубежных исследователей, свидетельствуют о значимой эффективности воздействия СВЧ электромагнитного поля на отвержденные ПКМ [28-32], а также об улучшении технологических характеристик, в частности – обрабатываемости [33]. Однако оценка предельного состояния модифицированных композитов с учетом влияния экстремальных внешних факторов, а именно отрицательных температур, не проводилась.

Целью исследований является определение изменений в предельном состоянии ПКМ по критерию Цая – Ву на примере конструкционного углепластика общемашиностроительного назначения при отрицательных температурах с учетом модифицирующей финишной обработки в СВЧ электромагнитном поле.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использовали образцы углепластика производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга, в виде плоскопараллельных пластин размерами $70 \times 10 \times 5$ мм. Образцы разделяли на контрольную и опытную группы. СВЧ обработку одновременно по 5 образцов осуществляли на экспериментальном оборудовании, созданном на базе установки «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) с камерой лучевого типа с неограниченным объемом излучения в открытое пространство) при частоте 2450 МГц и плотности потока энергии $(17-18) \times 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут. На данных режимах обеспечивается при нормальных условиях максимальный упрочняющий эффект СВЧ воздействия [34-37]. После обработки обе группы образцов охлаждали до температуры -20°C при влажности 50 % в климатической камере. Для механических испытаний образцы извлекались по одному и подвергались испытаниям в течение времени, не превышающего 30 с, для сведения к минимуму влияния температуры в помещении, которая составляла $+22^\circ\text{C}$. Обе партии контрольных и опытных образцов испытывали по схеме трехточечного изгиба в соответствии с ГОСТ Р 56805-2015, межслоевого сдвига (ГОСТ 32659-2014) на специальной компьютерной установке с тензометрическими датчиками усилий с программным обеспечением LabView (ИП «Майоров», г. Орел) и на растяжение в соответствии с ГОСТ 32656-2017 на универсальной испытательной машине ИР 5082-100.

С использованием результатов указанных испытаний выполнена оценка предельного состояния образцов после нахождения под действием отрицательных температур по критерию Цая – Ву. При этом использована инженерная методика, дающая хороший отклик на реальные параметры испытаний, изложенная в [19]:

$$\left\{ \sigma_x^{km} / [\sigma_{ex}^{km}] \right\}^2 - \left\{ (\sigma_x^{km} \sigma_y^{km}) / [\sigma_{ex}^{km}]^2 \right\} + \left\{ \sigma_y^{km} / [\sigma_{ey}^{km}] \right\}^2 + \left\{ \tau_{xy}^{km} / [\tau_{exy}^{km}] \right\}^2 \leq 1, \quad (1)$$

где σ_x^{km} , σ_y^{km} , τ_{xy}^{km} – действующие при данной схеме нагружения напряжения растяжения (в продольном направлении), изгиба (в поперечном направлении), сдвига; $[\sigma_{ex}^{km}]$, $[\sigma_{ey}^{km}]$, $[\tau_{exy}^{km}]$ – предельные напряжения растяжения, изгиба, сдвига.

Для использованного в экспериментах углепластика с учетом числа слоев и направления укладки в каждом слое в образце толщиной 5 мм предельные напряжения, определенные по методике [19], равны: $[\sigma_{ex}^{km}] = 425$ МПа, $[\sigma_{ey}^{km}] = 303,5$ МПа, $[\tau_{exy}^{km}] = 133$ МПа.

Установлено, что отрицательные температуры приводят к снижению прочности контрольных образцов углепластика на 15,3 %. Для опытных образцов снижение составляет 9 %. С учетом этих данных предельные напряжения при расчете критерия Цая – Ву для контрольных и опытных образцов должны быть соответственно уменьшены.

Ранее нашими исследованиями установлено, что после воздействия на углепластик СВЧ электромагнитного поля в процессе испытаний получено увеличение предельных напряжений с коэффициентами: по оси x – $K_x = 1,05$ (растяжение); по оси y – $K_y = 1,28$ (изгиб); по межслоевому сдвигу $K_\tau = 1,15$.

Значения предельных напряжений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Предельные напряжения для контрольных и опытных образцов углепластика в зависимости от внешних условий

Вид образца	При стандартной температуре +(18-20)° С			При отрицательных температурах (-20° С)		
	$[\sigma_{ex}^{km}]$	$[\sigma_{ey}^{km}]$	$[\tau_{exy}^{km}]$	$[\sigma_{ex}^{km}]$	$[\sigma_{ey}^{km}]$	$[\tau_{exy}^{km}]$
Контрольный	425	303,5	133	360	257	112,6
Опытный	446,25	388,5	153	406,1	353,5	139,23

Для оценки предельного состояния углепластика принято, что в результате действия внешних нагрузок в контрольных и опытных образцах возникают напряжения, равные $\sigma_x^{km} = 180$ МПа, $\sigma_y^{km} = 125$ МПа и $\tau_{xy}^{km} = 90$ МПа.

Выполнен расчет критерия Цая для контрольных и опытных образцов в условиях нормальных и отрицательных температур. Согласно [12, 14], чем ближе значение критерия Цая – Ву к единице, тем более опасным является состояние конструкции, тем меньше

запас прочности и она ближе к предельному состоянию. Соответственно, уменьшение критерия будет указывать на повышение надежности конструкции (запаса прочности) по предельному состоянию.

С учетом полученных экспериментальных результатов и принятых условий нагружения будем иметь:

для контрольных образцов при стандартной температуре:

$$F1_{K1} = \{180 / 425\}^2 - \{(180 * 125) / 303,5^2\} + \{125 / 303,5\}^2 + \{90 / 133\}^2 = 0,179 - 0,244 + 0,17 + 0,458 = 0,563;$$

для контрольных образцов при отрицательных температурах:

$$F1_{K2} = \{180 / 360\}^2 - \{(180 * 125) / 257^2\} + \{125 / 257\}^2 + \{90 / 112,6\}^2 = 0,25 - 0,3406 + 0,236 + 0,639 = 0,785;$$

для опытных образцов при стандартной температуре:

$$F1_{O1} = \{180 / 446,25\}^2 - \{(180 * 125) / 388,5^2\} + \{125 / 388,5\}^2 + \{90 / 153\}^2 = 0,162 - 0,149 + 0,1 + 0,346 = 0,459;$$

для опытных образцов при отрицательных температурах:

$$F1_{O2} = \{180 / 406,1\}^2 - \{(180 * 125) / 353,5^2\} + \{125 / 353,5\}^2 + \{90 / 139,23\}^2 = 0,196 - 0,18 + 0,125 + 0,418 = 0,559.$$

Таким образом, результаты оценки предельного состояния контрольных и опытных образцов при нормальных и отрицательных температурах представлены диаграммой (рис. 1).

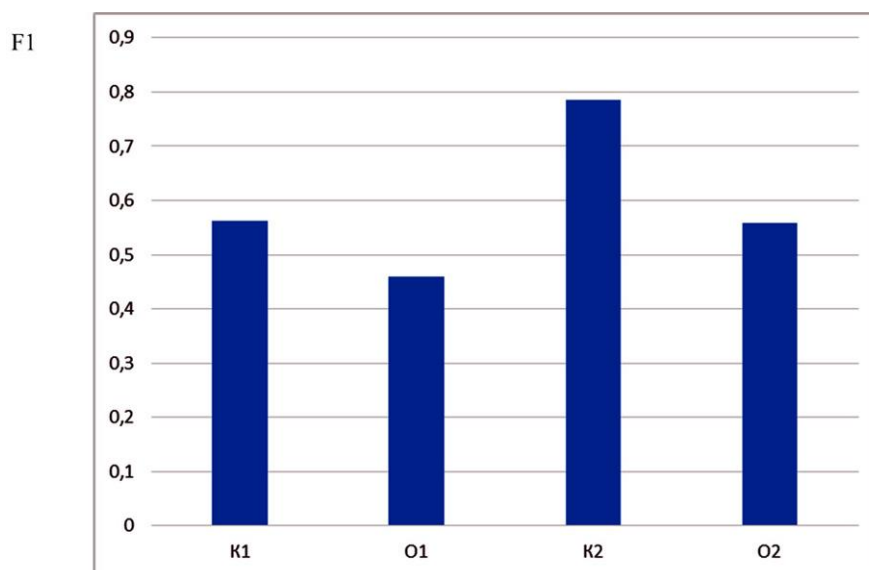


Рис. 1. Значение критерия Цая – Ву для контрольных (К) и опытных (О) образцов при нормальных (1) и отрицательных (2) температурах

Анализ диаграммы показывает снижение критерия Цая – Ву для опытных образцов относительно контрольных ПКМ при воздействии отрицательных температур на 29 %, в нормальных условиях – на 19 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что финишная обработка углепластика в СВЧ электромагнитном поле способствует практическому сохранению исходного предельного состояния данного материала при охлаждении до температур 20° С, на что указывает малозначащее увеличение критерия Цая – Ву на 1 %.

Подтверждена высокая эффективность СВЧ обработки по повышению предельного состояния ПКМ при отрицательных температурах порядка –20° С внешней среды, выраженная в значительном (на 29 %) снижении критерия Цая по сравнению с контрольными образцами. Отмеченное снижение критерия свидетельствует о повышении надежности в предельном состоянии конструкций из углепластика после СВЧ воздействия, что позволяет увеличить допускаемые эксплуатационные нагрузки или уменьшить расход относительно дорогостоящего материала, одновременно уменьшив вес изделия.

Повышение предельных прочностных характеристик ПКМ в условиях отрицательных температур позволит расширить область применения конструкций из них в изделиях, эксплуатируемых в районах Арктики и Антарктики.

Исследования выполнены в рамках проекта «СП-5946.2021.3 «Метод повышения функциональных характеристик элементов космических аппаратов из отвержденных полимерных композиционных материалов в условиях воздействия температурного градиента».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Армированные композиционные материалы строительного назначения / В.Н. Студенцов, В.А. Кузнецов, Н.В. Зубцова, И.В. Черемухина // Композиционные материалы в промышленности: материалы 29 Междунар. конф., Ялта, 1-5 июня 2009 г. Ялта-Киев: Украинский информационный центр, 2009. С. 357-359.

2. 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.

3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

4. Мировой рынок углеродного волокна. URL: <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-uglerodnogo-volokna/> (дата обращения: 01.02.2022 г.).

5. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.

6. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: в 3 т. Т. 1. Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий / Ю.В. Полежаев, С.В. Резник, Э.Б. Василевский и др.; под ред. С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 224 с.

7. Горынин И.В. Конструкционные материалы – важный элемент надежности и экологической безопасности инфраструктуры Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 82-87.

8. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения. Научно-технические проблемы освоения Арктики. М., 2015. С. 275-285.

9. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской Академии наук. 2017. Т. 87, № 9. С. 831-843.

10. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.

11. Brinkmann S. At al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. Ed. Hanser. 2006. 920 p.

12. Гриневич Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). С. 92-111.

13. Брытков Е.В., Санников В.А. Механика композиционных материалов: учеб. пособие. СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 74 с.

14. Муйземнек А.Ю., Карташова Е.Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов: учеб. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2017. 77 с.

15. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 375 с.

16. Скворцов Ю.В. Механика композиционных материалов: конспект лекций. Самара: Самар. гос. аэрокосмич. ун-т имени академика С.П. Королева, 2013. 94 с.

17. Ставров В.П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие для студентов специальностей «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов», «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов». Минск: БГТУ, 2008. 262 с.

18. Смердов А.А. Основы оптимального проектирования композитных конструкций: учеб. пособие по курсу «Проектирование композитных конструкций». Ч. I. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 88 с.

19. Акименко А.А. Инженерная методика проектирования авиационных конструкций из композиционных материалов (обобщение 20-летнего практического опыта), утверждённая начальником ОКБ Российской самолётостроительной корпорации «МиГ» Плясунковым С.А. 15.03.1997, 1997. 85 с.
20. Кулезнев В.С., Шершнев А.С. Химическая и физическая модификация полимеров. М.: Химия, 1990. 207 с.
21. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 188 с.
22. Microwave processing of materials / National Materials Advisory Board. Washington : National Academy Press, 1994. 150 p.
23. Thuery J. Microwave: industrial, scientific, and medical applications. Boston: Artech House Publishers, 1992. 475 p.
24. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
25. Комаров В.В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 57-63.
26. Электрофизическая модификация базальтовых нитей / Ю.А. Кадыкова, С.Г. Калганова, С.В. Арзамасцев и др. // Вопросы электротехнологии. 2019. № 2 (23). С. 101-105.
27. Захаров В.В. Математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств / В.В. Захаров, С.В. Тригорлый // Вопросы электротехнологии. 2020. № 3. С. 5-12.
28. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of 'green' composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajraia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // Akademeia (2011) 1(1): ea0101. pp. 1-6.
29. Teawon Kim Microwave heating of carbon-based solid materials / Teawon Kim, Jaegeun Lee, Kun-Hong Lee // Carbon Letters. 2014. Vol. 15. № 1. pp. 15-24.
30. Bradshaw S.M., van Wyk E.J., de Swardt J.B. Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 1998. July/August. pp. 201-210.
31. Museok Kwak Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation // Imperial College London Department of Aeronautics.

A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. 2016. 150 P.

32. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструкционных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

33. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Повышение производительности и качества механической обработки изделий из полимерных композиционных материалов путем СВЧ модифицирования // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 1 (88). С. 93-104.

34. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Teterin D.P. Strengthening microwave modification of structural elements of composite materials reinforced with synthetic fibers // Journal of Physics: Conference Series 1050 (2018) 012108. doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012108.

35. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Muldasheva G. Studies of Microwave Electromagnetic Field Influence on Adhesion Strength of the «Matrix-Fiber» Contact Zone on the Example of the Elementary Cell of a Certified Polymeric Composite Material // Materials Science Forum Vol. 992. Studies of Microwave Electromagnetic Field, 2020. P 317-324, doi.org /10.4028/.

36. Zlobina I.V. The effect of processing in a SHF electromagnetic field on the parameters of vibro-wave processes generated by the impact of a solid body in cured polymer composite materials under influence of climate factors // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 42045.

37. Злобина И.В., Кацуба И.С., Бекренев Н.В. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на изменение изгибной прочности конструкционных элементов из отвержденных углепластиков под действием факторов внешней среды // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2020. № 3 (238). С. 20-22.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

Irina V. Zlobina –
PhD (Technical Sciences),
Associate Professor,
Department of Technical Mechanics
and Mechatronics, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 24.03.2022, принята к опубликованию 16.05.2022

**И.Н. Ганиев, Л.З. Алиева, А.Э. Бердиев,
С.Дж. Алихонова, У.Ш. Якубов**

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЛИТИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ
ЦИНКОВОГО СПЛАВА ЦАМС_v4-1-2,5**

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния добавок лития на теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи и термодинамические функции цинкового сплава ЦАМС_v4-1-2,5. Исследования проведены в режиме «охлаждения» в интервале 325 К – 450 К. Показано, что литий уменьшает теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию исходного сплава, а значения энергии Гиббса при этом растёт. От температуры установлен рост теплофизических свойств сплавов и их термодинамических функций, за исключением энергии Гиббса.

Ключевые слова: цинковый сплав ЦАМС_v4-1-2,5, литий, режим «охлаждения», теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, термодинамические функции

**I.N. Ganiev, L.Z. Aliyeva, A.E. Berdyev,
S.J. Alikhanov, U.S. Yakubov**

**EFFECTS OF LITHIUM ADDITIVES ON THERMAL
PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS
OF THE ZINC ALLOY TsAMS_v4-1-2.5**

Abstract. The article presents the research results relating the effect of lithium additives on the heat capacity, heat transfer coefficient and thermodynamic functions of the zinc alloy TsAMS_v4-1-2.5. The investigation was carried out in the «cooling» mode within the interval of 325 K – 450 K. It is shown that lithium reduces the heat capacity, heat transfer coefficient, enthalpy, and entropy of the initial alloy, while the value of the Gibbs energy increases. It has been established that an increase in thermophysical properties of alloys and their thermodynamic functions, except for the Gibbs energy, depend on the temperature parameters.

Keywords: the zinc alloy TsAMS_v4-1-2.5, lithium, «cooling» mode, heat capacity, heat transfer coefficient, thermodynamic functions

ВВЕДЕНИЕ

Производство цинка если в начале XIX в. не превышало 900 т в год, то в настоящее время составляет около 6 млн т в год. Цинк занимает особое место среди металлов, применяемых в промышленности. Как конструкционный материал нелегированный цинк не нашел широкого применения, так как обладает недостаточно благоприятным комплексом механических, физических и технологических свойств. Однако дополнительное легирование цинка различными элементами существенно повышает вышеуказанные свойства и характеристики. Поэтому значительная часть цинка (до 20 %) идет на приготовление цинковых сплавов, в которых основными легирующими компонентами являются алюминий и медь. Широко используется цинк и для производства медных сплавов (латуни) [1, 2].

В зависимости от марки цинк используют для цинкования стали, получения цинковых сплавов, изготовления цинковых полуфабрикатов, а также для получения цинковых соединений [3, 4].

Примерно 30 % цинкового проката составляют цинковые листы общего назначения, которые подразделяются по толщине на четыре группы: 0,15-0,4 мм; 0,5-0,9 мм; 1,0-1,2 мм; 1,5 мм и более. Цинковые листы используют при изготовлении химических источников тока, оцинкованной посуды и др. Из цинковых листов изготавливают печатные формы к ротационным машинам в полиграфической промышленности [5-7].

В работах [7, 8] отмечается, что использование цинк-алюминиевых сплавов в производстве более выгодно экономически, чем алюминиевых сплавов и латуней. Указанные сплавы, имея высокую твердость, нашли широкое применение для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа. Расширение номенклатуры цинковых изделий выдвигает новые требования к их тепловым и теплофизическим свойствам.

Сплав ЦАМ4-1 является литейным и в основном используется для производства отливок, получаемых литьём под давлением, реже – в кокиле и песчаные формы. Из этих сплавов можно получить очень точные по размерам со сложными очертаниями контуров отливки со стенкой толщиной порядка 0,6 мм.

Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния добавок лития на теплоемкость и термодинамические функции цинкового сплава ЦАМ4-1 изготовленного на основе цинка марки ЦЗ, содержащего до 2,5 мас.% свинца. Поэтому аббревиатура данного сплава ЦАМ4-1 была изменена на ЦАМСв4-1-2,5.

ТЕОРИЯ МЕТОДА И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Сплав ЦАМСв4-1-2,5 с литием получали в шахтной лабораторной печи сопротивления типа СШОЛ (сопротивление шахтное опытное лабораторное) из цинка марки ЦЗ

(ГОСТ 19424-97), алюминия марки А7 (ГОСТ 11069-2001) и лития металлического (ГОСТ 87745-75) при температуре 750-800° С. Состав полученных сплавов, которые содержали 0,05-1,0 мас.% литий контролировалось взвешиванием шихты и полученных сплавов. При отклонении веса сплавов более чем на 1-2% отн. синтез сплавов проводился заново. Из полученных таким образом расплавов в металлический кокиль отливались цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм.

Существует много методов измерения теплоемкости твердого тела. В данной работе используется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образца. Измеряемый образец, нагретый до температуры, превышающей температуру окружающей среды, будет охлаждаться. Скорость охлаждения зависит от теплоемкости материала образца. Сравнивая кривые охлаждения – термограммы (зависимости температуры от времени) двух образцов, один из которых служит эталоном с известной теплоемкостью, можно определить теплоемкость другого [9].

Этот метод предполагает: 1) постоянство c_x и $c_э$, а также коэффициента α при изменении температуры; 2) охлаждение в бесконечной среде и 3) температуры образцов, при которых излучением можно пренебречь по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Несоблюдение любого из данных условий нарушает экспоненциальный ход кривой охлаждения.

Таким образом, если выполняются все указанные выше условия, то теплоемкость материала образца можно определить из измеренного по термограмме параметру релаксации τ . Однако, поскольку величина α не известна, измерения нужно вести параллельно с эталонным образцом с известной теплоемкостью и тех же размеров, чтобы условия охлаждения у них были идентичны. Если коэффициент α у них одинаков, то теплоемкость измеряемого материала c_x можно найти по формуле

$$C_x^0 = C_э^0 \frac{m_э \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_э}{m_x \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_x}, \quad (1)$$

где $C_э^0$ – теплоемкость эталонного материала, m_x и $m_э$ – массы исследуемого и эталонного образцов, τ_x и $\tau_э$ – измеренное время тепловой релаксации для исследуемого образца и эталона, которые равны $\tau_э = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1$ и $\tau_x = \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$.

Разумеется, учет зависимости c_x и $c_э$ от температуры можно выполнить, разбив термограмму на узкие интервалы температур, в которых теплоемкости и коэффициент α можно считать постоянными, и найдя для каждого интервала свои параметры тепловой релаксации $\tau_x(T)$ и $\tau_э(T)$, которые используются для расчета $c_x(T)$.

В данной работе определяются средние теплоемкости по всему измеряемому интервалу температур. Коэффициенты теплопередачи α для всех образцов предполагаются одинаковыми. Для определения скорости охлаждения τ_y и τ_x строят кривые охлаждения эталона и исследуемых образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе.

Измерение теплоемкости проводилось по методике описанной в работах [10-16] на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих узлов: электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения).

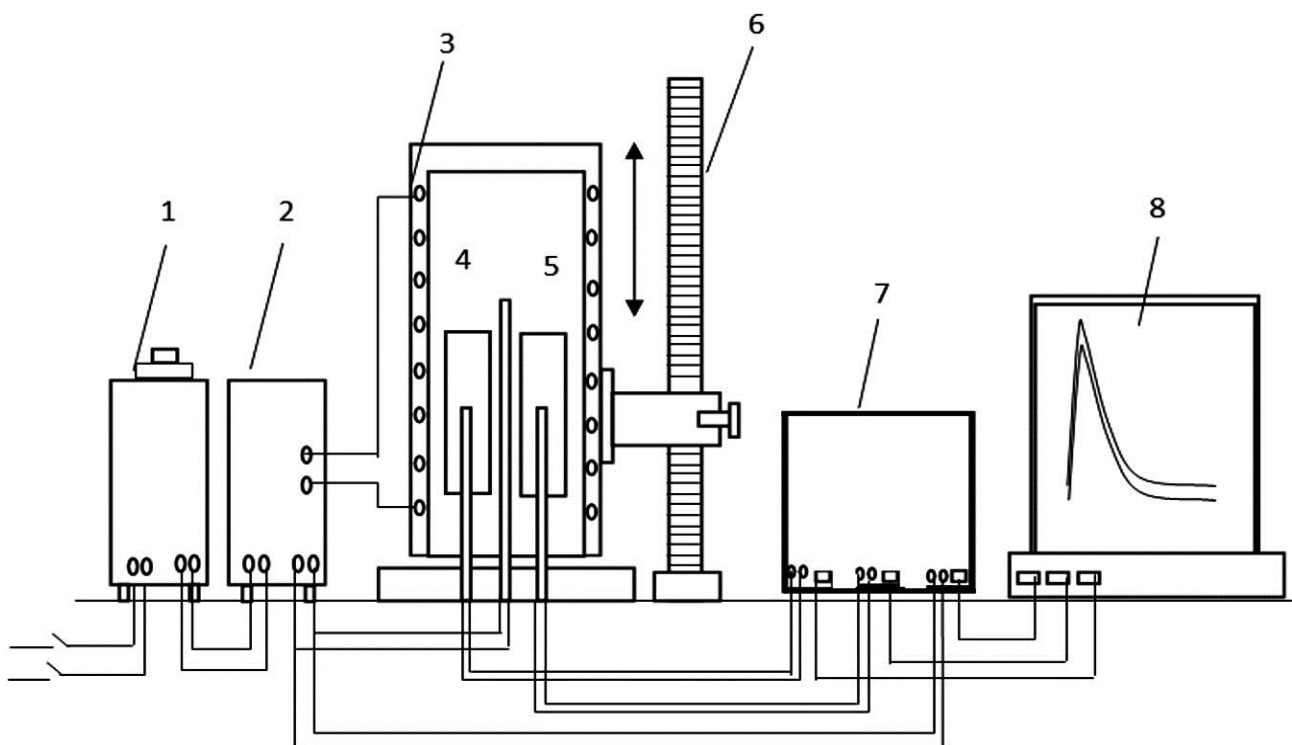


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»

Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термопары. Концы термопар подведены к цифровому многоканальному термометру 7, который подсоединен к компьютеру 8. Включаем электропечь через автотрансформатор 1, установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифрового многоканального термометра отмечаем значение начальной температуры.

Вдвигаем измеряемый образец и эталон в электропечь и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифрового многоканального тер-

мометра на компьютере. Далее измеряемый образец и эталон одновременно выдвигаем из электропечи. С этого момента фиксируем снижение температуры. Записываем показания цифрового термометра на компьютере через фиксированное время (10 с). Охлаждаем образец и эталон ниже 30° С.

Теплоёмкость цинкового сплава ЦАМСв4-1,2,5 с литием измеряли в режиме «охлаждения». Обработка результатов измерений и построение графиков производилось с помощью программ MS Excel и Sigma Plot. Значения коэффициента корреляции составлял величину $R_{\text{корр}} \geq 0,99$, подтверждая правильность выбора аппроксимирующей функции. Относительная погрешность измерения температуры в интервале от 40° С до 400° С составляла $\pm 1 \%$, а в интервале более 400° С $\pm 2,5 \%$. Погрешность измерения теплоёмкости по предлагаемой методике не превышает 4 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из цинкового сплава ЦАМСв4-1,2,5 с литием представлены на рис. 2а и описываются уравнением вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (2)$$

где a, b, p, k – постоянные для данного образца, τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (2) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов сплавов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (3)$$

Из экспериментально полученных зависимостей температуры образцов от времени (рис. 2а) и скорости охлаждения образцов из сплавов (рис. 2б), которые описываются полиномами (2) и (3), определяли их коэффициенты, проведя компьютерную обработку. Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (3) для исследованных сплавов приведены в табл. 1.

Далее по рассчитанным значениям величин скорости охлаждения сплавов по уравнению (1) была вычислена удельная теплоёмкость цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 с литием. Результаты расчёта показывают, что температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К)) цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием, и эталона (Al марки А5N) описывается уравнением типа

$$C_{p_0}^0 = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (4)$$

Значение коэффициентов в полиноме (4) получены обработкой результатов их расчёта по программе Sigma Plot и приведены в табл. 2.

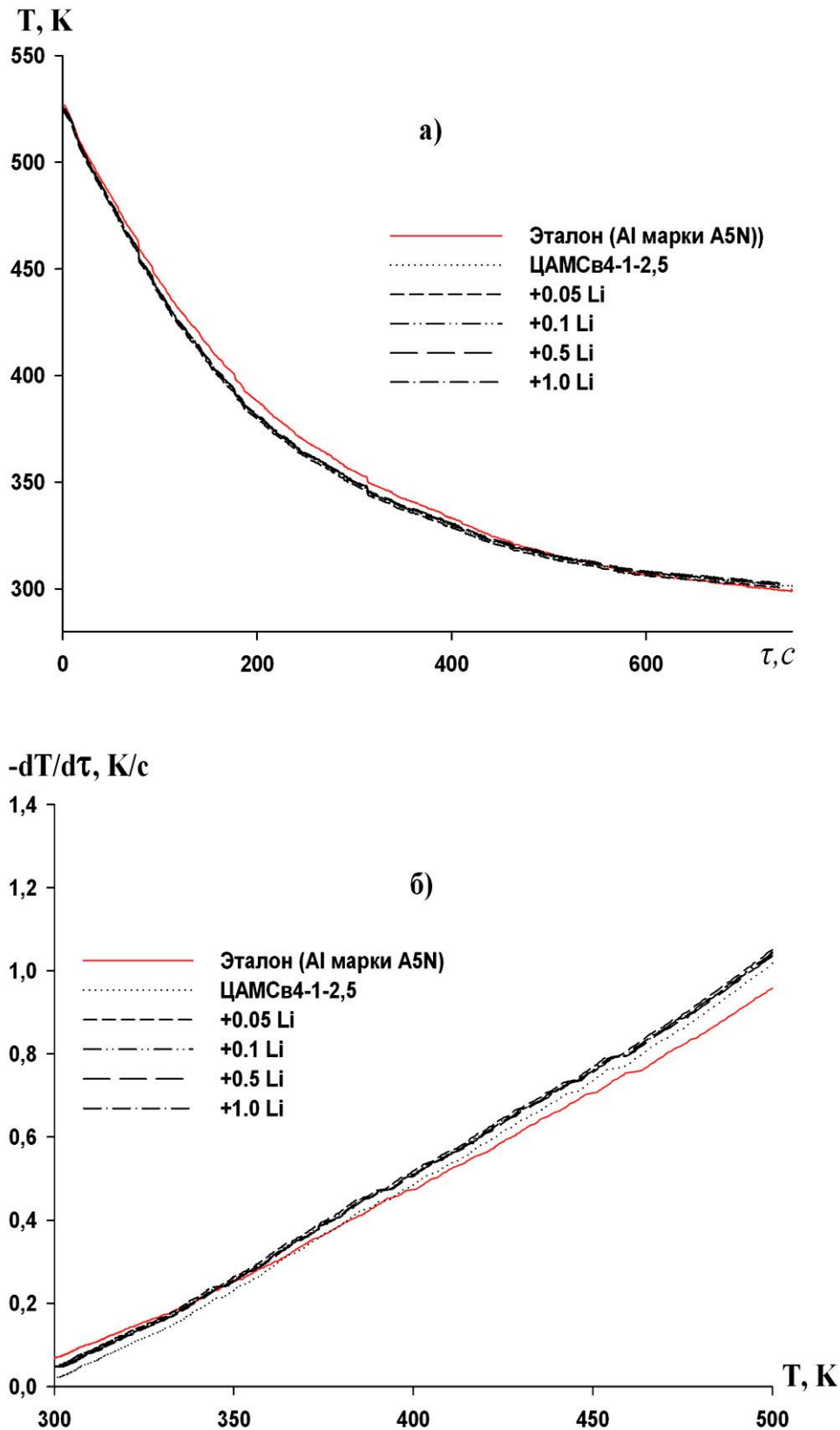


Рис. 2. График зависимости температуры образцов от времени охлаждения (а) и температурная зависимость скорости охлаждения образцов (б) из цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием и эталона (Al марки A5N)

Таблица 1

Значения коэффициентов в уравнении (3) для цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием и эталона (Al марки А5N)

Содержание лития в сплаве, мас. %	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-4}, c^{-1}$	ab, Kc^{-1}	$pk \cdot 10^{-2}, Kc^{-1}$
0,0	213,82	5,47	316,83	0,953	1,17	3,02
0,05	213,82	5,47	315,83	0,956	1,17	3,02
0,1	213,82	5,47	316,93	0,952	1,17	3,02
0,5	213,82	5,46	317,83	0,949	1,17	3,02
1,0	213,82	5,47	317,33	0,951	1,17	3,02
Эталон	206,29	5,14	331,07	1,466	1,06	4,85

Результаты расчёта температурной зависимости теплоемкости сплавов по формулам (1) и (4) через 50 К представлены на рис. 3а и в табл. 3.

Из таблицы видно, что теплоемкость сплавов от температуры и от содержания лития увеличивается.

Таблица 2

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (4) цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием и эталона (Al марки А5N)

Содержание лития в сплаве, мас. %	$a, Дж/(кг \cdot K)$	$b, Дж/(кг \cdot K^2)$	$c, Дж/(кг \cdot K^3)$	$d, Дж/(кг \cdot K^4)$	Коэффициент корреляции R
0,0	-1684,38	13,45	-0,03	0,00	0,99
0,05	-2358,07	18,01	-0,04	0,00	0,99
0,1	-2437,60	18,55	-0,04	0,00	0,99
0,5	-2519,98	19,14	-0,04	0,00	0,99
1,0	-2467,61	18,75	-0,04	0,00	0,99
Эталон	693,77	0,99	-0,00	0,00	1,00

Таблица 3

Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К)) цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием и эталона (Al марки А5N)

Содержание лития в сплаве, мас. %	Т.К				
	300	350	400	450	500
0,0	240,92	293,70	316,29	326,07	340,46
0,05	250,06	326,52	361,04	376,25	394,82
0,1	255,47	335,94	373,16	390,38	410,85
0,5	257,38	339,39	376,37	392,25	410,96
1,0	259,18	341,68	380,51	399,14	421,04
Эталон	903,82	927,44	949,56	970,83	991,92

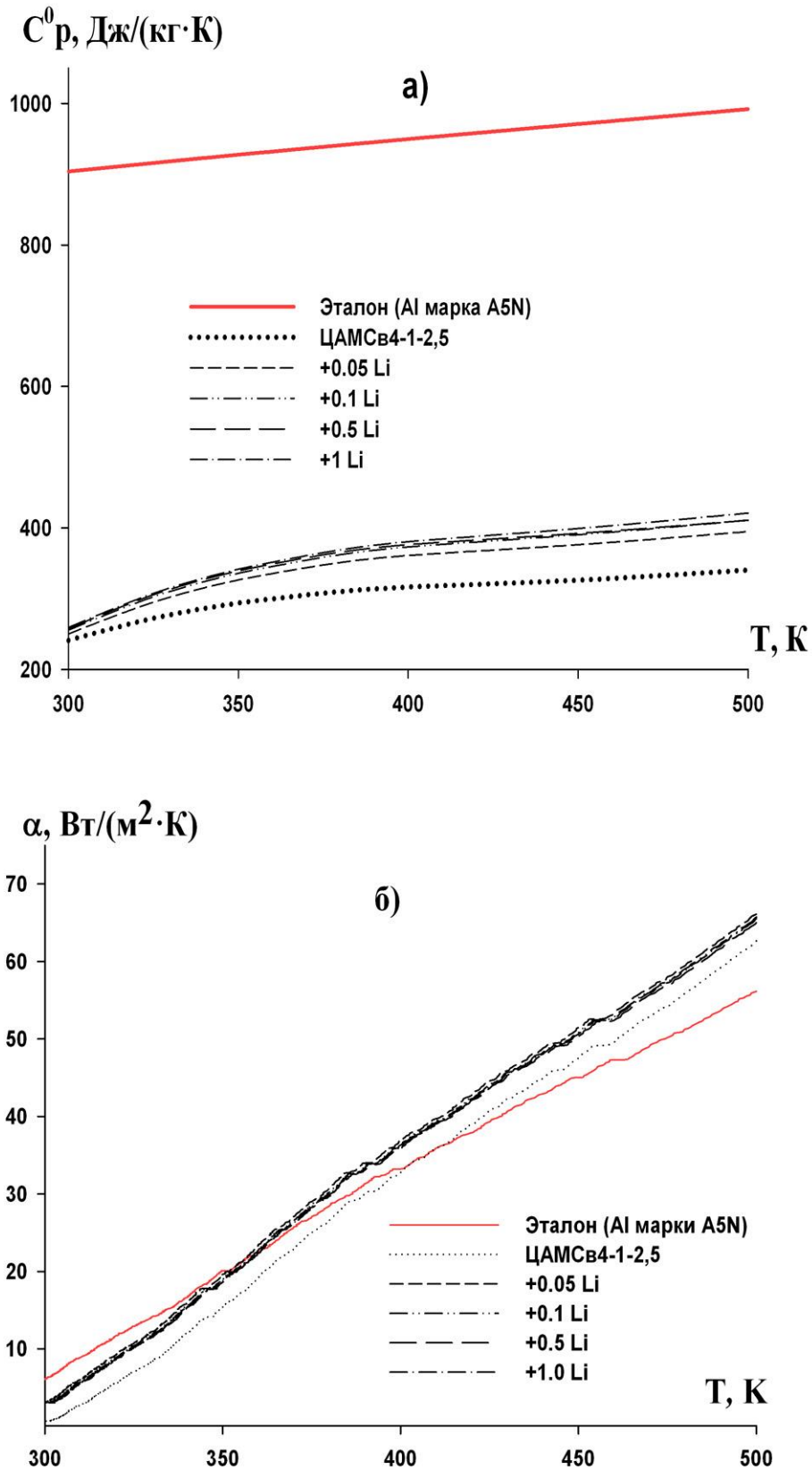


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К)) (а) и коэффициента теплоотдачи (б) цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием и эталона (Al марки А5N)

Используя вычисленные данные по теплоемкости цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 с литием и экспериментально полученные величины скорости охлаждения образцов, нами был рассчитан коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ (Вт/(К·м²)) для сплавов и эталона (Al марки А5N) по следующей формуле:

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S} \quad (5)$$

Для цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием температурная зависимость коэффициента теплоотдачи имеет вид (рис. 3б).

Для расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса сплавов по (6)-(8) были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (4):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (6)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (7)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (8)$$

где $T_0 = 298,15\text{K}$.

Результаты расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по уравнениям (6)-(8) через 50 К представлены в табл. 4.

Таблица 4

Температурная зависимость изменений термодинамических функции цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, легированного литием и эталона (Al марки А5N)

Содержание лития в сплаве, мас.%	Т, К				
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов				
	300	350	400	450	500
0,0	0,44	13,97	29,31	45,39	61,99
0,1	0,47	15,48	33,34	52,46	72,43
0,5	0,47	15,63	33,66	52,91	72,93
1,0	0,47	15,73	33,91	53,44	73,88
Эталон	1,58	44,35	86,64	127,90	167,56
	$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К) для сплавов				
0,0	0,00	0,04	0,08	0,12	0,16
0,1	0,00	0,05	0,09	0,14	0,18
0,5	0,00	0,05	0,10	0,14	0,18
1,0	0,00	0,05	0,10	0,14	0,19
Эталон	0,01	0,15	0,27	0,38	0,49

Содержание лития в сплаве, мас. %	Т, К				
	$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг для сплавов				
	300	350	400	450	500
0,0	-0,00	-1,11	-4,30	-9,46	-16,44
0,1	-0,00	-1,21	-4,80	-10,70	-18,78
0,5	-0,00	-1,22	-4,84	-10,80	-18,94
1,0	-0,00	-1,23	-4,87	-10,88	-19,11
Эталон	-0,09	-6,99	22,16	-45,39	-76,67

$T_0 = 298,15 \text{ K}$

ВЫВОДЫ

1. В режиме «охлаждения» по известной теплоёмкости эталонного образца из алюминия марки А5N установлена температурная зависимость теплоёмкости цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 с литием.

2. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) цинкового сплава ЦАМСв4-1,2,5 с литием в интервале температур 300-500 К.

3. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры и содержания лития теплоёмкость, энтальпия и энтропия цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5 увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается.

4. Установленные значения теплоемкости, коэффициента теплоотдачи и термодинамические функции цинкового сплава ЦАМСв4-1-2,5, содержащего литий, от температуры, пополняют страницы соответствующих справочников.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kiliñçeker G., Galip H. The influences of glucose on corrosion behaviour of copper in chloride solution // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2009. V. 45. № 2. P. 232-240.

2. Кечин В.А., Люблинский Е.Я. Цинковые сплавы. М.: Metallurgy, 1986. 247 с.

3. Muller C., Sarret M., Benballa M. Some Peculiarities in the Codeposition of Zinc-Nickel Alloys // Electrochim. Acta. 2001. № 46 (18). P. 2811-2817.

4. Алиев Дж.Н., Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Цинк-алюминиевые защитные покрытия нового поколения. Физико-химические свойства цинк-алюминиевых сплавов с щелочноземельными металлами. Германия: Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 129 с.

5. Rajappa S.K., Venkatesha T.V., Praveen B.M. Chemical treatment of zinc surface and its corrosion inhibition studies // Bulletin of Materials Science. 2008. V. 31. № 1. P. 37-41.

6. Conceição A.M. Dutra, Eduardo N.C., Roberto Z.N. Electrochemical Behavior and Corrosion Study of Electrodeposits of Zn and Zn-Fe-Co on Steel // Materials Sciences and Applications. 2012. V. 3. № 6. P. 348-354.

7. Myeong H.L., Yeon W.K., Kyung M.L., Seung H.L., Kyung M.M. Electrochemical evaluation of zinc and magnesium alloy coatings deposited on electrogalvanized steel by PVD // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2013. № 23. P. 876-880.

8. Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Физикохимия цинк-алюминиевых сплавов с редкоземельными металлами. – Душанбе: Андалеб Р, 2015. 334 с.

9. Булкин П.С., Попова И.И. Общий физический практикум. Молекулярная физика». М.: Изд-во МГУ, 1988. 215 с.

10. Ганиев И.Н., Абдухоликова П.Н., Бердиев А.Э., Алихонова С.Дж., Сафаров А.М. Влияние добавок индия на теплофизические свойства и термодинамические функции цинкового сплава ЦАМ4-1 // Металлы. 2021. № 2. С. 58-64.

11. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Отаджонов С.Э., Эшов Б.Б., Якубов У.Ш. Влияние меди на теплоемкость и изменений термодинамических функции свинца // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 1. С. 55-61.

12. Влияние щелочноземельных металлов на теплоёмкость и изменение термодинамических функция сплава АК1М2 на основе осочистого алюминия / И.Н. Ганиев, С.Э. Отаджонов, М. Мухамаджон, М.М. Махмадизода, В.Д. Абулхаев // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. № 3. Т. 23. С. 222-228.

13. Температурная зависимость теплоёмкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава ССу3 с калием / И.Н. Ганиев, Ш.Ш. Окилов, Б.Б. Эшов, Н.М. Муллоева, У.Ш. Якубов // Вестник Казанского государственного технического университета им А.Н. Туполева. 2021. № 1. С. 22-26.

14. Влияние добавок натрия на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава ССу3 / И.Н. Ганиев, Ш.Ш. Окилов, Б.Б. Эшов, Н.М. Муллоева, У.Ш. Якубов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Сер. 1. Естественные и технические науки. 2021. № 1. С. 89-94.

15. Температурная зависимость теплофизических свойств и термодинамических функций сплавов системы Al-Sn / И.Н. Ганиев, А.Г. Сафаров, М.Дж. Асоев, У.Ш. Якубов, К. Кабутов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021. № 1 (35). С. 35-41.

16. Влияние добавок меди на теплоемкость и термодинамические функции алюминия марки А7 / И.Н. Ганиев, А.Р. Рашидов, Х.О. Одиназода, А.Г. Сафаров, Дж.Х. Джайлоев // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2020. № 3. С. 4-12.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ганиев Изатулло Наврузович –

академик НАН Таджикистана,
доктор химических наук, профессор,
Российско-Таджикский (Славянский) Университет,
Душанбе, Таджикистан

Izatullo N. Ganiev –

Academician of the National Academy
of Sciences of Tajikistan, Dr. Sci.
(Chemistry), Professor, Russian-Tajik
(Slavonic) University, Dushanbe,
Tajikistan

Алиева Лола Зухурбековна –

заведующий лабораторией,
Российско-Таджикский (Славянский)
Университет, Душанбе, Таджикистан

Lola Z. Alieva –

Head of Laboratory, Russian-Tajik
(Slavonic) University, Dushanbe,
Tajikistan

Бердиев Асадкул Эгамович –

доктор технических наук, доцент,
Российско-Таджикский (Славянский)
Университет, Душанбе, Таджикистан

Asadkul E. Berdiev –

Dr. Sci. Tech., Associate Professor,
Russian-Tajik (Slavonic) University,
Dushanbe, Tajikistan

Алихонова Сурайё Джамшедовна –

кандидат химических наук, старший
преподаватель, Российско-Таджикский
(Славянский) университет, Душанбе,
Таджикистан

Surayo Ja. Alikhonova –

PhD (Chemistry), Senior Lecturer,
Russian-Tajik (Slavonic)
University, Dushanbe,
Tajikistan

Якубов Умарали Шералиевич –

доктор PhD, старший научный сотрудник,
Институт химии им. В.И. Никитина НАН
Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Umarali Sh. Yakubov –

Dr. Sci., Senior Research Fellow,
Russian-Tajik (Slavonic) University,
Dushanbe, Tajikistan

Статья поступила в редакцию 25.05.2022, принята к опубликованию 06.06.2022

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НАГРЕВА
УГЛЕ- И СТЕКЛОПЛАСТИКА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ИХ КОМПОНЕНТОВ**

Аннотация. В статье изложены результаты исследований изменения теплофизических свойств отвержденных угле- и стеклопластиков после воздействия на них СВЧ электромагнитного поля. Показано, что СВЧ обработка на рациональных режимах углепластиков способствует значимому (соответственно на 27 %, 20 % и 18,6 %) повышению скорости нагрева, коэффициента температуропроводности и теплопроводности. Изменение аналогичных параметров для стеклопластика менее выражено. Установлен важный для эксплуатации данных материалов в условиях температурных градиентов факт повышения равномерности теплового поля: для углепластика различие значений температур в разных областях нагреваемой поверхности не превышает (3-5)° С, стеклопластика – (8-10)° С.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, теплопроводность, температуропроводность, кинетика нагрева, СВЧ электромагнитное поле

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

**INVESTIGATION INTO KINETICS OF CARBON
AND FIBERGLASS HEATING WITH ACCOUNT FOR EFFECTS
OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD
ON THE TEMPERATURE OF THEIR COMPONENTS**

Abstract. The article presents the research results of the changes in the thermal properties of cured carbon and fiberglass plastics after exposure to the microwave electromagnetic field. It is shown that the microwave treatment effect at the rational modes of carbon fiber-reinforced plastic promotes a significant increase in the heating rate, the coefficient of thermal conductivity, and thermal conductivity (by 27 %, 20 %, and 18,6 %, respectively). A change in the similar parameters for fiberglass plastic is less evident. The fact of increasing uniformity of the thermal field, which is important for operation of these materials under the temperature gradients, has been established:

for carbon fiber-reinforced plastic the difference in temperature values in different areas of the heated surface does not exceed 3-5° C, and for fiberglass plastic it does not exceed 8-10° C.

Keywords: *polymer composite materials, thermal conductivity, thermal diffusivity, heating kinetics, microwave electromagnetic field*

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) имеют широкий спектр применения, обусловленный особенностями их качественного, количественного состава и строения, что становится возможным благодаря большому разнообразию материалов, выполняющих роли матрицы и наполнителя, а также вариативности их сочетаний и соотношения основных компонентов. В связи с этим на протяжении последних десятилетий композиционные материалы все активнее проникают в такие стратегически важные отрасли как авиационная и космическая, а также энергетика и строительство. Эта тенденция сохранится и в перспективе [1-5]. Для входящих в состав конструктивных элементов транспортных и энергетических систем, а также транспортной инфраструктуры и строительных объектов ПКМ характерно длительное нахождение под действием факторов внешней среды, среди которых наряду с влажностью и эрозионным воздействием важное значение имеют сезонные и суточные перепады температур.

Для изделий, эксплуатируемых в космическом пространстве, важное значение имеет стойкость материалов к значительным температурным градиентам (между освещенной солнечными лучами и теневой сторонами объекта и при переходе с освещенной в теневую зону при движении по околоземной орбите), действию ударных нагрузок (микрометеориты и космический мусор) и ионизирующих излучений. То есть определяющими требованиями для материалов указанных категорий объектов являются высокая теплопроводность, термостабильность, стойкость к динамическим нагрузкам, эрозионная стойкость. За последние 20 лет в аэрокосмической технике объем применения композиционных материалов увеличился более, чем в два раза, и данная тенденция продолжает сохраняться.

Существующие долговременные отечественные и международные программы развития исследований и освоения ближнего и дальнего космоса, в частности – создание долговременных орбитальных станций, находящихся на геостационарных орбитах систем радио- и телекоммуникации, освоение Луны предполагают разработку надежных конструкций из материалов, обладающих повышенными характеристиками, в том числе – ПКМ [6-10].

В настоящее время и в перспективе прогнозируется расширенное применение ПКМ для объектов энергетики, строительства и транспортных систем, применяемых при освоении районов Крайнего Севера, и Арктического шельфа, что является одной из приоритетных задач обеспечения экономической и военной безопасности России. Характер-

ные для указанных регионов ветровые нагрузки в сочетании с сезонными и суточными колебаниями температур и влажности, длительным действием солнечной радиации в период «полярного дня» приводят к старению матрицы ПКМ и потере первоначальных прочностных характеристик материала [11-13].

Обобщая, можно сделать вывод, что воздействие изменяющейся температуры внешней среды является общим фактором для объектов, применяющихся в космическом пространстве и в районах Арктики и Антарктики, влияние которого на работоспособность и долговечность конструкций из ПКМ требует глубокого изучения.

Одной из характерных черт ПКМ является выраженная анизотропия свойств, которая находится в тесной взаимосвязи со структурными особенностями таких материалов и касается как механических, так и теплофизических характеристик, которые в определенном диапазоне температур, определяемом, как правило, свойствами матрицы, находятся в тесной взаимосвязи и имеют большое значение для сохранения целостности конструкции летательных аппаратов различного назначения и других технических систем, условия эксплуатации которых сопряжены с температурными градиентами или сезонными и суточными колебаниями температур в широких пределах значений [14, 15].

В результате критического анализа литературных источников, посвященных вопросам формирования микроструктуры полимерных композиционных материалов (ПКМ) в процессе изготовления изделий из них определены основные структурные и технологические параметры, оказывающие влияние на процесс структурирования ПКМ.

Структурные параметры находятся в тесной взаимосвязи с критериями, лежащими в основе классификации ПКМ и включают классификацию по природе компонентов – обычно материала матрицы (металлические, полимерные, жидкокристаллические, керамические, другие неорганические материалы), структурную классификацию композитов на макроуровне (каркасные, матричные, слоистые и комбинированные), в зависимости от геометрии армирующих компонентов (порошковые, гранулированные, волокнистые с непрерывными и дискретными волокнами, слоистые), в зависимости от расположения компонентов – изотропные или квазиизотропные, анизотропные [14, 15].

В качестве технологических факторов на структурообразование оказывают влияние технология получения отдельных компонентов ПКМ и материала целом. Среди технологий, которые используются для получения композитов, можно выделить следующие: прессование, литье под давлением, намотка, вакуумная инфузия.

Также внимание уделяется и модификации ПКМ. Принципиально ее можно представить со структурной и технологической точек зрения. К структурной отнесем изменения в составе матрицы и дополнительное введение компонентов, выполняющих роль наполнителя; в настоящее время это направление представлено большим числом работ по введению наночастиц, различных по своей природе шунгит, терморасширенный графит, алмазный по-

рошок, силаны и др. Модификация матриц выполняется путем смешивания полимеров, использования процесса сополимеризации, привитой блок – сополимеризации, процесса сшивания и введением функциональных групп в состав полимерной цепи.

Среди технологических процессов модификации можно выделить использование физических методов, в том числе – ультразвука, волновых процессов и СВЧ электромагнитного поля. Преимущественно перечисленные технологии применяются к неотвержденным системам ПКМ и выполняют функцию ускорения процесса отверждения, повышения адгезии, повышения степени равномерности наполнителя в объеме матрицы – для случаев с дисперсноупрочненными композитами [16-27].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теплофизические характеристики контрольных и опытных образцов ПКМ изучали с использованием модернизированного метода Паркера [36, 37] при помощи экспериментальной установки на базе светильника FL(ИО) 1000 IP54 ИЭК LPI01-1-1000-K01 мощностью 1000 Вт с металлическим экраном, имеющим щелевое продольное отверстие размерами 80 x 10 мм, тепловизора FLIR E40 и цифрового пирометра Testo 830-T1. Тепловизором записывали текущие термограммы изменения температуры контрольных и опытных образцов в процессе лучистого нагрева в течение 10 минут излучением светильника, пирометр использовали для калибровки тепловизора и уточнения значений температуры в контрольных точках. Образцы разделяли на контрольную и опытную партии по 5 образцов. В качестве опытных образцов использовали обработанные в СВЧ электромагнитном поле на установке, созданной на базе рупорного излучателя «Жук-2-02» производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск, Калужской обл.) при плотности потока энергии (ППЭ), равной $(17-18) \times 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут. На данных режимах согласно нашим исследованиям [28-35] обеспечивается максимальный эффект по повышению прочностных характеристик образцов из углепластика. Исследовали кинетику нагрева образцов, теплопроводность и температуропроводность. Последние два параметра вычисляли по приведенным в [36, 37] зависимостям.

Установлено, что кинетика нагрева как контрольных, так и опытных образцов угле- и стеклопластика с достаточной точностью аппроксимируется линейными функциями (табл. 1, рис. 1-3).

Таблица 1

Функциональные зависимости изменения температуры (y) контрольных и опытных образцов эпоксидного компаунда, стекло- и углепластика от времени нагрева (x)

Материал	Контрольный	Опытный
Компаунд ЭД-20	$y = 12,733x + 23,644$	$y = 14,9x + 22,756$
Углепластик	$y = 16,333x + 23,667$	$y = 20,767x + 21,911$
Стеклопластик	$y = 14,117x + 22,6$	$y = 14,333x + 23,222$

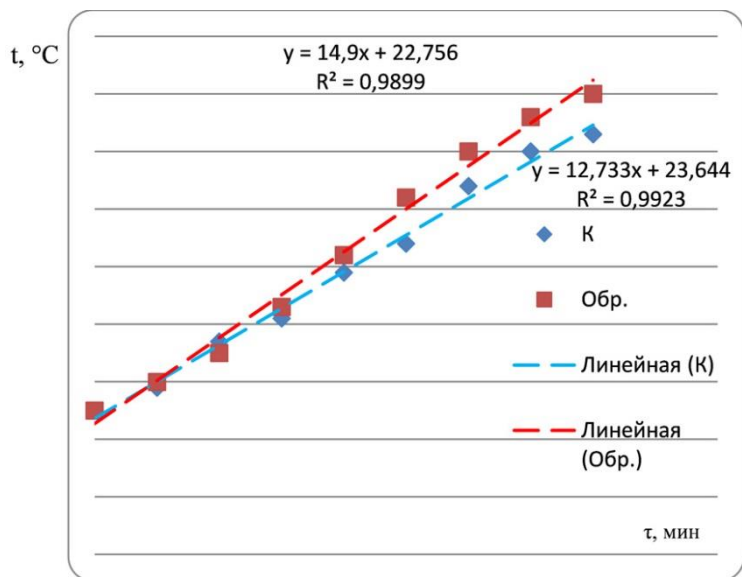


Рис. 1. Кинетика нагрева отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20 без наполнителя.
 К – контрольный образец, Обр. – опытный

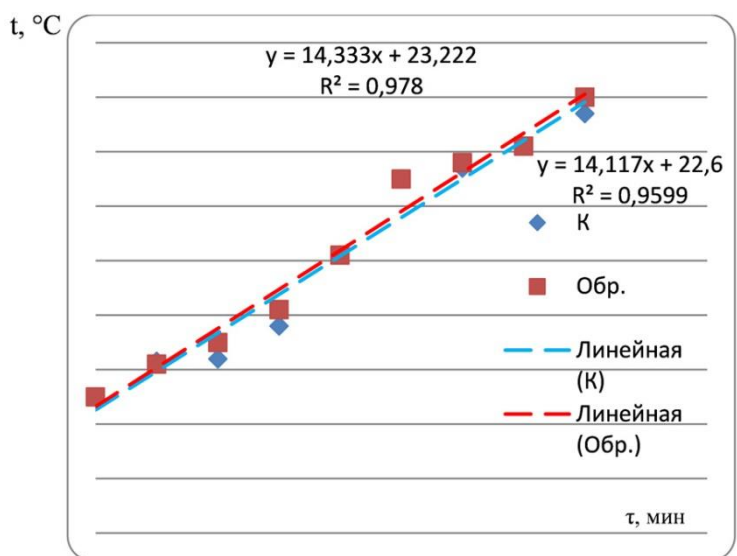


Рис. 2. Кинетика нагрева отвержденного стеклопластика.
 К – контрольный образец, Обр. – опытный

Анализ полученных зависимостей позволил установить следующее. Скорость нагрева опытного образца из ЭД-20 без наполнителя составляет 21,3 град./мин и возрастает по сравнению с контрольным на 13,3 %. Скорость нагрева опытного образца стеклопластика составляет 20,5 град./мин и возрастает на 3,8 %, что не выходит за пределы ошибки и является незначимым.

Углепластик характеризуется значительно большими эффектами. Скорость нагрева опытного образца составляет 27 град. /мин, что на 27 % выше, чем у контрольного образца и также на 27 % выше, чем эпоксидного компаунда без наполнителя. Такое изме-

нение кинетики нагрева углепластика может быть связано с усилением контактного взаимодействия матрицы и углеродного волокна, вызванного в том числе увеличением поверхностей контакта, что способствует интенсификации тепловых потоков от углеродных волокон, являющихся значительно лучшими проводниками тепла по сравнению с эпоксидной матрицей и стеклянными волокнами.

Результаты вычисления коэффициентов температуропроводности (α) и теплопроводности (λ) по средним значениям температуры в партии из 5-и образцов представлены в табл. 2. Установлено, что зависимость коэффициентов температуропроводности (y_1) и теплопроводности (y_2) углепластика от плотности потока энергии (x) СВЧ электромагнитного поля при времени воздействия, равном 2 минуты, с точностью 0,92-0,94 описывается полиномами 2-го порядка следующего вида, соответственно:

$$y_1 = -0,0063x^2 + 0,2363x + 12,769, \quad (1)$$

$$y_2 = -0,0041x^2 + 0,1534x + 9,1239. \quad (2)$$

Таблица 2

Значения коэффициентов температуропроводности (α) и теплопроводности (λ) углепластика после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле с различной плотностью потока энергии в течение 2 минут в сравнении с контрольными образцами

ППЭ, мкВт/см ² $\alpha \times 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	Контрольный	$(10-12) \times 10^4$	$(17-18) \times 10^4$	$(45-50) \times 10^4$
$\Delta\alpha$	1	1,06	1,2	0,75
$\lambda, \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$	9,3	9,7	11,03	7,17
$\Delta\lambda$	1	1,04	1,186	0,77

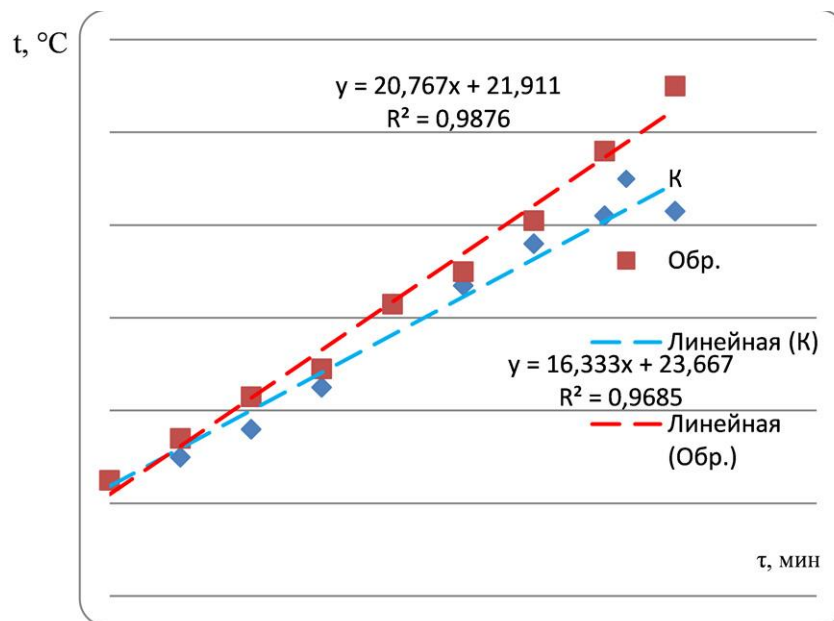


Рис. 3. Кинетика нагрева отвержденного углепластика.
К – контрольный образец, Обр. – опытный

Из анализа полиномов (1) и (2) следует, что СВЧ электромагнитное поле влияет на температуропроводность более, чем в 1,5 раза большей степени, чем на теплопроводность.

Анализ термограмм показал следующее. Область температур (130-140)° С занимает 1/2 поверхности образца из стеклопластика, а углепластик имеет зональный прогрев: в то время, как прилегающая к одной из боковых поверхностей зона имеет температуру около 150° С и доходит почти до среднего сечения, противоположная сторона нагрета только до 135° С. Возможно, здесь наблюдается влияние различной ориентации углеродных волокон, образующих относительно равнопрочную структуру. В отмеченных зонах волокна имеют взаимно перпендикулярную направленность, что приводит к изменению тепловых потоков и различному количеству поглощенной тепловой энергии. Также заметны явные различия в тепловых полях при нагреве контрольных и модифицированных в СВЧ электромагнитном поле образцов: как в начальный, так и в конечный момент прогрева обработанные образцы имеют существенно большую температуру, чем контрольные. Данный факт подтверждается оценкой вычисленных коэффициентов температуропроводности исследованных материалов.

Теплофизические коэффициенты исследованных материалов существенно различаются. Коэффициент температуропроводности стеклопластика меньше, чем у углепластика – почти в 9 раз. В целом различие коэффициентов теплопроводности для исследованных материалов качественно повторяет зависимость для температуропроводности: теплопроводность стеклопластика меньше, чем углепластика почти в 2,5 раза. Образцы, подвергнутые воздействию СВЧ электромагнитного поля, имеют существенно более равномерную температуру периферийных и центральных зон: различие не превышает (3-5)° С для углепластика и (8-10)° С для стеклопластика. При этом уже в первый момент времени оба материала оказываются прогреты в большей степени (примерно на 10° С).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа полученных результатов можно заключить, что для конструкционных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами и волокнами синтетического стекла, характерно существенное различие теплофизических параметров, что вызывает необходимость их подбора с учетом не только механических эксплуатационных нагрузок, но внешних источников тепла. Увеличение параметров температуропроводности композиционных материалов после модифицирования в СВЧ электромагнитном поле позволяет обеспечить улучшение их функционирования в условиях температурных градиентов и снизить интенсивность кромочного и поверхностного нагрева, что позволяет повысить надежность конструкции и обшивки транс-

портных систем, особенно космических аппаратов. Также это имеет значение для строительных конструкций, предназначенных для эксплуатации в районах Арктики и Антарктики и, в более отдаленной перспективе, обитаемых баз на поверхности Луны.

Исследования выполнены в рамках проекта «СП-5946.2021.3 «Метод повышения функциональных характеристик элементов космических аппаратов из отвержденных полимерных композиционных материалов в условиях воздействия температурного градиента».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Студенцов В.Н. Армированные композиционные материалы строительного назначения / В.Н. Студенцов, В.А. Кузнецов, Н.В. Зубцова, И.В. Черемухина // Композиционные материалы в промышленности. Материалы 29 международной конференции 1-5 июня 2009 г., г. Ялта-Киев: Украинский информационный центр. 2009. С. 357-359.

2. 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.

3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

4. Мировой рынок углеродного волокна <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-uglerodno-go-voлокna/> (дата последнего обращения: 01.02.2022 г.).

5. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) / М.С. Дориомедов // Труды ВИАМ, № 6-7 (89), 2020. С. 29-37.

6. Коваленко В.А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности. Аналитический обзор / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, 2011. № 5 (82). С. 14-20.

7. Деев И.С. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / И.С. Деев, Е.Ф. Никишин. Под ред. Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. С. 1056-1067.

8. Letin V.A., Gatchenko L.S., Deev I.S. et al. // Proc. of Sixth International Space Conference «Protection of Materials and Structures from Space Environment», Toronto, Canada. May 1-3. 2002. P. 461-474.

9. Kablov E.N. Protection of Materials and Structures from Space Environment / E.N. Kablov, V.T. Minakov, I.S. Deev, E.F. Nikishin // Space Technology Proceedings Eds. J.I. Kleiman, Z. Iskanderova, Kluwer Acad. Publ. 2003. P. 217-233.

10. Полежаев Ю.В. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3 т. Т. 1. Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий / Ю.В. Полежаев, С.В. Резник, Э.Б. Василевский и др.; Под ред. С.В. Резника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 224 с.

11. Горынин И.В. Конструкционные материалы – важный элемент надежности и экологической безопасности инфраструктуры Арктики / И.В. Горынин // Арктика: экология и экономика № 3 (19), 201. С. 82-87.

12. Бузник В.М. Материалы для сложных технических устройств арктического применения. Научно-технические проблемы освоения Арктики / В.М. Бузник, Е.Н. Каблов, А.А. Кошурина. – М.: 2015. С. 275-285.

13. Бузник В.М. Состояние и перспективы арктического материаловедения / В.М. Бузник, Е.Н. Каблов // Вестник Российской Академии наук. 2017. Т. 87, № 9. С. 831-843.

14. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.

15. Brinkmann S. At al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. – Ed. Hanser. 2006. 920 p.

16. Кулезнев В.С. Химическая и физическая модификация полимеров / В.Н. Кулезнев, А.С. Шершнева. М.: Химия, 1990. 207 с.

17. Кестельман В.Н. Физические методы модификации полимерных материалов. М.: Химия, 1980. – 188 с.

18. Microwave processing of materials / National Materials Advisory Board. Washington: National Academy Press, 1994. 150 p.

19. Thuery J. Microwave: industrial, scientific, and medical applications. Boston: Artech House Publishers, 1992. – 475 p.

20. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

21. Комаров В.В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 57-63.

22. Кадыкова Ю.А. Электрофизическая модификация базальтовых нитей / Ю.А. Кадыкова, С.Г. Калганова, С.В. Арзамасцев и др. // Вопросы электротехнологии. 2019. № 2 (23). С. 101-105.

23. Захаров В.В. Математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств / В.В. Захаров, С.В. Тригорный // Вопросы электротехнологии. 2020. № 3. С. 5-12.

24. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of 'green' composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajpaia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // *Akademeia* (2011) 1(1): ea0101. pp. 1-6.
25. Teawon Kim Microwave heating of carbon-based solid materials / Teawon Kim, Jaegeun Lee, Kun-Hong Lee // *Carbon Letters*, Vol. 15, № 1, 15-24 (2014).
26. Bradshaw S.M. Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon / S.M. Bradshaw, E.J. van Wyk, J.B. de Swardt // *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*– JULY/AUGUST 1998, p. 201-210.
27. Museok Kwak Microwave Curing of Carbon-Epoxy Composites: Process Development and Material Evaluation. – Imperial College London Department of Aeronautics. – A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. – 2016. 150 P.
28. Zlobina I.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Solid State Phenomena*. 2016. V. 870, p.p. 101-106.
29. Злобина И.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.
30. Zlobina, I.V. Strengthening microwave modification of structural elements of composite materials reinforced with synthetic fibers / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, D.P. Teterin // *Journal of Physics: Conference Series* 1050 (2018) 012108. doi: 10.1088/1742-6596/1050/1/012108.
31. Злобина, И.В. Воздействие различных по величине ударных нагрузок на модифицированные в СВЧ электромагнитном поле трехслойные конструкции на основе отвержденных углепластиков / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2019. № 3. С. 91-96.
32. Злобина, И.В. Компьютерное моделирование структурных изменений в отвержденных полимерных композиционных материалах под действием СВЧ электромагнитного поля / И.В. Злобина, К.С. Бодягина, Н.В. Бекренев // *Вопросы электротехнологии*. 2019. № 1 (22). С. 64-73.
33. Zlobina I.V. Studies of Microwave Electromagnetic Field Influence on Adhesion Strength of the «Matrix-Fiber» Contact Zone on the Example of the Elementary Cell of a Certified Polymeric Composite Material / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, G. Muldasheva // *Materials Science Forum* Vol. 992. Studies of Microwave Electromagnetic Field, 2020. P 317-324, doi.org /10.4028/.
34. Zlobina I.V. The effect of processing in a SHF electromagnetic field on the parameters of vibro-wave processes generated by the impact of a solid body in cured polymer composite materials under influence of climate factors / I.V. Zlobina // *JOP Conference Series: Metrological Sup-*

port of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 42045.

35. Злобина И.В. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на изменение изгибной прочности конструкционных элементов из отвержденных углепластиков под действием факторов внешней среды / И.В. Злобина, И.С. Кацуба, Н.В. Бекренев // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2020. – № 3 (238). – С. 20-22.

36. Фалилеев А.Д. Практическая реализация метода Паркера для определения температуропроводности / А.Д. Фалилеев // Сб. XVIII Междунар. научно-практ. Конф. «Современные техника и технологии». Секция 9: Контроль и управление качеством, С. 137-138.

37. Вавилов В.П. Определение теплофизических характеристик материалов методом термографии / В.П. Вавилов, В.Г. Торгунаков, Д.А. Нестерук и др. // Известия Томского политехнического университета, 2006. Т. 309. № 2. С. 130-134.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Irina V. Zlobina – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Technical Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Статья поступила в редакцию 24.03.2022, принята к опубликованию 16.05.2022

Ф.К. Ходжаев

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И СВОБОДНАЯ ЭНЕРГИЯ
ГИББСА СПЛАВОВ СИСТЕМ СВИНЦА С НЕКОТОРЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ**

Аннотация. Свинец образует сплавы с высокими механическими свойствами, с элементами периодической таблицы (ЭПТ). Однако, полные диаграммы состояния свинца с отдельными элементами ПТ типа Pb-O, Al, Si, S, Ga, Rb, U не построены. Как известно фундаментальной основой разработки новых сплавов являются диаграммы состояния. С помощью статистических, термодинамических критериев и зонной теории регулярных растворов произведён прогноз и расчет строения диаграмм состояния указанных систем. В работе в приближении теории регулярных растворов рассчитаны термодинамические свойства компонентов из экспериментально построенных диаграмм состояний Pb-O, (Al, Si, S, Ga, Rb, U). Диаграммы состояния этих систем представляют собой монотектический тип с наличием расщепления и областей гомогенности. Исходя из проделанного анализа существующих сведений в настоящем сообщении сделан, попытка построить полные диаграммы состояния этих систем с учетом невариантных превращений со стороны блоков взаимодействующих компонентов. Полученные результаты способствуют в последующем произвести расчет полных диаграмм состояния систем свинца с отдельными элементами ПТ, которые являясь фундаментальной основой процессов сплавообразования, могут быть полезны для разработки различных металлургических процессов. Например, можно разработать технологию проведения того или иного ликвационного процесса.

Ключевые слова: свинец, диаграммы состояния, термодинамические свойства, система, расчет, активность и свободная энергия Гиббса

F.K. Khodzhaev

**THERMODYNAMIC ACTIVITY
AND GIBBS FREE ENERGY OF ALLOYS OF LEAD SYSTEMS
WITH THE ELEMENTS OF THE PERIODIC TABLE**

Abstract. Lead forms alloys characterized by high mechanical properties with the elements of the periodic table (EPT). However, there are no complete diagrams relating the state of

lead with individual PT elements of the type Pb-O, Al, Si, S, Ga, Rb, or U. As is known, the fundamental basis for the development of new alloys are state diagrams. Statistical, thermodynamic criteria and the zone theory of regular solutions are used to predict and calculate the structure of state diagrams of these systems. In this paper, thermodynamic properties of components from experimentally constructed state diagrams Pb-O, (Al, Si, S, Ga, Rb, U) are calculated in terms of the theory of regular solutions. The state diagrams of these systems are of monotectic type characterized for delamination and homogeneity areas. Based on the analysis of the existing data, an attempt has been made to construct complete diagrams of the state of these systems, taking into account non-invariant transformations on the part of the blocks of interacting components. The obtained results help to calculate complete diagrams of the state of lead systems with individual PT elements, which are the fundamental basis of alloy formation processes and can be useful for the development of various metallurgical processes, such as developing technologies for conducting particular liquation processes.

Keywords: lead, state diagrams, thermodynamic properties, system, calculation, Gibbs activity and free energy

ВВЕДЕНИЕ

Опытные данные по термодинамическим свойствам компонентов систем свинец-ЭПТ отсутствуют. В связи с этим в работе сделана попытка получить эти значения методом расчёта с использованием термодинамических представлений. В этом случае единственным источником для информации к настоящему времени является диаграмма состояния.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диаграммы состояния систем свинца с некоторыми элементами ПТ (Pb-O, Pb-Al, Pb-Si, Pb-S, Pb-Ga, Pb-Rb и Pb-U) представляют собой монотектический тип с наличием расслаивания и областей гомогенности [1]. В них со стороны ординаты второго компонента наблюдаются монотектические превращения, а со стороны свинца – эвтектические. Для определения термодинамических свойств сплавов несмешивающихся систем использован приближение регулярных растворов, которое позволяет рассчитать эти характеристики из построенных диаграмм состояния [2, 3].

Для взаимно несмешивающихся систем в состоянии равновесия химические потенциалы взаимодействующих компонентов в двух сосуществующих фазах равны:

$$\mu'_1 = \mu''_1 \text{ и } \mu'_2 = \mu''_2, \quad (1)$$

где штрихи сверху обозначают номер фазы, а индексы внизу – номер компонента.

Значения химических потенциалов компонентов в несмешивающихся системах находятся из соотношений:

$$\mu_1 = \mu_1^0 + RT \ln x_1 + x_2^2 (Q_1 - Q_2) + 2x_2^3 Q_2; \quad (2)$$

$$\mu_2 = \mu_2^0 + RT \ln x_2 + x_1^2 (Q_1 + 2Q_2) - 2x_1^3 Q_2, \quad (3)$$

где x_1 и x_2 – мольные доли компонентов системы; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; Q_1 и Q_2 – константы межчастичного взаимодействия.

Подставляя выражения (2) и (3) в равенство (1) получим:

$$RT \ln x_1'/x_1'' + [(x_2')^2 - (x_2'')^2] (Q_1 - Q_2) + 2Q_2 [(x_2')^3 - (x_2'')^3] = 0; \quad (4)$$

$$RT \ln x_2''/x_2' + [(x_1'')^2 - (x_1')^2] (Q_1 + 2Q_2) - 2Q_2 [(x_1'')^3 - (x_1')^3] = 0, \quad (5)$$

где $x_1' + x_2' = 1$ и $x_1'' + x_2'' = 1$.

Температуру и состав точки критического распада расслаивающихся систем можно определить по следующим уравнениям:

$$T_{кр} = [2(Q_1 - Q_2) x_2^{кр} (1 - x_2^{кр})] / R + [6Q_2 (x_2^{кр})^2 (1 - x_2^{кр})] / R; \quad (6)$$

$$x_2^{кр} = - (Q_1 - 4Q_2) / 9Q_2 - \{ [(Q_1 - 4Q_2) / 9Q_2]^2 + (Q_1 - Q_2) / 9Q_2 \}^{1/2}. \quad (7)$$

В (1)-(7) входят параметры, которые нетрудно определить, используя данные о фазовых равновесиях в системах Pb-O, Pb-Al, Pb-Si, Pb-S, Pb-Ga, Pb-Rb и Pb-U. Значения констант межчастичного взаимодействия рассчитали из условия равенства химических потенциалов компонентов в равновесных жидкостях при температуре монотектического равновесия (табл. 1).

Таблица 1

К расчету констант межчастичного взаимодействия и координат критического распада в системах с участием свинца

Система	Т _м , К	Состав фаз, ат. доли		Q ₁	Q ₂	Координаты критического распада	
		x ₂ '	x ₂ ''			Дж/г·ат.	x ₂ ^{кр} , ат. доля
Pb-O	1145	0,0065	0,4990	26007	-93323	0,1857	2450
Pb-Al	932	0,0122	0,9983	34596	14919	0,6127	2689
Pb-Si	1675	0,0150	0,9750	60146	-6645	0,4571	3443
Pb-S	1073	0,2440	0,9080	16936	8297	0,6215	1364
Pb-Ga	586	0,0550	0,9760	15288	3702	0,5755	1056
Pb-Rb	738	0,4000	0,8000	10129	4517	0,6150	794
Pb-U	1573	0,1500	0,9800	26187	26100	0,6665	2795

В качестве примера ниже подробно рассматриваются расчёты диаграммы состояния системы Pb-Si, из которой можно видеть, что $x_2' = 0,0150$; $x_2'' = 0,9750$ и $T_m = 1675$ К, откуда после совместного решения уравнений (4) и (5) получим $Q_1 = 60146$ и $Q_2 = -6645$ Дж/г·ат.

На основании уравнений (2) и (3) для коэффициентов активности компонентов в системе Pb-Si при температуре монотектики 1675 К имеем:

$$\ln f_{Pb} = 4,79 (1 - x_{Pb})^2 - 0,95 (1 - x_{Pb})^2; \quad (8)$$

$$\ln f_{Si} = 3,36 (1 - x_{Si})^2 + 0,95 (1 - x_{Si})^2. \quad (9)$$

Рассчитанные по уравнениям (8) и (9) кривые активности свинца и кремния с учётом $a = f \cdot x$ при температуре монотектического равновесия показаны на рисунке 1. Мож-

но видеть, что в системе наблюдаются большие положительные отклонения от закона Рауля, а в области низких концентраций обоих компонентов эти отклонения являются небольшими. Участки концентрационной зависимости активностей компонентов, где $a_i > 1$, указывают на появление ограниченной растворимости в жидком состоянии и возможности расслоения раствора на две фазы. Точка пересечения кривых активностей определяет концентрацию раствора, соответствующую критическому распаду гомогенного раствора.

Концентрационную зависимость избыточной свободной энергии Гиббса в рамках модели регулярного раствора для сплавов системы Pb-Si можно определить выражением (примерно такое же значение будет для теплоты смешения, если принять $\Delta G = \Delta H \neq 0$):

$$\Delta G^{изб} = \Delta H_{см} = 60146 x_{Pb} \cdot x_{Si} - 6645 x_{Pb} \cdot x_{Si}^2. \quad (10)$$

Результаты расчётов по уравнению (10) представлены на рисунке 2. Отсюда можно заключить, что сплавление свинца и кремния происходит со значительным поглощением тепла. Эти данные хорошо согласуются с характером фазового равновесия системы Pb-Si. Расчёты по уравнениям (4) и (9) показывают, что координаты кривых распада на диаграмме состояния Pb-Si соответствуют $T_{кр} = 3443 \text{ К}$ и $x_2^{кр} = 0,4571$.

Аналогичные расчёты произвели для остальных систем Pb-O, Pb-Al, Pb-Si, Pb-S, Pb-Ga, Pb-Rb и Pb-U по данным, приведённым в таблице 1.

Полученные уравнения для расчётов термодинамической активности компонентов в сплавах систем Pb-ЭПТ приведены в таблице 2.

Таблица 2

К расчету коэффициентов термодинамической активности компонентов в системах Pb-ЭПТ

Система	T _м	Q ₁	Q ₂	Уравнения
		Дж/г-ат.		
Pb-O	872,00	26007	-93323	$\ln f_{Pb} = 12,53 (1 - x_{Pb})^2 - 19,60 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_O = -16,8 (1 - x_O)^2 + 19,60 (1 - x_O)^2$
Pb-Al	658,50	34596	14919	$\ln f_{Pb} = 2,539 (1 - x_{Pb})^2 + 3,850 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_{Al} = 8,315 (1 - x_{Al})^2 - 3,850 (1 - x_{Al})^2$
Pb-Si	1402,00	60146	-6645	$\ln f_{Pb} = 4,796 (1 - x_{Pb})^2 - 0,954 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_{Si} = 3,364 (1 - x_{Si})^2 + 0,954 (1 - x_{Si})^2$
Pb-S	800,00	16936	8297	$\ln f_{Pb} = 0,968 (1 - x_{Pb})^2 + 1,860 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_S = 3,758 (1 - x_S)^2 - 1,860 (1 - x_S)^2$
Pb-Ga	312,60	15288	3702	$\ln f_{Pb} = 2,378 (1 - x_{Pb})^2 + 1,519 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_{Ga} = 4,657 (1 - x_{Ga})^2 - 1,519 (1 - x_{Ga})^2$
Pb-Rb	465,00	10129	4517	$\ln f_{Pb} = 0,914 (1 - x_{Pb})^2 + 1,472 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_{Rb} = 3,12 (1 - x_{Rb})^2 - 1,472 (1 - x_{Rb})^2$
Pb-U	1280,00	25854	25769	$\ln f_{Pb} = 0,006 (1 - x_{Pb})^2 + 3,991 (1 - x_{Pb})^2$ $\ln f_U = 5,993 (1 - x_U)^2 - 3,991 (1 - x_U)^2$

Таким образом, на основании построенных диаграмм состояния расслаивающихся систем Pb-O, Pb-Al, Pb-Si, Pb-S, Pb-Ga, Pb-Rb и Pb-U рассчитаны константы межчастичного взаимодействия, активности компонентов и свободная энергия Гиббса в зависимости от концентрации с использованием приближения теории регулярных растворов (рис. 1, 2 и табл. 2) [4, 5].

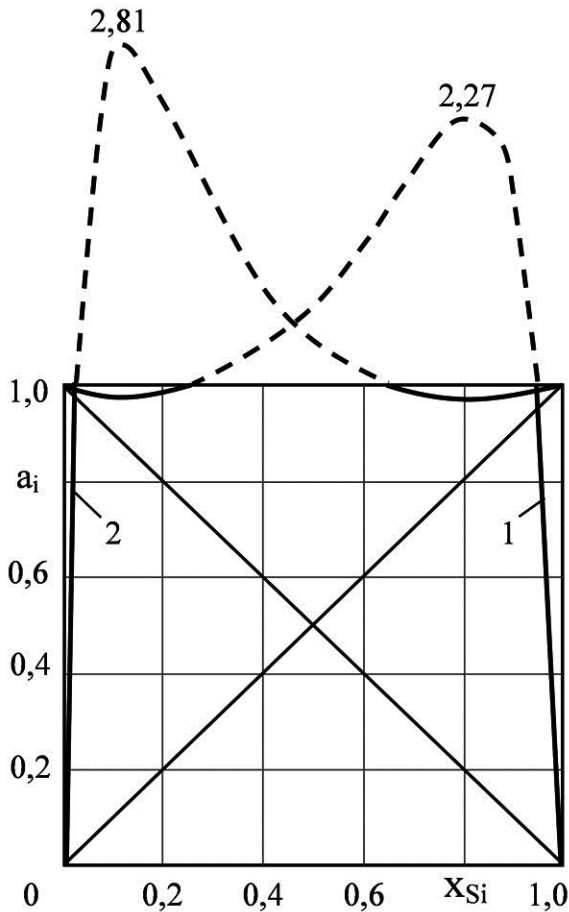


Рис. 1. Зависимость активности (a_i) свинца (1) и кремния (2) в системе Pb-Si от концентрации (x_{Si})

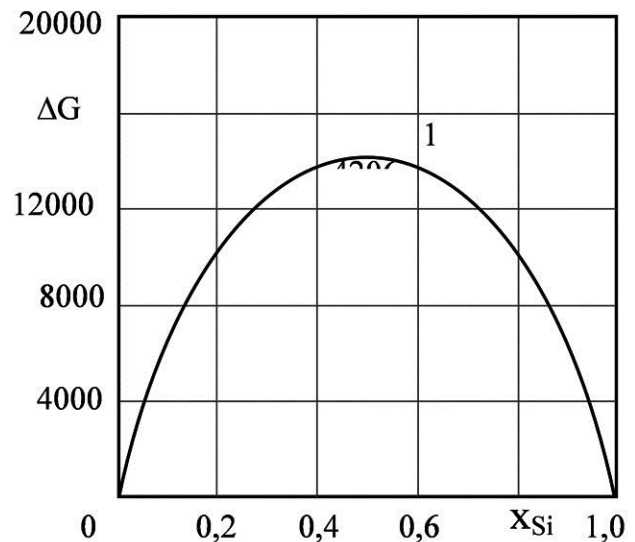


Рис. 2. Зависимость избыточной энергии Гиббса (ΔG , Дж/г ат.) от концентрации (x_{Si}) в системе Pb-Si

Можно видеть, что в этих системах наблюдаются большие положительные асимметричные отклонения от закона идеальных растворов, подтверждающие ограниченную растворимость компонентов друг в друге как в жидком, так и в твёрдом состояниях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты могут быть полезны в практике различных металлургических процессов, при разработке новых состава, легировании и модифицировании сплавов цветных и чёрных металлов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем / под ред. акад. РАН Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996, 1997, 2001. Т. 1-3. 992, 1024. 1320 с.
2. Джураев Т.Д., Ходжаев Ф.К., Муслимов И.Ш. // ДАН РТ. 2013. Т. 56. № 9. с. 398-402.
3. Ходжаев Ф.К. Моделирование закономерности изменения термодинамических характеристик интерметаллидов систем свинец – лантаноиды эквимольного и богатых свинцом составов/ Ф.К. Ходжаев, И.Х. Саломов, Б.Б. Эшов, А.Б. Бадалов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2017. № 41. С. 27-33.
4. Ходжаев Ф.К. Закономерности изменения термодинамических характеристик интерметаллидов систем «свинец – лантаноиды», богатых свинцом / Ф.К. Ходжаев, И.Х. Саломов, Б.Б. Эшов, А.Б. Бадалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2017. Т. 17. № 3. С. 21-27.
5. Джураев Т.Д. Термодинамическая активность и свободная энергия Гиббса сплавов систем свинец-переходные металлы (ПМ), (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu и Zn) / Т.Д. Джураев, Ф.К. Ходжаев, Э.Р. Газизова, И.Ш. Муслимов // Вестник ТГУ. 2015. № 4 (32). С. 98-102.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Ходжаев Фируз Камолович –
Кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
«Металлургия» Таджикского технического
университета им. академика М.С. Осими
E-mail: firuz1083@mail.ru

Firuz K. Khodzhaev –
Ph.D (Technical Sciences), Senior Lecturer,
Department of Metallurgy, Tajik Technical
University after Academician M.S. Osimi

Статья поступила в редакцию 22.04.2022, принята к опубликованию 06.06.2022

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 источников.

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 рисунков.

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 источников 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:

– **Информационные технологии и телекоммуникации**

– **Машиностроение**

– **Химические технологии, науки о материалах, металлургия**

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		