

ВЕСТНИК

САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2023

№ 1 (96)

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Март 2023 года

Учредитель и Издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

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 Е.Е. Миргородская

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.х.н., проф. А.В. Гороховский (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.ф.-м.н., проф. М.В. Жигалов (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. О.В. Захаров (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. А.В. Королёв (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)
Д.т.н., проф. В.А. Кушников (СНЦ РАН)
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.)
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.В. Яковлев (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Редактор Л.А. Скворцова

Компьютерная верстка Т.В. Семеновой

Перевод на английский язык к.филол.н. А.Х. Аскаровой

Адрес Издателя и редакции:

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

Телефон: 8 (845-2) 99-89-81

E-mail: vestnik@sstu.ru

Подписано в печать 24.03.2023 Дата выхода в свет 29.03.2023

Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.

Усл. печ. л. 11,5 Уч.-изд. л. 3,6

Тираж 500 экз. Заказ 9 Цена свободная

Отпечатано в типографии Издательства СГТУ имени Гагарина Ю.А.

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.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

© Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А., 2023

ISSN 1999-8341

VESTNIK

**SARATOV
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

2023

№ 1 (96)

Scientific Journal

Since 2003

Published quarterly

March 2023

Constitutor and Editor

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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 E.E. Mirgorodskaya

Editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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)

Corresponding member of RAE,

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

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

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

Editor L.A. Skvortsova

Computer-based page-proof T.V. Semenova

Rendering: PhD (Philology) 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: 24.03.2023. Date of publication 29.03.2023

Format 60×84 1/8 Offset-Print

Conventional printed sheet 11,5 Publication base sheet 3,6

Circulation: 500 printed copies Order 9

Publisher and Editorial Address:

77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054, Russia

Registration Certificate of mass media *PI № FS 77-65155* of
28 March 2016 issued by the Federal Service for Supervision of
Communications, Information Technology, and Mass Media

eLIBRARY.ru

ISSN 1999-8341

© Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Игнатъев А.А., Сигитов Е.А., Добряков В.А.
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ВОПРОСА
УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
НА ПРЕЦИЗИОННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНКАХ..... 5

Молчанов Д.В.
ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОГРУЖНОГО
РЕФРАКТОМЕТРА В СИСТЕМУ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ГАЗА 21

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Головченко И.В., Финогеев Д.Ю., Решетникова О.П.
АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ
ФОТОПОЛИМЕРОВ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ..... 31

Захаров О.В., Яковишин А.С., Сулейманова Ф.Д., Жуков А.В.
ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610 ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 4. ПРОФИЛЬНЫЕ СПЛАЙН И ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРЫ 43

Панфилова А.В.
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА СПОСОБА ЛЕЗВИЙНОЙ ОЧИСТКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОКАТА ОТ ОКАЛИНЫ..... 59

Чуриков Д.О., Злобина И.В., Бекренев Н.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА,
В КОТОРОМ ВОЗБУЖДАЮТСЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ,
НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ 66

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Иброхимов С.Ж., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б.
ТВЕРДОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ СПЛАВА AM_{г4}, ЛЕГИРОВАННОГО
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ (Sc, Y, La, Pr, Nd) 74

Маркелова О.А., Пичхидзе С.Я., Фомин А.А.
ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВНУТРИКОСТНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ
МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫМ ФИЛАМЕНТОМ..... 83

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Ignatiev A.A., Sigitov E.A., Dobryakov V.A.
A SYSTEMATIC APPROACH TO SOLVING THE ISSUE
OF QUALITY MANAGEMENT OF TURNING
ON PRECISION AUTOMATED MACHINES 5

Molchanov D.V.
INCORPORATING AN INTELLIGENT SUBMERSIBLE REFRACTOMETER
INTO THE AUTOMATIC CONTROL
SYSTEM OF THE GAS HEATER 21

MECHANICAL ENGINEERING

Golovchenko I.V., Finogeev D.Yu., Reshetnikova O.P.
ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF FILLED
PHOTOPOLYMERS IN THE AREA OF ADDITIVE TECHNOLOGIES 31

Zakharov O.V., Yakovishin A.S., Suleymanova F.D., Zhukov A.V.
APPLICATION OF ISO 16610 SERIES FILTERS IN THE SURFACE STRUCTURE
ANALYSIS. PART 4. PROFILE SPLINE AND WAVELET FILTERS 43

Panfilova A.V.
MECHANISM HIGHLIGHTS OF THE EDGE CUTTING TECHNOLOGY FOR
MECHANICAL DESCALING OF METAL SURFACES 59

Churikov D.O., Zlobina I.V., Bekrenev N.V.
EFFECTS OF THE GAP SIZE WITH EXCITED
ULTRASONIC VIBRATIONS ON THE LEVEL
OF PROCESS LIQUID CLARIFICATION 66

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

Ibrokhimov S.Zh., Ganiev I.N., Eshov B.B.
HARDNESS AND STRENGTH OF AMg4 ALLOY HARDENED
WITH RARE-EARTH METALS (Sc, Y, La, Pr, Nd) 74

Markelova O.A., Pichkhidze S.Ya., Fomin A.A.
TECHNOLOGY FOR CREATING INDIVIDUAL
INTRAOSSEOUS CONSTRUCTIONS USING THE METHOD
OF LAYERED METAL-POLYMER FILAMENT PRINTING 83

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 681.5, 621.9

А.А. Игнатьев, Е.А. Сигитов, В.А. Добряков

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРЕЦИЗИОННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТАНКАХ

Аннотация. На основе системного подхода рассматриваются методы управления качеством токарной обработки на прецизионных автоматизированных станках, включающие минимизацию влияния возмущающих факторов и управление макро- и микрогеометрическими параметрами точности деталей.

Ключевые слова: управление качеством обработки, системный подход, прецизионные токарные станки

A.A. Ignatiev, E.A. Sigitov, V.A. Dobryakov

A SYSTEMATIC APPROACH TO SOLVING THE ISSUE OF QUALITY MANAGEMENT OF TURNING ON PRECISION AUTOMATED MACHINES

Abstract. Based on the system approach, the article considers the methods of quality control of the turning technology using precision automation solutions that will minimize effects of the disturbing factors and control macro- and microgeometric precision parameters of the components.

Keywords: processing quality management, system approach, precision lathes

Введение

Высокие требования к качеству обработки деталей для наукоемких изделий авиационной, приборостроительной и медицинской техники, машино- и автомобиле-

строения обуславливают необходимость обеспечения технологической надежности автоматизированных металлорежущих станков (АМС). Эта проблема особенно важна для прецизионных и сверхпрецизионных станков, что определяет необходимость минимизации влияния тепловых, виброакустических, силовых и других факторов, которые ранее не имели существенного значения при обработке на станках нормальной точности [1-3].

Проблема обеспечения технологической надежности АМС впервые была сформулирована и проанализирована А.С. Прониковым [4-6], а затем рассматривалась в многочисленных работах других ученых, в которых отражены различные аспекты ее решения. Технологическая надежность АМС закладывается на этапе разработки, обеспечивается на этапе изготовления и поддерживается на этапе эксплуатации [4], причем на каждом из этапов жизненного цикла станков используются соответствующие методы и средства расчета, конструирования и исследований, специальные технологии изготовления и виды испытаний основных узлов и станков в целом [7-12].

Для высокоточных АМС приходится учитывать большое число факторов, связанных с новыми конструкторскими и технологическими решениями, использованием различных датчиков контроля параметров и микропроцессорных средств управления, что обуславливает целесообразность применения системного анализа, направленного на оптимальное решение проблемы с учетом достижений в смежных отраслях науки и техники [13].

Поскольку процесс прецизионной обработки должен обеспечивать, в первую очередь, заданные параметры качества детали, из ряда критериев оптимизации, принятых в технологии машиностроения, следует остановиться на так называемом «технологическом», при котором не только размеры детали лежат в определенном достаточно малом допуске, но и микрогеометрические параметры (шероховатость и волнистость) ее поверхности минимальны.

Анализ факторов, влияющих на точность обработки, необходим для организации целеориентированных мероприятий по обеспечению заданных выходных параметров качества детали, вектор которых $V(t)$ может быть представлен в виде

$$\bar{V}(t) = \bar{Y} \{ \bar{Z}(t), \bar{R}(t), \bar{S}(t), \bar{F}(t) \}, \quad (1)$$

где $\bar{Z}(t)$ – вектор параметров заготовки, описывающий ее физико-механические свойства и геометрические размеры; $\bar{R}(t)$ – вектор параметров режима резания; $\bar{S}(t)$ – вектор параметров технологической системы; $\bar{F}(t)$ – вектор внутренних и внешних возмущающих воздействий.

Функционал (1) устанавливает в обобщенном виде связь параметров качества детали с целой совокупностью параметров (входных и выходных, внешних и внутренних), оказывающих непосредственное влияние на качество обработки.

В каждом конкретном случае имеется свой набор параметров, причем среди них целесообразно выделить доминирующие и в дальнейшем рассматривать только их влияние. Перед тем как перейти к рассмотрению вопроса управления качеством обработки, примем два условия: параметры заготовок $\bar{Z}(t)$ и параметры технологической системы $\bar{S}(t)$ соответствуют установленным требованиям и их влияние на качество в дальнейшем не рассматривается.

Цель работы – обоснование целесообразности системного подхода как начальной фазы прикладного системного анализа к проблеме обеспечения технологической надежности прецизионных автоматизированных станков.

Управление качеством обработки на прецизионных автоматизированных станках

Применение в АМС новых технических решений основных формообразующих узлов и средств управления создают основу для обеспечения прецизионной обработки. Следует, однако, отметить, что влияние ряда внешних и внутренних возмущающих факторов $\bar{F}(t)$, имеющих как детерминированные, так и стохастические составляющие, достаточно сложно учесть и компенсировать, что приводит к увеличению погрешностей обработки и к необходимости управления качеством деталей.

Последнее предполагает целенаправленное воздействие на подсистемы АМС, обеспечивающее снижение влияния возмущений и, соответственно, повышение точности обработанных деталей.

Применение в АМС микропроцессорной техники и надежных измерительных преобразователей создало условия для реализации автоматизированного управления точностью обработки как за счет минимизации влияния ряда внешних и внутренних возмущений, так и за счет активного контроля.

Качество обработки – комплексное понятие, поэтому с позиций системного подхода в приложении к прецизионным деталям следует рассматривать управление их макро- и микрогеометрическими параметрами точности и физико-механическими характеристиками поверхностного слоя (рис. 1). Это особенно важно, например, для шлифованных поверхностей деталей подшипников [14].

В процессе функционирования АМС на него воздействует ряд возмущений как со стороны внешней среды, так и естественно протекающих внутри станка процессов различной скорости: медленные, средней скорости, быстропротекающие, что влияет на качество обработанных деталей, особенно для высокоточных изделий [4, 5, 13]. Анализ влияния процессов различной скорости на технологическую надежность АМС является достаточно важным на всех этапах жизненного цикла АМС, так как позволяет выбрать наилучшие решения по обеспечению качества деталей в зависимости от выявленной степени влияния.

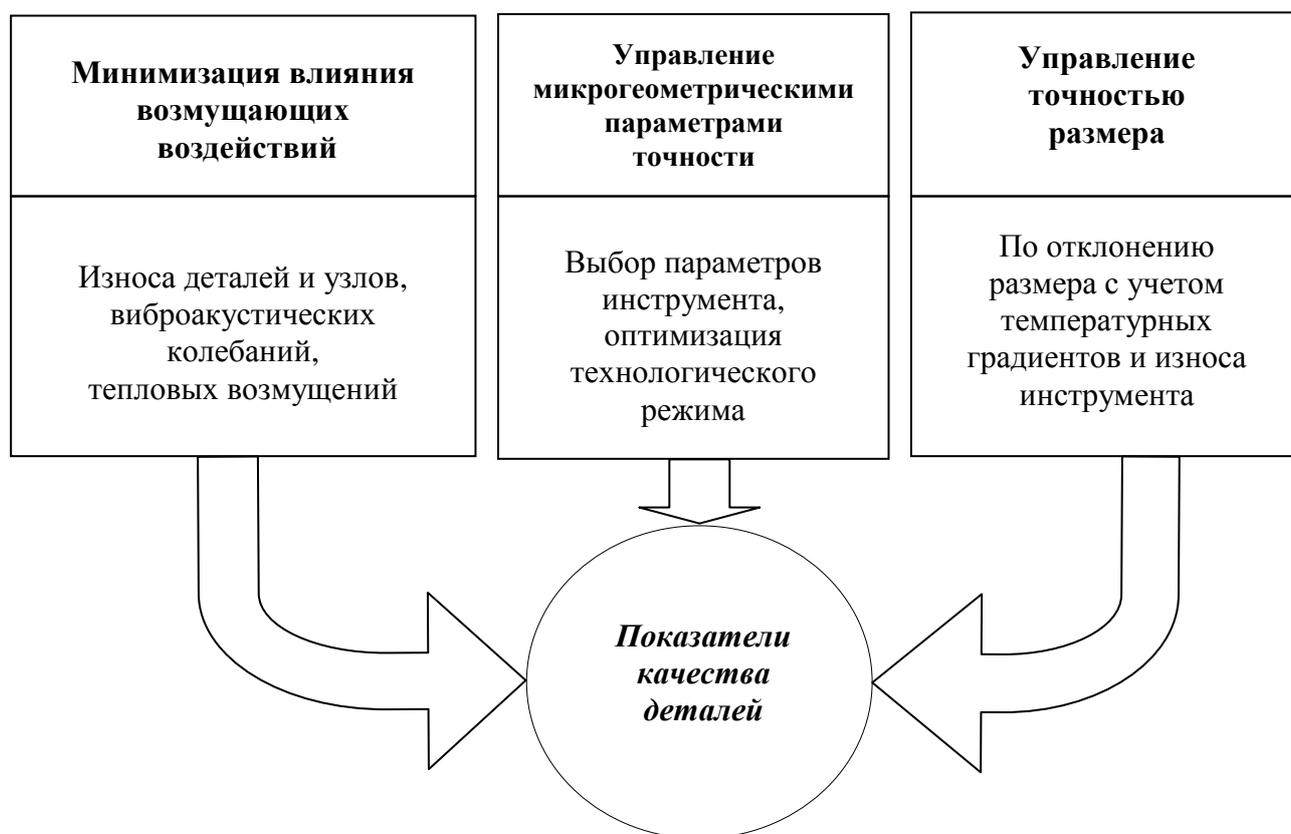


Рис. 1. Системный подход к анализу методов управления качеством обработки деталей

Современный токарный АМС может быть представлен иерархической структурой из совокупности взаимодействующих функциональных подсистем различного уровня, объединенных единой целью – обработка деталей с заданным качеством [13]. В качестве примера можно рассмотреть структуру прецизионного токарного модуля типа ТПАРМ, разработанного на одном из предприятий Саратова (рис. 2).

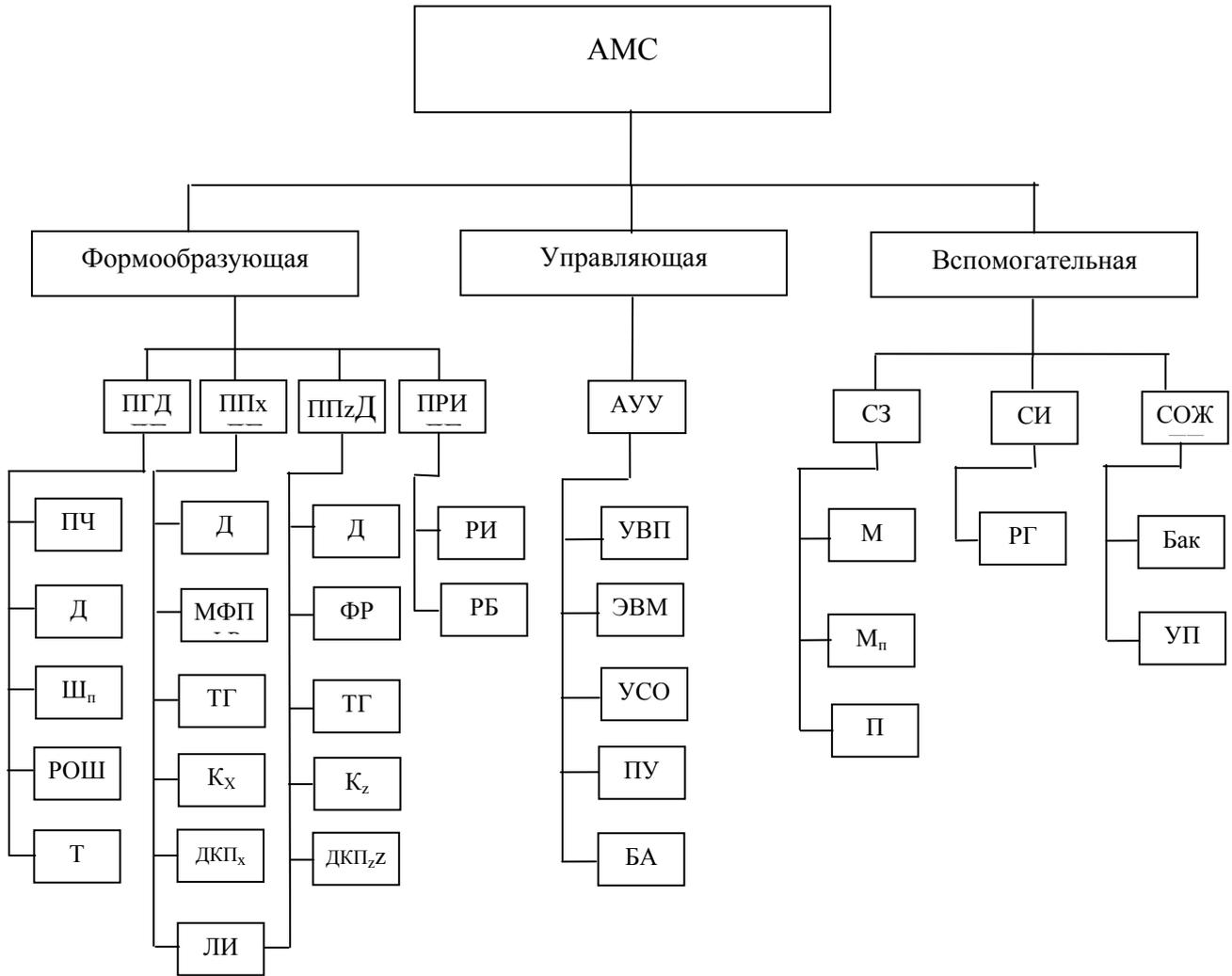


Рис. 2. Иерархическая структура токарного модуля типа ТПАРМ:

ПЧ – преобразователь частоты; Д – двигатель; Шп – шпиндель;
 РОШ – реле оптическое шпинделя; Т – тормоз; МФП – многоступенчатая фрикционная передача;
 ТГ – тахогенератор; К_х, К_z – каретки суппорта по оси X и Z; ДКП_х, ДКП_z – датчики крайнего
 положения по оси X и Z; ЛИ – лазерный интерферометр; РИ – режущий
 инструмент; РБ – резцовый блок; УВП – устройство ввода программы;
 УСО – устройство сопряжения с объектом; ПУ – пульт управления; БА – блок
 автоматики; СЗ – подсистема смены заготовки; М – магазин; Мп – манипулятор;
 П – патрон; СИ – подсистема смены инструмента; РГ – резцовая головка;
 СОЖ – подсистема обеспечения смазочно-охлаждающей жидкостью;
 Бак – бак с СОЖ; УП – устройство подачи СОЖ в зону резания

На первом уровне можно выделить три подсистемы: управляющая (выполняет функции собственно управления, контроля и диагностирования); формообразующая (обеспечивает процесс обработки деталей); вспомогательная (осуществляет загрузку заготовок в патрон, подачу СОТС, удаление обработанных деталей и т. п.). Второй уровень подсистем является детализацией первого, в частности в составе формообразующей подсистемы выделяются привод главного движения (ПГД), приводы подачи (ППП), подси-

стема режущего инструмента (ПРИ), несущие элементы конструкции (НЭЖ). Третий уровень подсистем – сменные функциональные блоки (узлы), например в приводе подачи функциональными блоками являются двигатель, механическая передача и т. п. Четвертый уровень представляется деталями, входящими в состав узлов.

Для минимизации влияния возмущающих воздействий различной физической природы конструктивно-технологическими методами применяются новые конструктивные решения функциональных узлов, используются новые материалы и технологии изготовления [8, 10, 15]. Роль медленных процессов (износ базовых узлов, коррозия) снижается, например, за счет совершенствования конструкции АМС, процессов средней скорости (износ инструмента, тепловые деформации) – вводом корректирующих воздействий, быстропротекающих процессов (вибрации) – совершенствованием конструкции и оптимизацией режимов резания.

Основная роль в обеспечении заданных значений показателей качества деталей принадлежит формообразующей подсистеме, поэтому рассмотрим особенности входящих в нее подсистем второго уровня.

Основной узел ПГД – шпиндельный узел (ШУ). Они различаются по точности, габаритам, типу опор и другим параметрам [16]. Их точностные параметры определяются классом точности станка, что влияет на конструктивное исполнение опор. ШУ с традиционными опорами качения уже не удовлетворяют требованиям точности, поскольку допуски на размеры и погрешность формы некоторых деталей составляют 0,2...0,5 мкм. Аэростатические и гидростатические опоры по точности и быстроходности превосходят опоры качения и гидродинамические опоры скольжения. Так, овальность детали, установленной в шпинделе на аэростатических и гидростатических опорах, составляет не более 0,2 мкм, в шпинделе на опорах качения этот параметр равен 1 мкм. ШУ с аэростатическими и гидростатическими опорами обеспечивают шероховатость обработанной поверхности порядка 0,02...0,05 мкм, а с опорами качения – 0,3...0,4 мкм. Кроме того, применение указанных опор обеспечивает за счет очень низкого трения почти неограниченный срок службы шпинделя.

Для снижения тепловых деформаций и демпфирования вибраций в ШУ ряда прецизионных и сверхпрецизионных АМС применяются специальные керамические материалы, стекло- и углепластики [7, 8].

Различные конструктивные решения обеспечивают стабилизацию температуры основных формообразующих узлов станка, в основном ШУ, например за счет удаления или изоляции источников тепловыделения, отвода тепла от них и т. п. Следует отметить, что целесообразно использовать параллельно несколько методов минимизации влияния тепловых процессов на точность токарной обработки.

В модуле типа ТПАРМ применяются аэростатические опоры ШУ. Необходимыми условиями повышения точности положения оси шпинделя на модуле являются его динамическая балансировка совместно с деталью и стабилизация теплового поля, в том числе за счет обеспечения постоянства температуры воздуха, подаваемого в опоры, с погрешностью не более $\pm 0,2^\circ \text{C}$, и в производственном помещении [17]. Внешние температурные условия для станков регламентируются в зависимости от их класса точности, например, для АМС нормальной точности изменение температуры в помещении в течение смены допускается $\pm 2^\circ \text{C}$, повышенной точности – $\pm 1^\circ \text{C}$, для высокоточных станков – $\pm 0,5^\circ \text{C}$, для станков особо высокоточных и особо точных – $\pm 0,2^\circ \text{C}$ и менее.

Параметрическая надежность ППП определяется такими характеристиками как точность позиционирования рабочего органа, быстродействие, уровень вибраций и другими [8, 12, 18, 19]. Основной вклад определяется видом направляющих рабочего органа, механической передачей как конечным звеном в цепи преобразования управляющего сигнала в заданное перемещение суппорта, и датчиком обратной связи (ДОС), осуществляющим измерение перемещения рабочего органа.

В прецизионных АМС в большинстве случаев используются аэростатические или гидростатические направляющие суппорта взамен традиционных направляющих качения, что позволяет значительно снизить трение и повысить их долговечность. Применяются шариковые винтовые передачи ввиду возможности создания предварительного натяга и минимизации зазоров за счет известных конструктивных решений. Имеются сведения о применении в аналогичных станках и координатно-измерительных машинах (КИМ) фрикционных передач (ФП), которые являются практически беззазорными и обеспечивают высокую плавность перемещений. В токарных модулях типа ТПАРМ в приводе подачи используется многоступенчатая фрикционная передача (МФП) оригинальной компоновки (рис. 3) и аэростатические направляющие суппорта [19].

В качестве ДОС в приводах прецизионных АМС используются различные типы высокоточных датчиков, включая лазерные интерферометры [13, 20]. Они обеспечивают измерение линейных перемещений рабочих органов с точностью, соответствующей классу точности данного станка. Так, например, в прецизионном токарном модуле типа ТПАРМ используется лазерный интерферометр ПЛПИ «Электроника-1000», разработанный в ООО «НПК прецизионного оборудования», дискретность отсчета перемещения в котором составляет 0,01 мкм [21].

Заданная точность взаимного расположения детали и рабочего органа с инструментом обеспечивается несущими элементами конструкции станка, к которым относятся станина, стойки, направляющие и т. д. К ним предъявляются высокие требования по точности ответственных технологических поверхностей, а также по виброустойчивости

ми при обработке инструментами, оснащенными другими СТМ. При заточке инструментов с природными алмазами обеспечивается радиус округления режущей кромки в пределах долей микрометра, что обеспечивает получение шероховатости обработанной поверхности деталей из цветных металлов $Ra = 0,01...0,03$ мкм. Надо отметить, что алмазные инструменты должны использоваться при малом уровне вибраций в паре «резец-деталь», поэтому низкая прочность и теплостойкость ограничивают область применения РИ на основе природного алмаза.

В некоторых прецизионных АМС вместо вращающихся резцовых блоков используются линейные блоки, жестко закрепленные на суппорте, например в токарных станках фирм Benziger (ФРГ) и Schaublin (Швейцария) и модулях типа ТПАРМ (Россия) [13, 22]. В этом случае полностью исключается погрешность позиционирования, возникающая у вращающегося резцового блока, и достигающая 1...5 мкм.

Исходя из изложенного выше, следует отметить, что современные прецизионные токарные АМС построены на основе рассмотренных технических решений, которые с точки зрения системного подхода сведены в таблицу.

Технические решения для формообразующей подсистемы прецизионных АМС, направленные на минимизацию влияния процессов различной скорости

| Анализ влияния скорости процессов в станке | Технические решения для подсистем второго уровня | | | |
|---|--|---|---|----------------------------------|
| | Привод главного движения | Подсистема привода подачи | Несущие элементы конструкции | Подсистема режущего инструмента |
| <i>Медленные</i> (износ деталей) | Гидро- или аэростатические подшипники | Гидро- или аэростатические направляющие | Искусственное старение металлов, железобетонные станины | — |
| <i>Средней скорости</i> (износ РИ, тепловые) | Термостабилизация, материалы с малым КТР | Электромеханический привод | Материалы с малым КТР | Твердые сплавы, керамика, алмазы |
| <i>Быстропротекающие</i> (переходные, вибрации) | Передачи без зубчатых колес, балансировка шпинделя | Безлюфтовые механические передачи | Полимербетонные станины с высоким демпфированием | Линейные резцовые блоки |

Перейдем к рассмотрению вопроса управления процессом обработки, основанного на выборе значений параметров режима резания $\bar{R}(t)$.

Управление микрогеометрическими параметрами точности, в частности шероховатостью и волнистостью поверхности, основано на оптимизации режима обработ-

ки, включая выбор инструмента и параметров режима резания (частота вращения заготовки, глубина резания, подача инструмента). В этом случае предварительно выполняется расчет режима резания и геометрических параметров РИ на основе априорной информации о параметрах заготовки, точности изготавливаемой детали и технологических возможностях станка. Следует отметить, что существующие в настоящее время методики расчета не позволяют получить оптимальные режимы, поскольку в каждом конкретном случае при построении целевой функции необходимо учитывать параметры обрабатываемого материала, инструмента и реальные динамические характеристики станка [23].

Далее осуществляется корректировка первоначальных данных на основе получаемой в ходе процесса обработки текущей информации о значениях микрогеометрических параметров точности при условии вариации технологических параметров, причем целесообразным является оценка качества обработки по изменению какого-либо параметра, определяемого режимом резания (сила или температура резания, вибрации и др.) [24-26].

Корректировка режима резания, осуществляемая на основе измерения, например, стохастических характеристик виброакустических (ВА) колебаний динамической системы, позволяет определить рациональные значения параметров обработки для данной модели станка [27].

Изменяя значения параметров режима резания, можно установить те их значения, при которых точность обработки максимальна, т. е. выявляется экстремум целевой функции. В этом случае учитываются индивидуальные особенности АМС, в частности динамическое качество станка и степень износа РИ в текущий момент времени, т. е. осуществляется оперативная оптимизация.

На рис. 4 приведены результаты экспериментально-аналитического определения целесообразного режима точения на модуле ТПАРМ-100М на основе сопоставительного анализа интегральных оценок автокорреляционных функций (АКФ) виброакустических колебаний резцового блока и шероховатости обработанной поверхности деталей из алюминиевого сплава.

Результаты свидетельствуют о том, что при частотах вращения шпинделя 1000 и 1600 об/мин динамическое качество станка наиболее высокое и, соответственно, формируемая шероховатость не превышает 0,1 мкм, однако производительность на частоте вращения 1600 об/мин выше, определяя тем самым целесообразный режим точения.

В данном случае колебания при резании служат косвенной оценкой динамического качества станка при различных значениях частоты вращения детали. Обоснование применения интегральных оценок для станков приведено в работе [27].

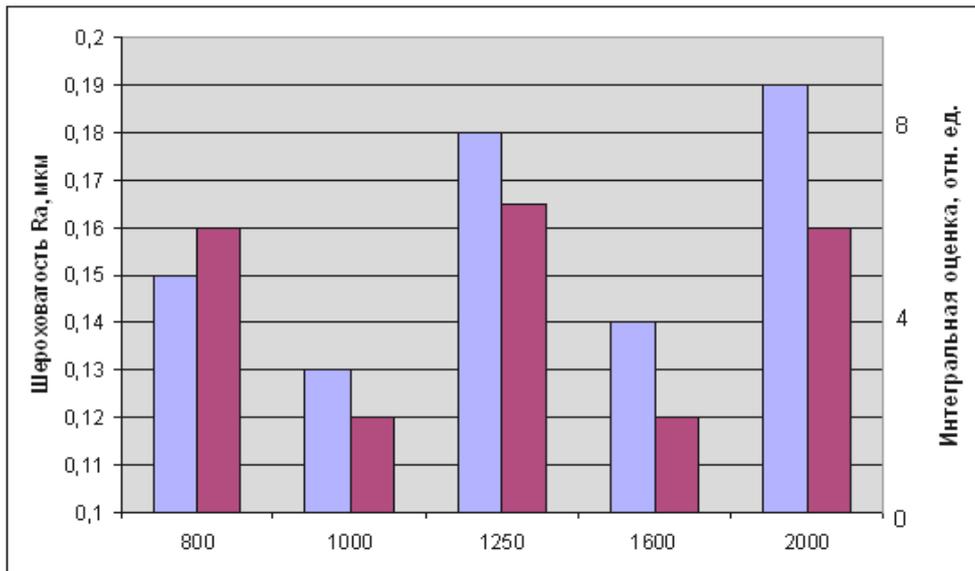


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности (Ra) обработанных деталей и интегральных оценок АКФ виброакустических колебаний резцовой головки модуля ТПАРМ–100М от частоты вращения шпинделя: подача резца 10 мкм/об, глубина резания – 30 мкм, резец АСПК с радиусом при вершине 0,3 мм;
■ – интегральные оценки АКФ; ■ – шероховатость поверхности

Управление точностью размера основано на организации воздействия на узлы формообразующей подсистемы, определяющие значение размера обработанных деталей [28], причем для этого необходимо, чтобы значения микрогеометрических параметров точности были значительно меньше (по крайней мере, в 3...5 раз), чем допуск на размер.

Можно выделить три основных метода управления точностью размеров деталей [13]:

- 1) стабилизация параметров и условий работы узлов формообразующей подсистемы на определенном уровне, соответствующем заданной точности обработки;
- 2) управление по результатам измерения параметров узлов, определяющих точность размера, основанное на моделировании процесса формирования станком погрешностей обработки и ввода коррекции на положение рабочего органа;
- 3) управление по результатам измерения размеров деталей, основанное на построении модели точности обработки и ввода коррекции на положение рабочего органа.

Первый метод достаточно подробно рассмотрен выше.

Второй метод эффективен при условии, что выяснена взаимосвязь изменения значений каких-либо параметров станка с погрешностью размера и установлены количественные соотношения между ними, появляется возможность управления за счет

ввода коррекции в траекторию перемещения рабочего органа, например суппорта, или в положение РИ в соответствии с изменением упомянутых параметров (силовых, тепловых деформаций, износа и т. п.). Так, например, для модулей типа ТПАРМ была выявлена связь изменения диаметральных размеров деталей с изменением температуры ШУ (значения коэффициентов частной корреляции 0,74...0,93). В этом случае изменение температуры на $0,5^{\circ}\text{C}$ компенсировалось коррекцией положения резца на 1 мкм.

Третий метод базируется на условии, что имеется возможность измерения размеров деталей, и построена модель их изменения. Управление точностью обработки осуществляется путем ввода коррекции на положение резца. Контроль размеров деталей может осуществляться специальными датчиками и с различными схемами измерения. Наиболее высокую точность и надежность измерений размеров (до 0,1...0,2 мкм) обеспечивает схема контроля деталей непосредственно на станке, когда последний используется в режиме КИМ, при этом измерительное устройство включает в себя датчик касания и измеритель перемещения. Функция контроля точности обработки возложена на компьютерную систему управления, которая управляет процессом измерения диаметра детали, производит расчет припуска, который необходимо снять на последнем проходе, и вводит его в цикл обработки. Подобный режим измерения был реализован на модуле ТПАРМ-100М, что позволило в процессе эксплуатации поддерживать размеры деталей с погрешностью не более 1,0 мкм.

Практическая реализация рассмотренных методов управления точностью размеров обработанных деталей показывает, что первый имеет ограниченные возможности по точности, так как воздействием ряда факторов нельзя в принципе стабилизировать, например, износ инструмента. Реализация второго метода требует соответствующих экспериментальных исследований и специального программно-математического обеспечения (ПМО). Третий метод обеспечивает реальное повышение точности размеров, однако его эффективность в значительной степени определяется параметрической надежностью датчика размера и простотой схемы измерения и ПМО. Эффективность второго и третьего методов может быть существенно повышена за счет применения интеллектуальных технологий, позволяющих обработать большой объем данных с датчиков различных параметров и сформировать решение по управлению качеством обработки [29, 30].

Прецизионные токарные модули типа ТПАРМ серийно изготавливались в ПО «Тантал» (Саратов). При разработке токарного модуля в его конструкцию был заложен ряд новых технических решений, что определило его существенные отличия от аналогичных АМС. Модули имеют аэростатические опоры шпинделя и направляющие суппорта, приводы подачи с МФП и лазерным интерферометром в качестве ДОС; линейный

инструментальный блок. При эксплуатации модуля ТПАРМ-100М в термоконстантном помещении и стабилизированном тепловом режиме станка при минимизации внешних вибрационных возмущений и выполненной динамической балансировке шпинделя совместно с заготовкой погрешность размеров обработанных деталей составляла не более 0,5 мкм (рис. 5), погрешность формы – не более 0,2 мкм, шероховатость поверхности деталей из алюминиевого сплава, обработанной резцом с природным алмазом, – $Ra = 0,02...0,03$ мкм.

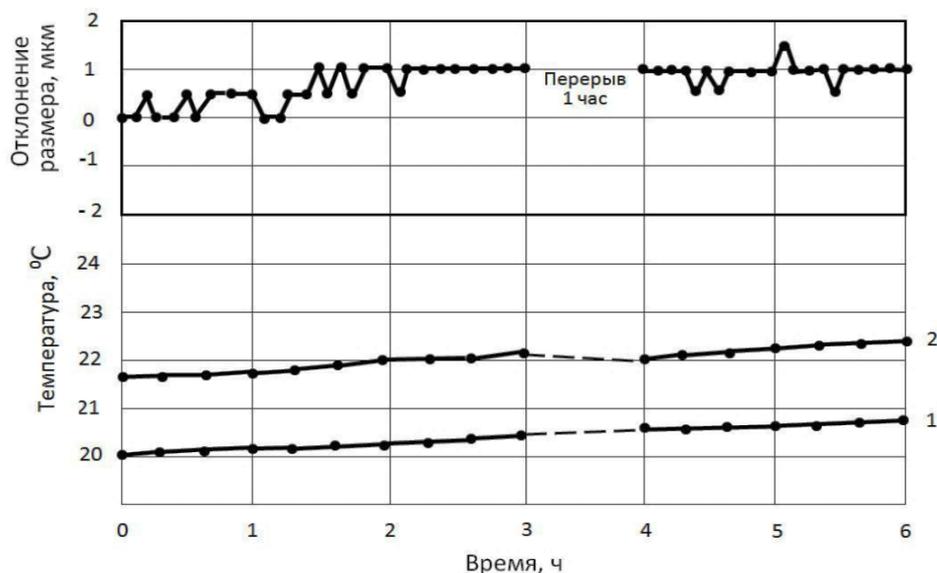


Рис. 5. Точность обработки при стабилизированном тепловом режиме, где 1 – температура станины; 2 – температура шпинделя

Заключение

Системный подход к вопросу управления качеством обработки в рамках проблемы обеспечения технологической надежности прецизионных АМС позволяет более полно представить взаимосвязь различных методов для его решения, выявить пути совместного решения ряда возникающих задач междисциплинарного характера, а также определить конкретные научно-технические решения для создания конкурентоспособных станков.

Список источников

1. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения в начале XXI века // СТИН. 2003. № 9. С. 3-7; № 10. С. 3-7.
2. Проблемы точности и эффективности современных металлорежущих станков / В.В. Бушуев, А.П. Кузнецов, Ф.С. Сабиров и др. // СТИН. 2016. № 2. С. 6-16.

3. Обеспечение точности обработки на автоматизированных прецизионных металлорежущих станках: Обзорная информация / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Москва: ВНИИТЭМР, 1992. Сер. 1. Вып. № 5. 68 с.
4. Технологическая надежность станков / под ред. А.С. Проникова. Москва: Машиностроение, 1971. 342 с.
5. Точность и надежность станков с ЧПУ / под ред. А.С. Проникова. Москва: Машиностроение, 1982. 256 с.
6. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. Москва: Машиностроение, 1985. 288 с.
7. Пуш А.В. Основные принципы проектирования прецизионных и сверхпрецизионных станков // СТИН. 1999. № 3. С. 12-14.
8. Петров Н.А. Состояние и перспективы развития технологии и оборудования для сверхпрецизионной обработки: Аналитический обзор. Москва: ВНИИТЭМР, 1991. 44 с.
9. Камышев А.И., Кочинев Н.А. Автоматизация испытаний и исследований металлорежущих станков с ЧПУ: обзорная информация. Москва: ВНИИТЭМР, 1988. Сер. 1. Вып. № 7. 56 с.
10. Конструкции и программные испытания шпиндельных узлов металлорежущих станков: обзорная информация / Л.И. Вереина, В.В. Додонов, В.К. Москвин, Ю.В. Никулин. Москва: ВНИИТЭМР, 1991. Сер. 1. Вып. № 1. 56 с.
11. Конструкции современных автоматизированных станков как объектов управления / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, Е.А. Сигитов, М.В. Виноградов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. 56 с.
12. Состояние и направления развития научных исследований в станкостроении / В.В. Бушуев, А.П. Кузнецов, Ф.С. Сабиров и др. // СТИН. 2015. № 11. С. 12-20.
13. Игнатъев А.А., Добряков В.А., Игнатъев С.А. Прикладной системный анализ объектов машиностроения. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2021. 160 с.
14. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции: изд. 2-е, перераб. и доп. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2023. 240 с.
15. Оптимальные современные материалы для изготовления базовых конструкций и элементов металлорежущих станков / М.И. Браиловский, А.Г. Воскобойник, А.А. Дьяконов, И.В. Шмидт // СТИН. 2016. № 4. С. 2-7.
16. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность. Москва: Машиностроение, 1992. 288 с.
17. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1992. Ч. 1. 160 с.

18. Виноградов М.В., Игнатъев А.А., Сигитов Е.А. Обеспечение нанометровой точности перемещений рабочих органов автоматизированных станков. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. 100 с.
19. Виноградов М.В., Игнатъев А.А., Сигитов Е.А. Приводы подачи автоматизированных станков с многоступенчатой фрикционной передачей. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. 140 с.
20. К проблеме построения прецизионных станков для изготовления изделий с нанометровой точностью / В.И. Телешевский, С.Н. Григорьев, А.Г. Андреев и др. // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. № 3 (34). С. 9-14.
21. Игнатъев А.А., Сигитов Е.А., Добряков В.А. Применение лазерного интерферометра в качестве датчика обратной связи привода подачи прецизионного токарного модуля // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2021. С. 41-49.
22. Игнатъев А.А., Сигитов Е.А., Добряков В.А. Повышение точности обработки на прецизионных токарных модулях на основе совершенствования узлов формообразующей подсистемы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 1 (92). С. 65-72.
23. Режимы резания и их корректировка на автоматизированных металлорежущих станках / А.А. Игнатъев, А.И. Зорин, В.А. Каракозова, С.А. Игнатъев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 84 с.
24. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. Москва: Машиностроение, 1976. 278 с.
25. Выбор режима резания на автоматизированном токарном станке на основе оценки запаса устойчивости динамической системы / А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, С.А. Игнатъев и др. // СТИН. 2018. № 6. С. 25-29.
26. Грубый С.В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимами резания. Москва: Машиностроение, 2014. 422 с.
27. Игнатъев 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.
28. Волосов С.С., Гейлер С.Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 264 с.
29. Интеллектуальное управление технологическими системами / А.К. Тугенгольд, Е.А. Лукьянов, Э.В. Ремизов, О.Е. Коротков // СТИН. 2008. № 2. С. 2-9.
30. Игнатъев А.А., Казинский А.А., Игнатъев С.А. Интеллектуальные системы и технологии в машино- и приборостроении. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2022. 160 с.

Сведения об авторах

Игнатъев Александр Анатольевич –

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

Alexander A. Ignatiev –

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

Сигитов Евгений Александрович –

кандидат технических наук, директор
ООО «Научно-производственный комплекс
прецизионного оборудования», Саратов

Evgeny A. Sigitov –

PhD (Technical Sciences), Director
of LLC Scientific and Production Complex
of Precision Engineering, 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
Technical Mechanics and Mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.02.2023, принята к опубликованию 20.03.2023

Д.В. Молчанов

**ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОГРУЖНОГО
РЕФРАКТОМЕТРА В СИСТЕМУ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ГАЗА**

Аннотация. Рассматриваются структура подогревателя газа, а также химические свойства промежуточного теплоносителя и возможность внедрения интеллектуального рефрактометра в систему автоматического управления с целью отслеживания химических свойств промежуточного теплоносителя для увеличения срока службы подогревателя газа.

Ключевые слова: подогреватель газа, теплоноситель, пропиленгликоль, рефрактометр, этиленгликоль, диэтиленгликоль, система автоматического управления

D.V. Molchanov

**INCORPORATING AN INTELLIGENT SUBMERSIBLE
REFRACTOMETER INTO THE AUTOMATIC CONTROL
SYSTEM OF THE GAS HEATER**

Abstract. The article deals with the structure of gas heaters, as well as the chemical properties of intermediate heat carriers and possibilities for using intelligent refractometers into automatic control systems in order to trace the chemical properties of intermediate heat carriers used to increase the service life of gas heaters.

Keywords: gas heater, coolant, propylene glycol, refractometer, ethylene glycol, diethylene glycol, automatic control system

Введение

Природный газ является одним из основных энергоносителей в нашей стране, чему способствуют обильные отечественные запасы. Его повсеместно используют в различных отраслях промышленности и народного хозяйства.

Основная задача после добычи природного газа – это его дальнейшее транспортирование до потребителя.

Транспортирование газа – это одна из самых сложных задач, так как газ поставляется на большие расстояния, и во время транспортировки с ним могут происходить различные физические и химические процессы, которые могут вызывать аварийные ситуации, в результате газ не дойдет до конечного потребителя.

Добыча газа в основном происходит в северной части нашей страны, где чаще всего держится отрицательная температура. Природный газ транспортируется через газопровод.

Со временем из-за отрицательной температуры внутри газопровода образуется налет, в результате чего происходит уменьшение пропускного диаметра в газопроводе, что приводит к уменьшению пропускной способности, в дальнейшем могут образоваться ледяные пробки, которые полностью останавливают транспортировку газа (рис. 1).



Рис. 1. Образование ледяных пробок в газопроводе

Кроме образования ледяных пробок, также из-за низкой температуры может выйти из строя другое технологическое оборудование в связи с тем, что увеличивается хрупкость применяемых для изготовления газового оборудования (регуляторов, кранов, клапанов и т. д.) конструкционных материалов (металлы, пластики, стекло), что наряду с неизбежными термическими деформациями, например, газопроводов может привести к разрушению или потере герметичности корпусов изделий [1].

Для решения данной проблемы на определенных участках газопровода устанавливают подогреватели газа для поддержания необходимой температуры газа в газопроводе.

Данные установки применяют в связи с тем, что они полностью решают данную проблему с гидратобразованием, а также имеют короткие сроки изготовления, высокую надежность, собственную систему автоматического управления, в которую входят интеллектуальные датчики и исполнительные механизмы.

Подогреватели газа

Подогреватели газа являются сложными по составу и принципу работы устройствами. Основным параметром подогревателей газа является их пропускная способность [2]. При малой пропускной способности можно использовать электрические подогреватели газа, но при увеличении нагрузки они становятся нецелесообразными, так как затраты на потребляемую электроэнергию будут расти, в связи с этим устанавливаются подогреватели газа на основе сжигания газа через запальную горелку, тем самым подогревая промежуточный теплоноситель, который передает тепло газу, проходящему через жаровые трубы.

Конструкция подогревателя представляет собой горизонтальный цилиндрический корпус, заполненный жидким промежуточным теплоносителем (рис. 2). В нижней части корпуса располагается теплогенератор, состоящий из жаровой трубы, соединённой пучком дымогарных труб с поворотным коробом, сообщающимся, в свою очередь, с дымовой трубой. Жаровая труба оснащена горелочным устройством. В верхней части корпуса расположен теплообменник [7].

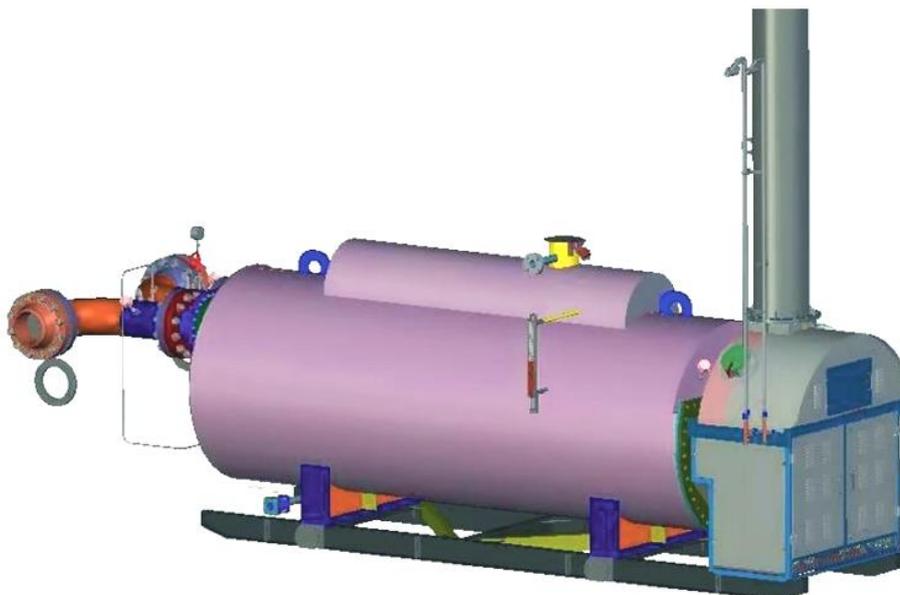


Рис. 2. 3D-модель подогревателя газа [2]

Работа подогревателя осуществляется следующим образом.

В горелочном устройстве сжигается природный газ. Образовавшиеся продукты сгорания проходят последовательно жаровую трубу, дымогарные трубы, где передают своё тепло промежуточному теплоносителю, после чего эвакуируются через дымовые трубы. Нагретый промежуточный теплоноситель передаёт тепло подогреваемому газу через стенки труб теплообменника.

Данные подогреватели являются очень надёжными устройствами и имеют большой срок службы.

При анализе состава и принципа работы данных подогревателей было выявлено слабое место всех подогревателей.

Как было сказано ранее, в состав подогревателя с промежуточным теплоносителем входит теплообменный аппарат.

Воздействие эксплуатационных факторов в течение длительного времени может оказывать негативное влияние и вызывать снижение рабочих параметров и постепенное или внезапное ухудшение его технического состояния вплоть до отказа.

Нарушение герметичности рабочих полостей может быть вызвано коррозионным и эрозионным воздействием теплоносителя и окружающей среды.

Одной из причин возникновения износа может быть неправильный подбор вида теплоносителя.

Промежуточный теплоноситель на случай планового или аварийного останова подогревателя должен обладать свойством не замерзать при низких температурах (до минус 60° С для подогревателя с климатическим исполнением УХЛ) во избежание разрушения внутренней полости подогревателя.

Общеизвестно, что вода со своей способностью накапливать при нагревании и отдавать при остывании большое количество тепла является идеальным теплоносителем с точки зрения теплоемкости, теплопроводности, вязкости. Поэтому для минимизации поверхности теплообменника теплофизические характеристики промежуточного теплоносителя должны максимально приближаться к теплофизическим свойствам простой воды. Немаловажна также экологическая чистота используемой жидкости [3].

Применение в качестве промежуточного теплоносителя обычных автомобильных антифризов нежелательно, так как пакеты присадок в них не рассчитаны на длительную эксплуатацию, что приводит к ускоренной коррозии поверхностей, соприкасающихся с промежуточным теплоносителем.

Существует множество марок теплоносителей, разработанных специально для систем отопления, таких как «Dixis», «Hot Blood», «Гольфстрим», ХНТ и другие, представляющие собой водные растворы этиленгликоля, пропиленгликоля различной концентрации с пакетом присадок – ингибиторов коррозии (от лат. *inhibeo* – задерживаю), веществ, тормозящих

химические реакции. Содержание ингибиторов коррозии в различных теплоносителях колеблется от долей процента до нескольких процентов. В подогревателях газа обычно используется водный раствор диэтиленгликоля (ДЭГ) или охлаждающая жидкость (ОЖ) на основе этиленгликоля по ГОСТ 28084-89 «Жидкости охлаждающие низкотемпературные».

Опираясь на ранее проведенные опыты применения различных теплоносителей, можно выделить 3 основных [4]:

1. Этиленгликоль.
2. Диэтиленгликоль.
3. Пропиленгликоль.

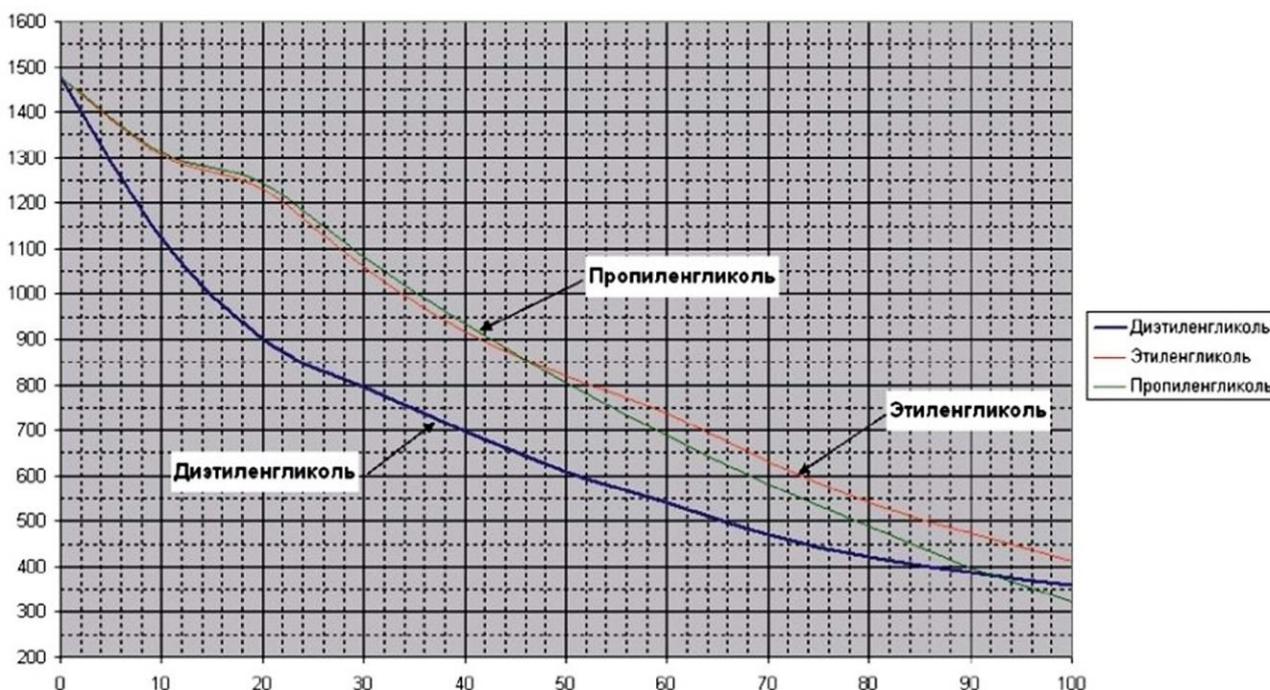


Рис. 3. График зависимости коэффициента теплопередачи от концентрации вещества

Как видно из графика, наихудшим коэффициентом теплоотдачи обладают водные растворы ДЭГ. Для концентрации 50 % (до температуры наружного воздуха -40°C) значение коэффициента теплоотдачи для ДЭГ (приблизительно $600\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$) ниже на 30 % аналогичных значений для ЭГ, ПГ, что приводит к снижению полезной тепловой мощности подогревателя газа. Падение коэффициента теплоотдачи для ПГ, начиная с 50 %, связано с более высокой его вязкостью по сравнению с ЭГ.

В связи с этим практически во все подогреватели газа в качестве промежуточного теплоносителя заливают средства на основе пропиленгликоля, так как он имеет почти максимальный из представленных выше теплоносителей коэффициент теплоотдачи и является безопасным для окружающей среды.

Преимущества и недостатки рассмотренных выше гликолей

| Основа теплоносителя | Преимущества | Недостатки |
|-----------------------|---|---|
| Этиленгликоль (ЭГ) | Наилучшие теплотехнические характеристики (выше только у воды) Невысокая стоимость по сравнению с другими гликолями Температура замерзания до -70°C | Ядовит, смертельная доза для человека 50-150 мл |
| Диэтиленгликоль (ДЭГ) | Температура замерзания до -70°C | Ядовит, стоимость выше, чем у ЭГ, обладает наихудшими теплотехническими характеристиками в сравниваемом ряду гликолей |
| Пропиленгликоль (ПГ) | Температура замерзания до -70°C Является поверхностно-активным веществом, то есть обладает способностью растворять накипь и продукты коррозии на стенках оборудования Экологически и токсикологически безопасен | По теплофизическим свойствам незначительно уступает ЭГ, высокая стоимость |

Как было сказано ранее, от правильно выбранного промежуточного теплоносителя зависит, как быстро будет происходить распространение коррозии в теплоносителе.

В настоящее время заводы-изготовители подогревателей газа сами не заливают промежуточный теплоноситель, а только дают рекомендации эксплуатирующим организациям о составе заливаемой жидкости.

В целях экономии эксплуатирующая организация чаще всего покупают жидкости на основе пропиленгликоля сомнительного качества и заливают в промежуточный теплоноситель, после чего происходит быстрое распространение коррозии и возникновение протечек, что приводит к выходу из строя подогревателя газа и дальнейшему его ремонту.

Внедрение рефрактометра в систему автоматического управления подогревателя газа

Наблюдения за изменением состава и свойств пропиленгликоля могут помочь предотвратить преждевременный выход из строя подогревателя.

Методы анализа должны быть объективными дающими определенные легко воспроизводимые количественные сведения о свойствах пропиленгликоля.

Для анализа химических свойств пропиленгликоля можно использовать рефрактометрические методы.

Рефракция – это явление преломления света на границе раздела двух сред, различных по оптической плотности [5].

Рефрактометрия – это измерение преломления света. Количественно рефракцию оценивают по углу или показателю преломления света. Поэтому рефрактометрический метод анализа – это метод, основанный на зависимости угла или показателя преломления света от состава системы (так как каждая система отличается определенной оптической плотностью).

Чаще всего для количественной оценки преломления света используют показатель преломления. Различают понятия абсолютного и относительного показателя преломления. Преломление света связано с изменением скорости света при переходе из одной среды в другую. Абсолютный показатель преломления света N – это отношение скорости света в вакууме v_v к скорости прохождения света в другой среде v_{cp} [3]:

$$N = \frac{v_v}{v_{cp}}. \quad (1)$$

Благодаря рефракционному методу можно будет определить процент концентрации пропиленгликоля в теплоносителе.

На данный момент рефрактометры применяют в бытовых целях для определения концентрации различных веществ.



Рис. 4. Рефрактометрический метод определения концентрации раствора

На основе рефракционного метода необходимо разработать погружной взрывозащищенный интеллектуальный рефрактометр.

Интеллектуальный рефрактометр представляет собой электронное устройство, основанное на объединении чувствительных элементов, схем преобразования сигналов и средств микропроцессорной техники [6].

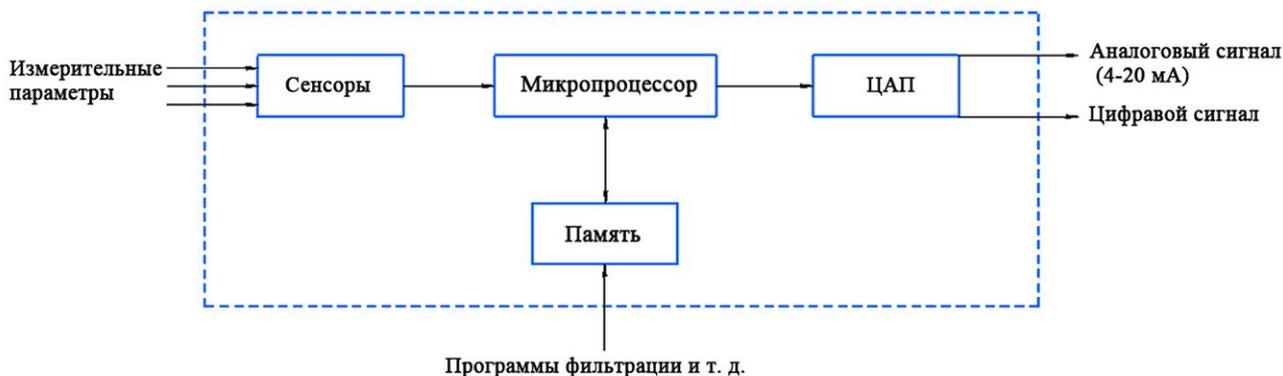


Рис. 5. Структурная схема интеллектуального датчика

Рефрактометр будет производить периодичный анализ химических свойств пропиленгликоля и передавать данную информацию на верхний уровень через интерфейсный сигнал RS485 по протоколу Modbus RTU.

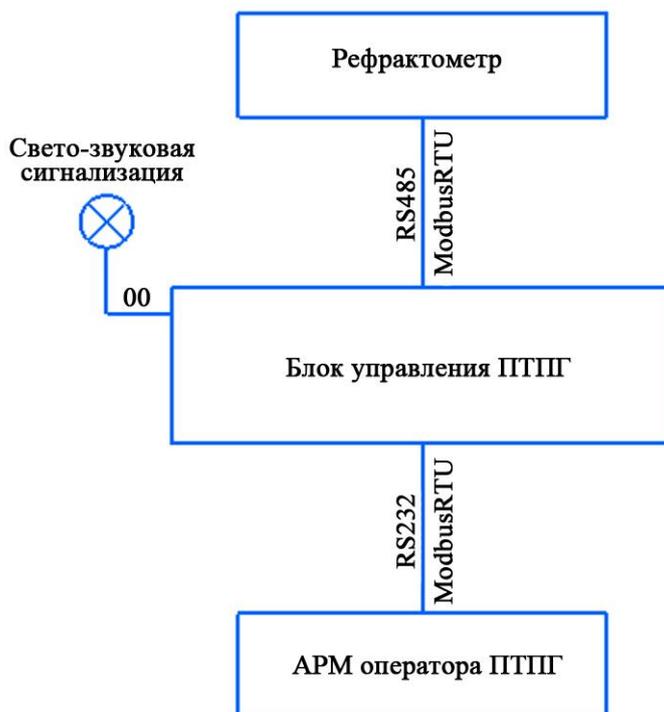


Рис. 6. Структурная схема внедрения рефрактометра в блок управления ПТПГ

Благодаря полученной информации от рефрактометра на приборной панели блока управления подогревателем газа будет отображаться процентное соотношение концентрации пропиленгликоля в теплоносителе.

Все полученные данные будут заноситься в архив, на основе данных показаний в дальнейшем можно будет прогнозировать, в какой момент теплоноситель теряет свои качества и приводит к аварии.

Для реализации данной задачи необходимо разработать чувствительные сенсоры, принцип и алгоритм работы которых будет описан в следующих работах.

Заключение

Благодаря внедрению данного рефрактометра эксплуатирующий персонал будет своевременно оповещен об ухудшениях химических свойств пропиленгликоля и сможет произвести замену данного теплоносителя или добавить необходимые химические добавки для восстановления необходимых параметров вещества, что приведет к увеличению срока службы подогревателя газа и предотвратит аварийную ситуацию.

Список источников

1. Золотаревский С.А. Газоснабжение в зимних условиях: проблемы комфортности и безопасности // Трубопроводная арматура и оборудование. 2016. № 6 (87). С. 58-61.
2. Агабабян Р.Е., Соловьёва Н.М., Хворостян П.В. Рекомендации по подбору подогревателей газа для использования в составе ГРС, КС // Вестник Газпромаша. 2007. Вып. 1. С. 28-45.
3. Маслин А.Г., Хворостян П.В. Оптимизация конструкции подогревателя газа с промежуточным теплоносителем // Газовая промышленность. 2009. № 2 (628). С. 80-82.
4. Хворостян П.В. Особенности применения различных видов теплоносителя в подогревателях газа с промежуточным теплоносителем // Газовая промышленность. 2009. № 2 (628). С. 68-69.
5. Орлов И.Р. Исследование нефтяных дисперсных систем рефрактометрическим методом. Москва, 2004. С. 5-7.
6. Ловдар Ю.А. Интеллектуальные датчики и особенности их эксплуатации // European Student Scientific Journal. 2013. № 2. URL: <https://sjes.esrae.ru/ru/article/view?id=93>
7. Молчанов Д.В. Автоматические системы розжига в подогревателях газа // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т имени Гагарина Ю.А., 2022. С. 49-52.

Сведения об авторе

Молчанов Дмитрий Вадимович –
аспирант кафедры «Техническая механика
и мехатроника» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry V. Molchanov–
Postgraduate, Department
of Technical Mechanics and
Mechatronics, Yuri Gagarin State
Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 26.02.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

УДК 621.763, 620.17, 620.172.242, 620.172.225, 620.178.72

И.В. Головченко, Д.Ю. Финогеев, О.П. Решетникова

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ФОТОПОЛИМЕРОВ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

***Аннотация.** Рассмотрены основные материалы, применяемые для фотополимерной печати, и их области применения. Приводится обзор научных работ в области изучения механических свойств наполненных фотополимеров. Делается вывод о важности проведения работ в этой области в связи с широким внедрением аддитивных технологий в машиностроении.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, наполненные фотополимерные смолы, фотополимерные смолы, механические свойства, 3D-печать, машиностроение, DLP-печать*

I.V. Golovchenko, D.Yu. Finogeev, O.P. Reshetnikova

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF FILLED PHOTOPOLYMERS IN THE AREA OF ADDITIVE TECHNOLOGIES

***Abstract.** The basic materials used in photopolymer printing and their applications are considered. and an overview of scientific works relating the study of mechanical properties of filled photopolymers is provided. In the conclusion the focus is made on the importance of conducting research in the given area due to a widespread introduction of additive technologies into machine building industry.*

***Keywords:** additive technologies, filled photopolymer resins, photopolymer resins, mechanical properties, 3D-printing, machine building, DLP-printing*

Введение

На рубеже последнего двадцатилетия в машиностроительной отрасли наблюдается процесс изучения и изготовления изделий с применением аддитивных производственных технологий [1-4].

Использование аддитивного производства позволяет производить сложные по конфигурации и форме изделия, которые невозможно или очень дорого получить при помощи классической механической обработки.

Для производства изделий методами аддитивного производства применяются следующие материалы: металлы, полимеры, керамика, металлы (порошок; проволока), органические материалы, фотополимеры, воск. После получения изделия они проходят термическую обработку, обработку УФ излучением и др., что меняет свойства исходного материала.

Многие ученые занимаются разработкой новых материалов для аддитивного производства и изучением их свойств. Однако внедрение аддитивных технологий (АТ) не получает широкого распространения ввиду малого количества информации о механических свойствах и характеристиках получаемых изделий.

В настоящее время широкое распространение получил метод фотополимерной печати (DLP). Данным методом возможно получать изделия из следующих видов смол:

а) инженерная смола – изделия из данной смолы обладают улучшенными характеристиками, такими как высокая термостойкость и ударная прочность материала;

б) гибкие смолы – детали, выращенные из данного вида смол, будут схожи с силиконовыми или резиновыми изделиями, где основным фактором при их исследовании будет служить стойкость к разрывам;

в) стоматологические смолы – из названия данных смол можно сделать вывод, что они используются большим спросом в стоматологических клиниках, где изготавливают элайнеры или выращивают модели десен для исследования;

г) выжигаемые смолы – данные смолы используются не только в машиностроении или ювелирном производстве; также используются в стоматологии, так как данные смолы обладают наименьшим содержанием зольности для прямого литья;

е) стандартные смолы – используют для построения декоративных моделей.

Изготовленные изделия из рассмотренных выше материалов достаточно часто применяются в машиностроительной отрасли, медицине, производстве бытовых приборов, электроники и т. д.

Повышенные требования к эксплуатационным и механическим свойствам изделий приводят к необходимости поиска новых материалов и технологических решений в области аддитивного производства. Так, одним из перспективных направлений исследований в области DLP-печати являются разработка и изучение свойств наполненных фотополимерных смол [5].

Анализ механических свойств наполненных фотополимеров

Традиционно для изготовления изделий технологией DLP используется фотополимерная смола, которая позволяет выращивать детали сложной конфигурации с определенными физико-механическими свойствами. В состав фотополимерных смол входят три основных компонента: 1) олигомер; 2) мономер; 3) фотоинициаторы. Данные компоненты, каждый по-своему влияет на конечные качества изготавливаемых деталей и их технические параметры. Однако фотополимеры в чистом виде после печати часто не обладают необходимыми физико-механическими свойствами (например, прочностью), предъявляемыми к изделиям машиностроительной отрасли [5]. На сегодняшний день перспективным направлением исследований является получение и изучение наполненных фотополимеров, которое в нашей стране мало развито, поэтому рассмотрим основные работы в области изучения механических свойств материалов, полученных методами DLP печати.

1) В работе [6] были изучены механические свойства при добавлении разного процентного содержания GnP (графеновые нанопластины) в полиуретановую смолу (PU – состав: 45-47 % полиуретанакрилата; 34-36 % морфолина и 15-17 % диакрилата трипропиленгликоля) для изучения дисперсии и улучшения механических свойств 3D-печатного продукта.

2) В процессе испытаний был добавлен 1 % GnP, что позволило повысить предел прочности изделия на 21 % по сравнению с полиуретановой смолой, т. к. добавление графена повышает прочность полимера благодаря большой площади поверхности компонента и высокому соотношению сторон (рис. 1, табл. 1). Также добавление GnP в полиуретановую смолу позволило улучшить модуль Юнга (продольная упругость) напечатанного образца до 1 %, а GnP – на 24 % по сравнению с чистой полиуретановой смолой. Однако последующее добавление более чем 1 % GnP снижает модуль Юнга, а пластические свойства напечатанных образцов PU-GnP ухудшаются по сравнению с образцами, напечатанными из чистого PU. Снижение свойств при растяжении при высоком содержании наполнителя (больше 1 %) объясняется нарушением свойств отверждения при ультрафиолетовом излучении (УФ) и агломерации наполнителя.

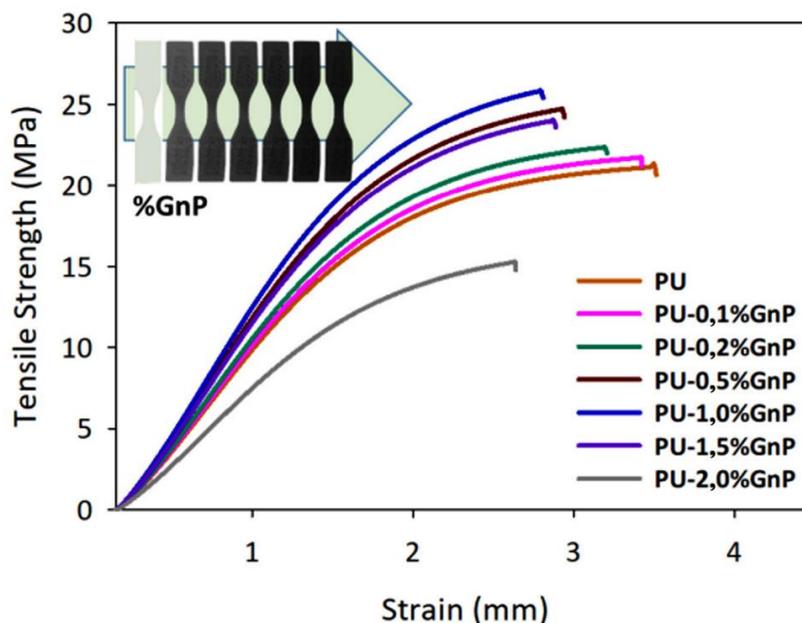


Рис. 1. Предел прочности образцов с содержанием PU-GnP [6]

Таблица 1

Механические свойства образцов PU-GnP [6]

| Образцы | Предел прочности, МПа | Модуль Юнга, МПа |
|-------------|-----------------------|------------------|
| PU | 21,32 ± 0,13 | 9,77 ± 0,14 |
| PU-0,1% GnP | 21,73 ± 0,19 | 10,07 ± 0,17 |
| PU-0,2% GnP | 22,37 ± 0,25 | 10,46 ± 0,18 |
| PU-0,5% GnP | 24,72 ± 0,21 | 11,52 ± 0,24 |
| PU-1,0% GnP | 25,83 ± 0,17 | 12,16 ± 0,21 |
| PU-1,5% GnP | 24,01 ± 0,23 | 11,23 ± 0,19 |
| PU-2,0% GnP | 17,09 ± 0,23 | 8,16 ± 0,19 |

На рис. 2а показана поверхность разрушения образца из полиуретана, напечатанного на 3D-принтере, после испытаний на растяжение, на котором видны чистые трещины и плоская поверхность матрицы полиуретана. На рис. 2б GnP отчетливо заметен в небольшом количестве на поверхности полиуретана с содержанием GnP, равным 1 %. Процесс гомогенизации полиуретана с содержанием GnP улучшил диспергируемость GnP в полиуретановой матрице, что повысило прочность печатного изделия на разрыв, как показано на рис. 2в. GnP требует высокоскоростной механической гомогенизации по сравнению с графеном, который имеет слоистую структуру, чтобы иметь лучшую дисперсию в полиуретановой матрице. Синергетическое взаимодействие между PU и GnP улучшило свойства 3D-печатных композитов.

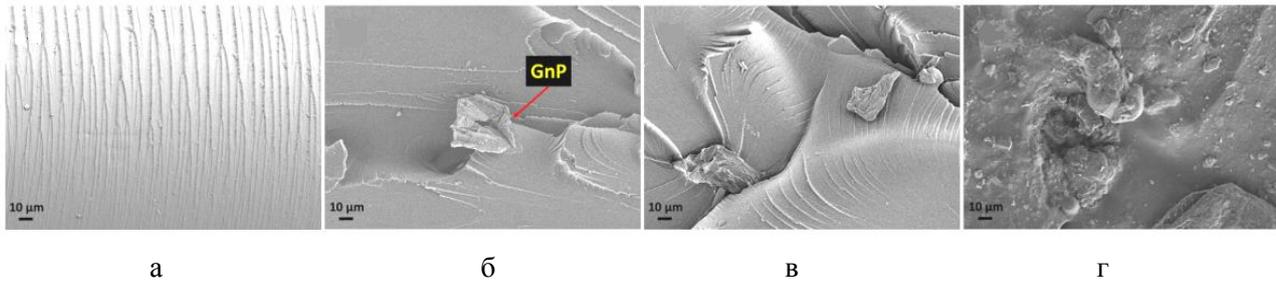


Рис. 2. Морфологический анализ образцов с трещинами:
 а) PU; б) PU-0,1% GnP; в) PU-1,0% GnP; г) поперечное сечение PU-1,0% GnP [6]

В дальнейшем добавление GnP в полиуретановую матрицу снизило прочность печатного изделия, из-за высокой способности к УФ-отверждению и наличию пустот из-за высокой агломерации частиц.

3) в работе [7] проводится исследование механических свойств композитов на основе графена и фотополимерной смолы. В процессе получения композитной смеси были отпечатаны образцы с тремя разными толщинами слоев (35, 50, 100 мкм). После отпечатывания образцов было произведено сравнение механических свойств образцов из чистой фотополимерной смолы, а также образцов с добавлением композита на основе графен-смола, где концентрация графена составляла 0,5 и 1 % от массовой доли. После отпечатывания образцов производилось предварительное тестирование на растяжение. После обработки результатов экспериментов авторами работы были получены результаты, представленные в табл. 2-4.

Таблица 2

Среднее значение с учетом стандартных отклонений (SD) модуля Юнга, предела прочности при растяжении (UTS), относительное удлинение при растяжении (UTS) и относительное удлинение при разрыве образцов [7]

| Параметры печати | | | Модуль Юнга, МПа | SD (±) | UTS, МПа | SD (±) | Удлинение при растяжении, % | SD (±) | Относительное удлинение при разрыве образцов, % | SD (±) |
|------------------|--------------------|------------------|------------------|--------|----------|--------|-----------------------------|--------|---|--------|
| Материал | Содерж. графена, % | Высота слоя, мкм | | | | | | | | |
| Чистая смола | 0 | 35 | 917,66 | 116,80 | 49,17 | 3,96 | 5,39 | 0,49 | 6,79 | 2,17 |
| | | 50 | 847,46 | 1,81 | 45,17 | 3,31 | 5,33 | 0,38 | 7,40 | 0,73 |
| | | 100 | 841,78 | 132,46 | 45,16 | 4,88 | 4,48 | 1,44 | 7,42 | 2,45 |
| Графен композит | 0,5 | 35 | 890,87 | 98,25 | 28,74 | 3,30 | 3,23 | 0,27 | 3,24 | 0,28 |
| | | 50 | 864,76 | 132,81 | 34,82 | 0,79 | 4,09 | 0,59 | 4,09 | 0,59 |
| | | 100 | 807,09 | 63,90 | 26,66 | 2,80 | 3,30 | 0,15 | 3,31 | 0,16 |
| | 1 | 35 | 715,85 | 101,54 | 29,76 | 1,96 | 4,23 | 0,78 | 4,27 | 0,82 |
| | | 50 | 635,78 | 65,69 | 20,53 | 3,82 | 3,22 | 0,36 | 3,22 | 0,37 |
| | | 100 | 611,06 | 221,45 | 18,23 | 4,22 | 3,18 | 0,72 | 3,19 | 0,72 |

Машиностроение

Графен характеризуется высокими механическими свойствами, однако при рассмотрении данных таблицы наблюдается обратный эффект, механическое поведение образцов не улучшилось, когда были добавлены графеновые нанопластины. При дальнейшем увеличении концентрации графена механические свойства ухудшались. Данные свойства могут быть связаны с наличием пузырьков, которые образуются в объеме матрицы во время DLP-печати в процессе добавления графена. Известно, что графен способствует рассеиванию УФ-света и уменьшает процесс отверждения, что приводит к наличию близких неполимеризованных областей. В данном случае это позволило повысить пористость, однако эффект затвердевания и упрочнения графеновых пластинок были затруднены.

При рассмотрении образцов из чистой смолы их показатели показали лучшие механические свойства, независимо от высоты слоя. Модуль Юнга и предел прочности при растяжении (UTS) выявил разницу в 33,41 и 62,92 % между высокими (для чистой смолы 35 мкм) и самыми низкими (для графена 100 мкм, содержащего 1 % массовой доли) приведенными значениями. Уменьшение показателей общих механических характеристик, рассматриваемых с точки зрения влияния толщины печатного слоя и включения графена, представлены в табл. 3 и 4. В представленных таблицах образцы, отпечатанные с толщиной печатного слоя, равной 35 мкм, являются эталонами, так как по данным показателям идет сравнение всех представленных расчетов.

Таблица 3

Разница в значениях, касающаяся влияния толщин слоя,
по сравнению с эталонным образцом для каждого условия [7]

| Параметры печати | | Разница в значениях | | | |
|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|--|
| Концентрация графена, % | Толщина слоя, мкм | Модуль Юнга | Предел прочности при растяжении | Удлинение при растяжении | Относительное удлинение при разрыве образцов |
| 0 | 35 | 917,66 (МПа) | 49,17 (МПа) | 5,39 (%) | 6,79 (%) |
| | 50 | -7,65 % | -8,14 % | -1,11 % | +8,98 % |
| | 100 | -8,27 % | -8,16 % | +1,67 % | +9,28 % |
| 0,5 | 35 | 890,87 (МПа) | 28,74 (МПа) | 33,23 (%) | 3,24 (%) |
| | 50 | -2,29 % | +21,15 % | +26,63 % | +26,23 % |
| | 100 | -9,40 % | -7,24 % | +2,17 % | +2,16 % |
| 1 | 35 | 715,85 (МПа) | 29,76 (МПа) | 4,23 (%) | 4,27 (%) |
| | 50 | -11,18 % | -31,01 % | -23,88 % | -24,59 % |
| | 100 | -14,64 % | -38,74 % | -24,82 % | -25,29 % |

Таблица 4

Разница в значениях, касающихся эффекта добавления графена, по сравнению с эталонным образцом для каждого условия [7]

| Параметры печати | | Разница в значениях | | | |
|-------------------|----------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|--|
| Толщина слоя, мкм | Концентрация графена | Модуль Юнга | Предел прочности при растяжении | Удлинение при растяжении | Относительное удлинение при разрыве образцов |
| 35 | 0 | 917,66 (МПа) | 49,17 (МПа) | 5,39 (%) | 6,79 (%) |
| | 0,5 | -2,92 % | -41,55 % | -40,07 % | -52,28 % |
| | 1 | -21,99 % | -39,48 % | -21,52 % | -37,11 % |
| 50 | 0 | 847,46 (МПа) | 45,17 (МПа) | 5,33 (%) | 7,40 (%) |
| | 0,5 | +2,04 % | -22,91 % | -23,26 % | -44,73 % |
| | 1 | -24,98 % | -54,55 % | -39,59 % | -56,48 % |
| 100 | 0 | 841,78 (МПа) | 45,16 (МПа) | 5,48 (%) | 7,42 (%) |
| | 0,5 | -4,12 % | -40,97 % | -39,78 % | -55,39 % |
| | 1 | -27,41 % | -59,63 % | -41,97 % | -57,01 % |

Испытуемые образцы из чистой смолы показали лучшие механические свойства (с точки зрения модуля Юнга, UTS – предел прочности при растяжении, удлинения при UTS и удлинения при разрыве) по сравнению с композитом на основе графен/смола независимо от высоты слоя. Наибольшая разница в 33,41 и 62,92 % относительно модуля Юнга и предела прочности при растяжении (UTS), соответственно, между самым высоким (чистая смола) и самым низким (графен 1 %) полученными значениями. Между тем дисперсия последовательно приближалась к 41,97 и 57,01 % для удлинения при UTS и удлинения при разрыве. Очевидно, что добавление графена в качестве жесткого армирования к полимеру вызвало снижение пластичности. Однако это может привести к предположению, что полученный композит может быть потенциальным материалом для подшипников скольжения, где трибологические свойства гораздо важнее механических свойств.

В работе [8] производится исследование разработанной композитной смолы с низкой плотностью и высоким модулем упругости, и добавлением высокой объемной доли полых стеклянных микросфер. Добавление стеклянных микросфер позволит выдерживать длительное время печати, а также позволит изготавливать объекты, содержащие сложные геометрические формы. В качестве испытуемых образцов использовались образцы из трех видов смол с добавлением композита, это смолы: а) PR48 – фотополимерная смола, разработанная Autodesk; б) MF – модифицированная смола, основанная на PR48, а также обладает улучшенными характеристиками вязкости и стабильности. Смола

Машиностроение

MF содержит 73,89 % массовой доли акрилового мономера (ЕРТ), 25,63 % массовой доли разбавителя (ВАСА), 0,37 % массовой доли фотоинициатора (ТРО) и 0,11 % массовой доли УФ-поглотителя (ТРТ); в) MF-HG – модифицированная смола (MF) с добавлением полых стеклянных микросфер.

В процессе испытаний образцов проводились эксперименты по динамическому механическому анализу (DMA). Модуль накопления (E') и потери (E'') отвержденных полимерных систем PR48, MF и MF-HG были определены для понимания влияния модификации смолы и добавления композита низкой плотности на механические свойства. Поверхности, не прошедшие процесс отверждения, наблюдались в исходном образце из-за ингибирования кислорода, который препятствует процессу отверждения, поэтому напечатанные образцы подвергались последовательному отверждению в атмосфере азота.

Применение отверждения в атмосфере азота показало, что оно позволяет устранить проблему недоотверждения поверхностей. Для каждой полимерной системы из отдельных партий были отпечатаны несколько образцов, которые впоследствии были охарактеризованы, чтобы понять повторяемость модуля и однородность процесса печати. На рис. 3 показаны данные по модулю накопления (E') и потери (E'') для PR48, MF и MF-HG. В табл. 5 приведены значения модуля упругости при хранении (E') и потери (E'') образцов при температуре 20° С.

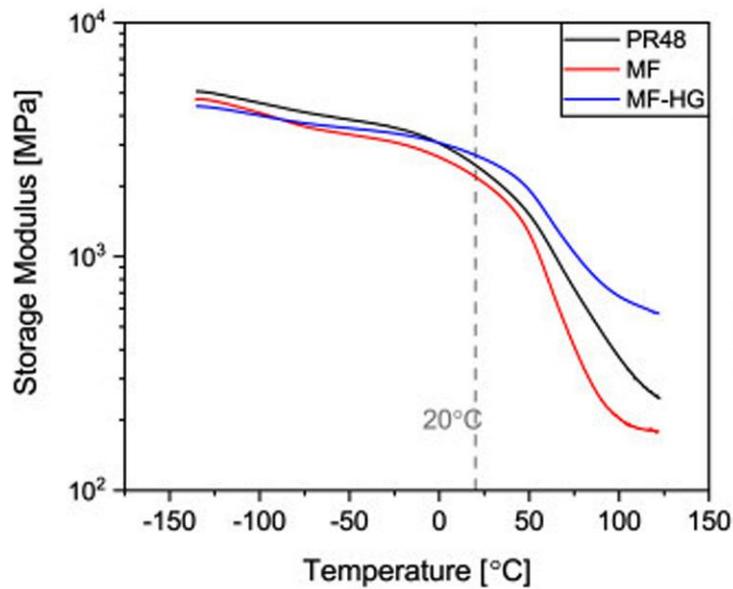
Таблица 5

Модуль накопления (E') и модуль потерь (E'')
для образцов PR48, MF и MF-HG при температуре 20° С [8]

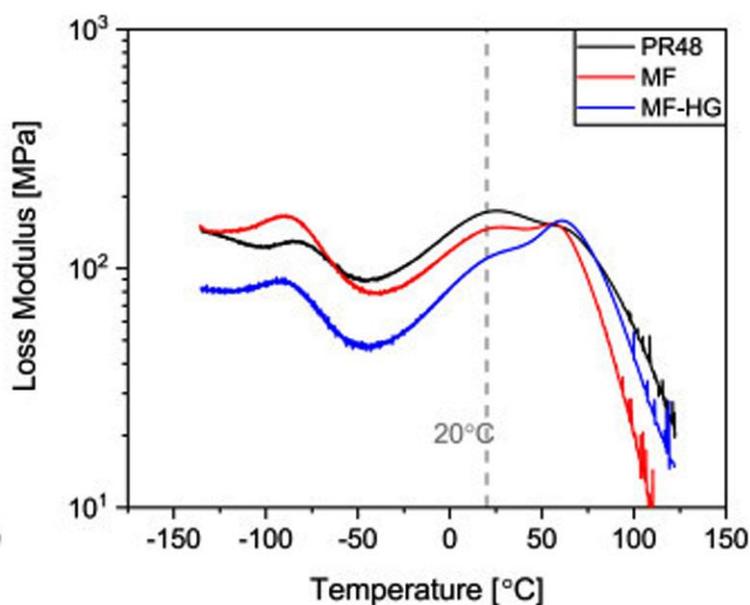
| Смола | Количество образцов | Модуль накопления E' , ГПа | Модуль потерь E'' , МПа |
|-------|---------------------|------------------------------|---------------------------|
| PR48 | 6 | 2,43 ± 0,03 | 170,18 ± 8,00 |
| MF | 4 | 2,22 ± 0,10 | 140,55 ± 7,95 |
| MF-HG | 5 | 2,69 ± 0,07 | 114,24 ± 5,82 |

Модуль упругости для смолы MF в процессе исследования был снижен на 8,5 %. Добавление армирующих элементов с низкой плотностью увеличивает модуль прочности при хранении на 11 % для смолы MF-HG по сравнительным данным со смолой PR48, несмотря на резкое снижение плотности при одновременном снижении модуля потерь примерно на 33 %. Модуль хранения смолы MF-HG увеличился примерно на 21 % по сравнению с системой смолы MF. Увеличение модуля упругости при хранении объясняется наличием более жестких наполнителей из полого стекла. Полые стеклянные микросферы с отношением радиусов $\eta < 0,955$ и плотностью выше 0,37 г/см³ имеют более высокий

модуль упругости по сравнению с их аналогами из чистой смолы. Аналогичная тенденция наблюдается и в характеристиках растяжения, где смола MF-HG имеет примерно на 61 % более высокий модуль упругости, чем смола MF. Процентное увеличение модуля может варьироваться в зависимости от физических свойств матрицы. Включение поллой стеклянной микросферы обеспечивает лучшую термическую стабильность по модулю при более высоких температурах до 125° С по сравнению со смолой PR48.



а



б

Рис. 3. (а) Модуль накопления E' ; (б) Модуль потерь E'' для образцов PR48, MF и MF-HG в зависимости от температуры [8]

Машиностроение

В данном исследовании демонстрируется стабильная суспензия фотополимерной смолы, содержащая 50 % объема полых стеклянных микросфер в качестве наполнителей в смоле на основе акрилата. Суспензия демонстрирует минимальное или полное отсутствие образования пены и агрегации наполнителя в течение реального времени печати, что приводит к снижению значений плотности. Стабильность смолы была обеспечена благодаря определению диспергатора и его концентраций, которые по сравнению с составами, не содержащим диспергатора, обеспечивали снижение скорости расслаивания на 54 % и снижение вязкости на 23 % при скоростях сдвига, соответствующих условиям печати. Механическая структура из метаматериала со сложными геометрическими элементами была успешно изготовлена, разрешив отрицательные элементы толщиной 500 мкм и положительные элементы толщиной 400 мкм. Плотность материала была снижена на 34 % – с 1,23 до 0,81 г/см³, а модуль упругости был увеличен примерно на 11 % – с 2,43 до 2,69 ГПа. Измеренная плотность близко совпадает с оценками плотности, рассчитанными с использованием правила смесей. Было обнаружено, что распределение наполнителей в зависимости от глубины и времени печати является равномерным с отклонением всего на 4 % в течение 165 минут печати. Данные компьютерной томографии не выявили явной агрегации наполнителей, присутствующих в изготовленном образце.

Разработанная композитная смола может быть использована для изготовления функциональных прототипов с низкой плотностью и высоким модулем упругости в различных отраслях промышленности, чувствительных к массе. Подход к определению характеристик также может быть использован для создания стабильных систем материалов с более низкой плотностью при соответствующем выборе наполнителя и условиях печати.

Выводы

На сегодняшний момент времени процесс изучения фотополимерных смол не стоит на месте и развивается стремительными шагами, однако также присутствуют определенные пробелы в изучении и влиянии композитов в связке с фотополимерными смолами, которые получили название наполненные фотополимерные смолы.

Анализ механических свойств наполненных фотополимерных смол в машиностроительной отрасли в настоящее время позволяет найти альтернативный способ изготовления изделий из пластика методами аддитивного производства. Применение таких методов позволит сократить трудоемкость и повысить производительность производства. При этом в первую очередь необходимо обращать внимание на механические свойства нового материала, так как он должен соответствовать (взаимозаменять) материалу аналога.

Список источников

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства / пер. с англ. И.В. Шишковского. Москва: Техносфера, 2020. 646 с.
2. 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.
3. Simpson P., Holthaus M., Gibbon L., et al. (2022) Perspective Chapter: Composites Manufactured by Stereolithography. Advanced Additive Manufacturing. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.101441.
4. Velu R., Sathishkumar R. and Saiyathibrahim A. (2022) Perspective Chapter: Multi-Material in 3D-Printing for Engineering Applications. Advanced Additive Manufacturing. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.102564.
5. Головченко И.В., Финогеев Д.Ю. Обзор работ в области изучения свойств и характеристик наполненных фотополимеров // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. науч. статей 12-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 01 ноября 2022 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 92-96.
6. 3D-Printed Polyurethane Reinforced Graphene Nanoplatelets URL: https://www.researchgate.net/publication/350489283_3D_Printed_Polyurethane_Reinforced_Graphene_Nanoplatelets (дата обращения: 24.01.2023).
7. Investigations of the Mechanical Properties of DLP 3D Printed Graphene/Resin Composites URL: https://www.researchgate.net/publication/354636686_Investigations_of_the_Mechanical_Properties_of_DLP_3D_Printed_GrapheneResin_Composites (дата обращения: 24.01.2023).
8. Highly filled resins for DLP-based printing of low density, high modulus materials URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420311088?via%3Dihub> (дата обращения: 24.01.2023).

Сведения об авторах

Головченко Илья Вячеславович – магистрант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Цуа V. Golovchenko – Master student, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Машиностроение

Финогеев Даниил Юрьевич –
магистрант кафедры «Технология
машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Daniil Yu. Finogeev –
Master student, Department of
Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Решетникова Ольга Павловна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного
технического 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 18.01.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

О.В. Захаров, А.С. Яковишин, Ф.Д. Сулейманова, А.В. Жуков

**ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ СЕРИИ ISO 16610
ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ. ЧАСТЬ 4.
ПРОФИЛЬНЫЕ СПЛАЙН И ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРЫ**

Аннотация. Вашему вниманию предлагается четвертая статья из цикла, посвященного применению серии стандартов ISO 16610 для фильтрации профиля и структуры поверхности. В настоящей статье представлен анализ профильных линейного и робастного сплайн и вейвлет-фильтров. Проведено сравнение с фильтрами Гаусса по пяти параметрам. Установлено, что сплайн фильтры имеют быстрый алгоритм расчета, что позволяет использовать их для больших объемов данных. Робастный сплайн фильтр имеет преимущество перед фильтром Гаусса, так как устраняет конечные эффекты и не требует выравнивания формы профиля. Вейвлет-фильтр является идеальным многомасштабным фильтром. Поэтому данные типы фильтров расширяют возможности стандартных фильтров Гаусса для анализа мультифункциональных поверхностей.

Ключевые слова: измерение, метрология поверхности, шероховатость, фильтрация, профильный фильтр, сплайн фильтр, вейвлет-фильтр

O.V. Zakharov, A.S. Yakovishin, F.D. Suleymanova, A.V. Zhukov

**APPLICATION OF ISO 16610 SERIES
FILTERS IN THE SURFACE STRUCTURE ANALYSIS.
PART 4. PROFILE SPLINE AND WAVELET FILTERS**

Abstract. The authors focus on the fourth article in the series devoted to application of the ISO 16610 series of standards applied for filtering profiles and surface textures. The article presents an analysis of profile linear, robust spline, and wavelet filters. A comparison is made with the Gaussian filters across five parameters. It has been established, that spline filters have a fast calculation algorithm, which allows them to be used for large amounts of data. The robust spline filter has an advantage over the Gaussian filter, as it eliminates end effects and does not require profile shape alignment. The wavelet filter is an ideal multiscale filter. Therefore,

these types of filters expand the capabilities of standard Gaussian filters needed for the analysis of multifunctional surfaces.

Keywords: *measurement, surface metrology, roughness, filtration, profile filter, spline filter, wavelet filter*

Настоящая статья завершает цикл статей [1-3] по профильным фильтрам серии стандартов ISO 16610 [4]. Рассматриваются история создания, теоретические основы, особенности применения и в заключение – достоинства и недостатки данной группы фильтров. В настоящее время стандартизованы фильтры: линейный сплайн [5], линейный вейвлет [6], нелинейный робастный сплайн [7].

Теоретическая основа сплайн фильтров

Сплайн фильтры получили свое название из-за того, что эталонная линия, полученная в результате фильтрации, является сплайном. К семейству сплайнов относятся самые разные функции.

Наиболее известны полиномиальные сплайны третьей степени, также называемые кубическими сплайнами. Эти функции состоят из кусочных полиномов третьей степени, которые достаточно гладкие.

Сплайн фильтр был разработан, чтобы избежать недостатков фильтра Гаусса [8]. В отличие от последнего это – чисто цифровой фильтр, т. е. нет необходимости дискретизировать весовую функцию. Следовательно, реализация сплайн фильтра подразумевает меньше неопределенностей, благодаря чему результаты фильтрации для разных программных продуктов лучше согласуются, чем в случае с фильтром Гаусса. Сплайн фильтры – это линейные фильтры. Однако их весовые функции не могут быть заданы в простой замкнутой форме. Вместо этого для сплайн-фильтров определяются уравнения фильтрации, и при необходимости дается численный расчет весовой функции. Эти уравнения фильтра представляют собой линейные матричные уравнения с простой структурой. Их алгоритмическая реализация приводит к программам, которые работают намного быстрее, чем все известные в настоящее время алгоритмы, использующие фильтр Гаусса. Время вычислений для алгоритма сплайн фильтра составляет примерно половину алгоритма свертки на основе быстрого преобразования Фурье для фильтра Гаусса.

Кубические сплайны представляют собой геометрические кривые, которые плавно соединяют ряд точек. После применения фильтра кубического сплайна кривая сплайна проходит не через точки данных, а через точки подвеса (рис. 1). Эти точки связаны с точками данных с помощью пружины, характеризуемой жесткостью пружины β , которая

называется параметром натяжения. Установка этой пружинной константы (значение от 0 до 1) позволяет управлять поведением фильтра [9].

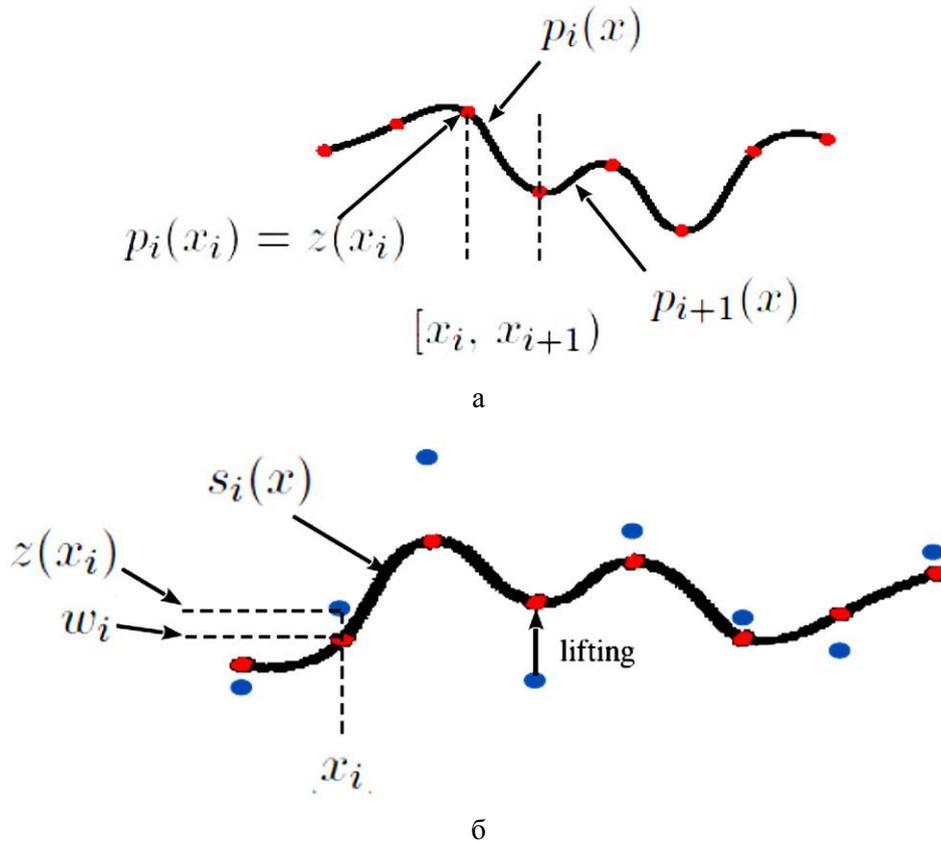


Рис. 1. Принципы сплайн-интерполяции (а) и сглаживающей сплайн-аппроксимации (б) профиля [10]

Линейный сплайн фильтр был предложен М. Krystek [11] в качестве дополнительного метода для профильного фильтра Гаусса. По сравнению со стандартным фильтром Гаусса он имеет преимущество в виде отсутствия конечного эффекта [12] и хорошо повторяет форму профиля. Пример фильтрации профилями сплайн и Гаусса приведен на рис. 2. Видно, что сплайн фильтр практически не подвержен влиянию конечных эффектов и может использовать для оценки всю длину профиля. Позднее был разработан робастный сплайн фильтр, менее подверженный влиянию выбросов, на основе нелинейной процедуры на норме L1 [7]. В дальнейшем Т. Goto сообщил о разработке робастного сплайн фильтра, основанного на норме L2 [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.

В соответствии со стандартом [4] достоинством сплайн фильтра будет линейная и нелинейная Фурье-интерпретация, не требуется вычитание низкочастотной составляющей

щей, конечные эффекты устранимы, возможен анализ данных со случайным шагом. Это позволяет использовать сплайн фильтр для оценки профилей, измеренных на координатно-измерительных машинах, наряду с морфологическими фильтрами [14]. Дополнительно сплайн вейвлет-фильтр определяет выбросы и лишен конечных эффектов. Недостатком является большое число различных типов материнских вейвлетов и трудность интерпретации с помощью Фурье длин волн. Поэтому диапазон применения сплайн и вейвлет-фильтров к настоящему времени не полностью установлен.

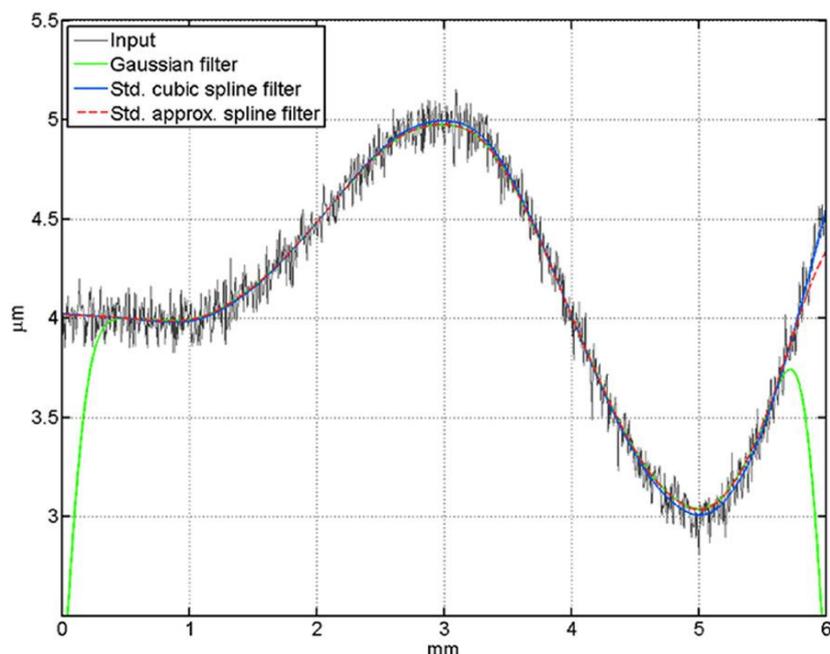


Рис. 2. Результат фильтрации сплайн и Гаусса фильтрами [15]

Линейный сплайн фильтр

Реализация сплайн фильтров основана на использовании вариационных подходов и метода регуляризации Тихонова [16]. 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 сплайн фильтр определяется с помощью алгоритма матричной декомпозиции [17]. Стандарт определяет два условия: аperiодическое и периодическое для фильтрации с открытым и закрытым профилями соответственно. Фильтрация открытого профиля применима к прямолинейным профилям, а закрытого профиля – к круглости [18]. Сплайновый фильтр устраняет конечные эффекты путем настройки граничных условий P и Q , где P – член линейного сплайна, а Q – член кубического сплайна. Уравнение сплайн фильтра имеет вид

$$[1 + \beta\alpha^2 P + (1 - \beta)\alpha^4 Q] \cdot w = z,$$

где z, w – вектор входных и выходных (фильтрованных) значений профиля соответственно, β – параметр натяжения (подобие характеристики передачи фильтра Гаусса), $0 \leq \beta \leq 1$.

Параметр α определяет частотные (волновые) свойства фильтра и рассчитывается по формуле [19]

$$\alpha = \frac{1}{2 \sin(\pi \Delta x / \lambda_c)},$$

где Δx – интервал дискретизации, λ_c – предельная длина волны профильного фильтра.

Матрицы P и Q имеют следующий вид [5]:

для открытого профиля

$$P = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 5 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 5 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

для закрытого профиля

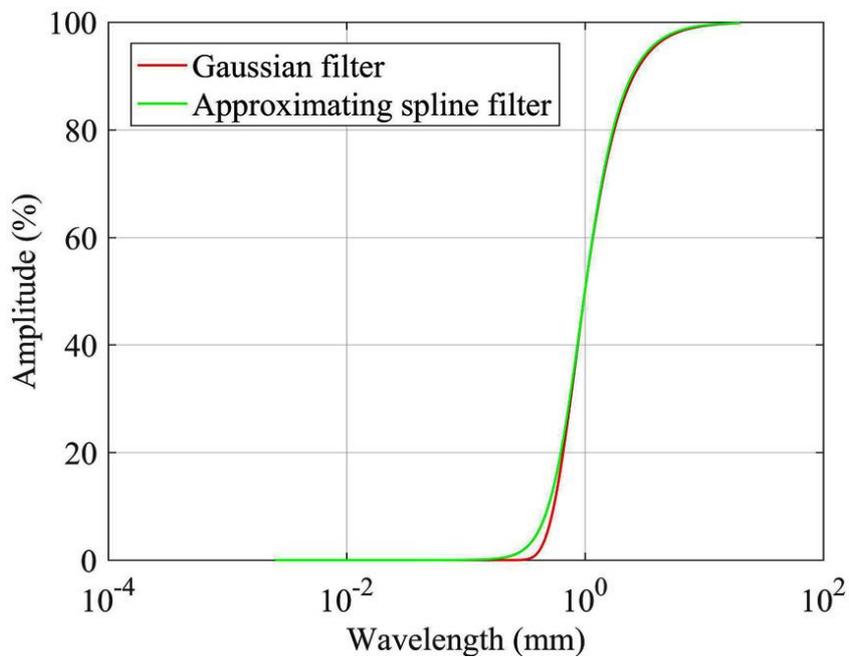
$$P = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 \\ -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 \\ -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 \end{bmatrix}$$

Передаточная характеристика длинноволновой компоненты аппроксимируется следующим выражением:

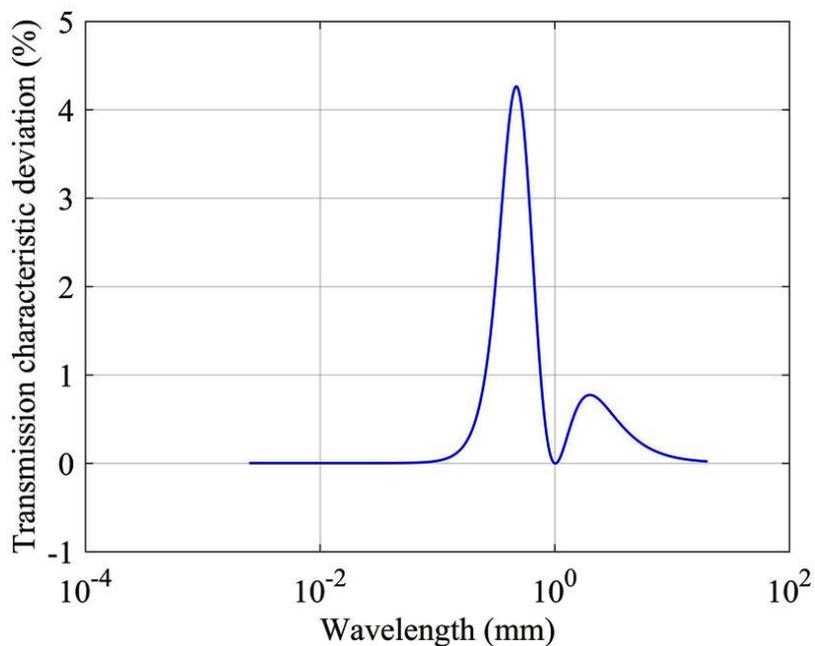
$$\frac{a_1}{a_0} = \left[1 + \beta\alpha^2 \sin^2 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} + 16(1 - \beta)\alpha^4 \sin^4 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} \right]^{-1}.$$

В исследовании [20] было выполнено сравнение вычислительной эффективности сплайн и Гаусса фильтров и выявлено, что сплайновый фильтр быстрее. Как показано на

рис. 3 а, характеристики передачи аппроксимирующего сплайн-фильтра первого порядка могут хорошо приближаться к фильтру Гаусса. Отклонение характеристики передачи между аппроксимирующим сплайном первого порядка и фильтром Гаусса достигает минимального значения 4,26 %, как показано на рис. 3 б.



а



б

Рис. 3. Характеристики передачи аппроксимирующего сплайна и фильтра Гаусса (а) и отклонение характеристики передачи (б) [16]

На рис. 4, 5 показано, что линейный сплайн фильтр может очень хорошо обрабатывать данные со значительным компонентом формы и без конечного эффекта [21]. Это позволяет применять сплайн фильтр для оценки шероховатости различных поверхностей, в том числе и нанометрового диапазона [22, 23], а также решения прикладных задач сборки и трибологии [24, 25].

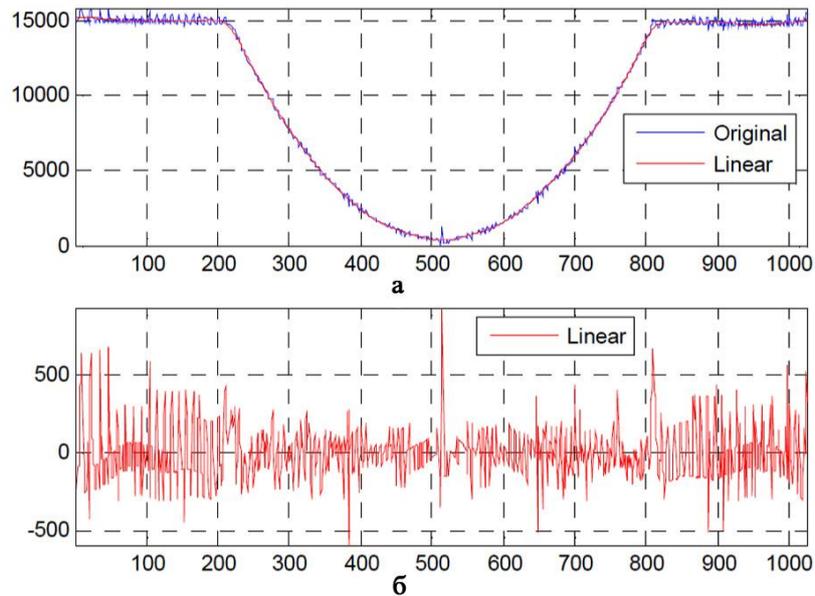


Рис. 4. Линейный сплайн фильтр (профиль пресс-формы):
 а – первичный профиль и эталонная линия, б – профиль шероховатости [21]

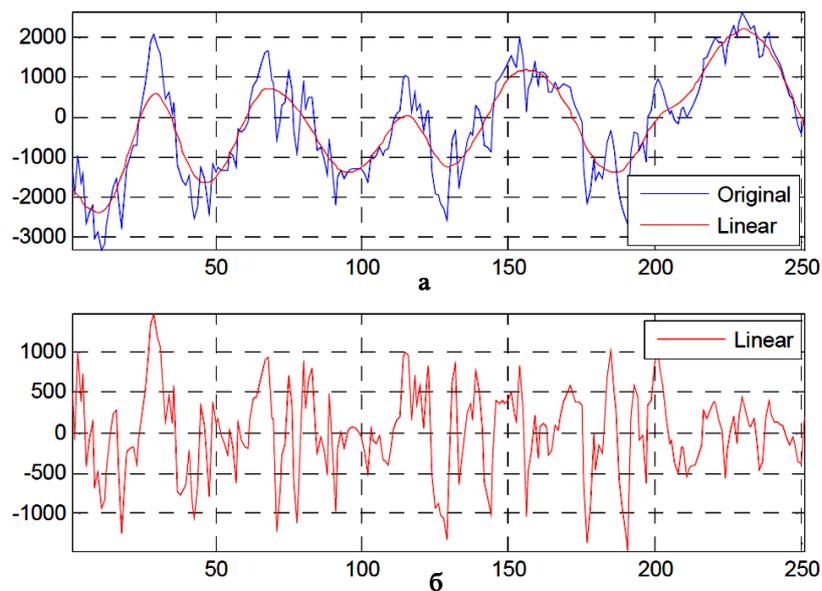


Рис. 5. Линейный сплайн фильтр (фрезерованный профиль):
 а – первичный профиль и эталонная линия, б – профиль шероховатости [21]

Робастный сплайн фильтр

Весовой функции робастного сплайн фильтра не существует, поскольку этот фильтр является нелинейным. Передаточная характеристика линейного фильтра задается как преобразование Фурье весовой функции. Поэтому передаточной характеристики робастного сплайн фильтра также не существует. Процедура фильтрации выполняется рекурсивно за несколько итераций. Используется функция Тьюки, так же как и для робастных регрессионных фильтров Гаусса [19].

Формулы фильтра для робастного сплайн фильтра могут быть построены для любой степени, но в стандарте [7] приведены только те, которые основаны на кубических сплайнах. Формула для расчета робастного сплайн фильтра имеет вид

$$[\beta\alpha^2P + (1-\beta)\alpha^4Q] \cdot w = \frac{\text{sgn}(z-w)}{\sum |z-w|},$$

где $\text{sgn}(t) = \begin{cases} +1, & \text{если } t \geq 0, \\ -1, & \text{если } t < 0. \end{cases}$

Рекомендуется, чтобы индекс вложенности (значение отсечки λc) выбирался из логарифмического ряда (постоянное отношение) значений. Опыт показал, что постоянное соотношение между последовательными значениями шкалы, равное примерно квадратному корню из 10, является оптимальным. Индекс вложенности следует выбирать из следующего ряда значений: ... 2,5 мкм; 8 мкм; 25 мкм; 80 мкм; 250 мкм; 0,8 мм; 2,5 мм; 8 мм; 25 мм;

На рис. 6 и 7 представлено сравнение использования линейного и нелинейного сплайн фильтров [20]. На рис. 6 даны результаты измерения профиля поверхности после хонингования, а на рис. 7 – фрезерованной поверхности.

На рис. 6 а, 7 а показаны исходный и эталонный профили с использованием линейных и нелинейных сплайн фильтров соответственно, а на рис. 6 б, 7 б показаны профили после фильтрации.

Из рис. 6, 7 видно, что как линейные, так и нелинейные сплайн фильтры могут хорошо повторять форму профиля почти без конечных эффектов. Робастные сплайн фильтры также устойчивы к выбросам данных (высокий пик или глубокая впадина). Скорость вычислений сплайн фильтров очень высока.

Для типичного набора исходных данных из 64129 точек линейный сплайн фильтр занимает всего 16 мс, в то время как нелинейному сплайну требуется всего две итерации для получения результата сходимости и 32 мс. С функциональной точки зрения сплайн фильтр хорошо подходит для контроля состояния производства, поскольку определяется длиной волны отсечки [26].

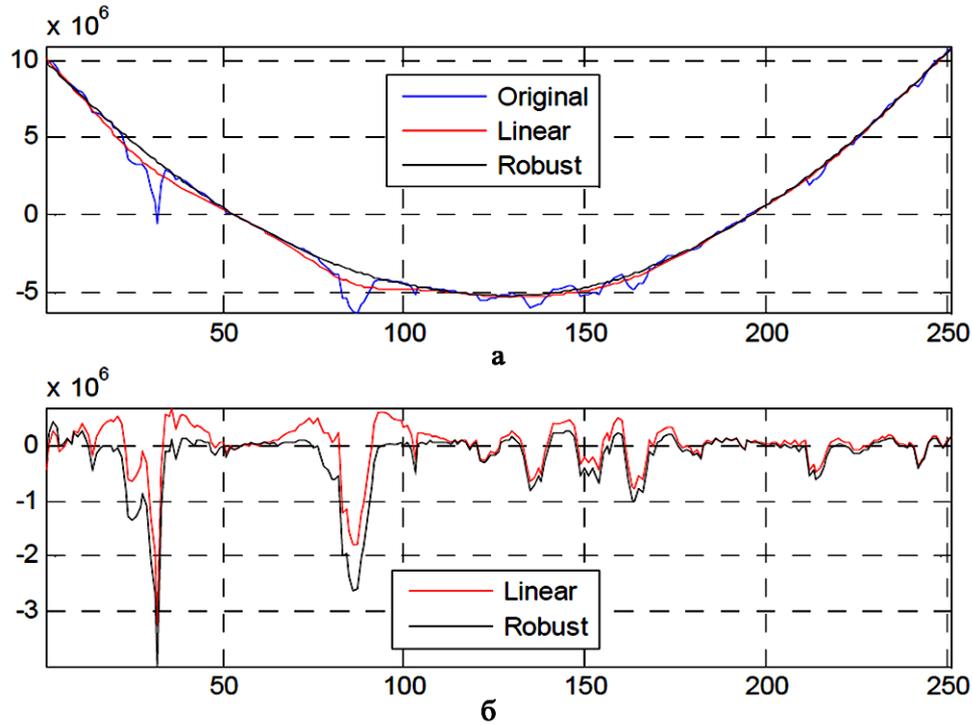


Рис. 6. Линейный и робастный сплайн фильтры (хонингованный профиль): а – первичный профиль и эталонная линия, б – профиль шероховатости [21]

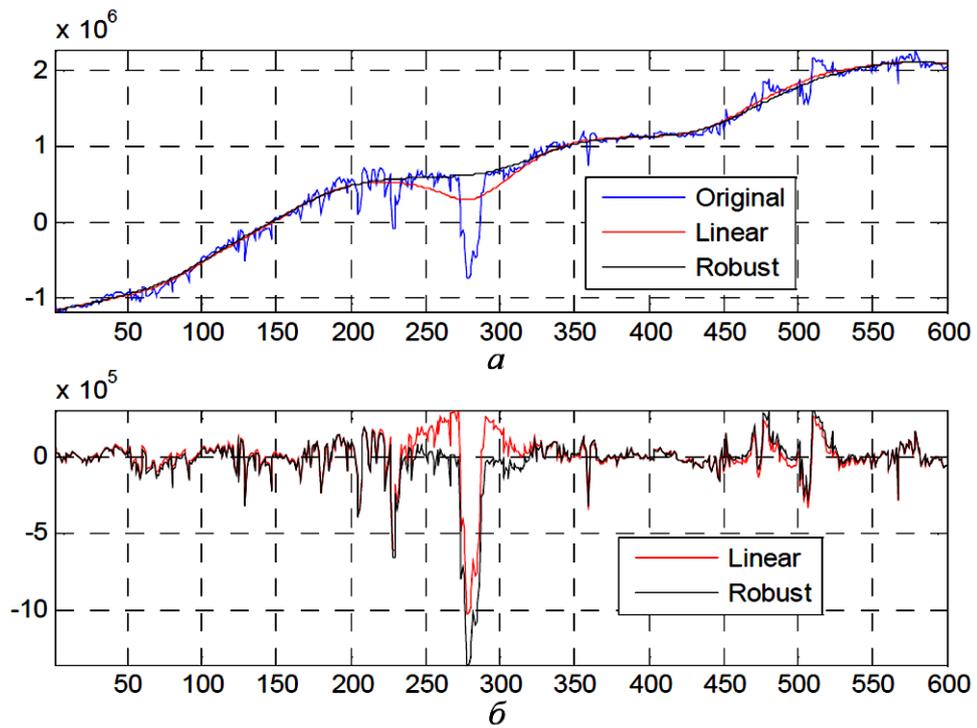


Рис. 7. Линейный и робастный сплайн фильтры (фрезерованный профиль): а – первичный профиль и эталонная линия, б – профиль шероховатости [21]

Линейный вейвлет-фильтр

Вейвлеты представляют собой альтернативу традиционному анализу Фурье. В области метрологии их использованию в последнее время уделяется большое внимание, поскольку они могут использоваться для выполнения анализа с несколькими разрешениями и обладают хорошими диагностическими возможностями [27].

Вейвлет-анализ состоит из разложения профиля на линейную комбинацию вейвлетов $g_{a,b}(x)$, сгенерированных из одного материнского вейвлета. Материнский вейвлет – это функция одной или нескольких переменных, которая образует основной строительный блок для вейвлет-анализа. Обычно материнский вейвлет интегрируется до нуля и локализован в пространстве с конечным носителем.

Если $g(x)$ является материнским вейвлетом, то семейство вейвлетов генерируется следующим образом:

$$g_{a,b}(x) = \frac{g((x-b)/a)}{\sqrt{a}},$$

где a – параметр расширения (масштабирования), b – параметр перевода.

В отличие от анализа Фурье вейвлеты могут идентифицировать местоположение, а также шкалу функции в профиле. В результате вейвлет-анализ может раскладывать профили, в которых мелкомасштабная структура в одной части профиля не связана со структурой в другой части, такой как локальные дефекты (например, царапины). Вейвлеты идеально подходят для нестационарных профилей. По сути, вейвлеты разбивают профиль на строительные блоки постоянной формы, но разного масштаба. Особый интерес представляют сплайновые вейвлеты, которые представляют собой семейства вейвлетов, соответствующие весовые функции которых являются кубическими сплайнами. На рис. 8 показан фрезерованный профиль, измеренный щупом с размером наконечника 5 мкм, с последовательно сглаженными профилями с использованием вейвлета с кубическим сплайном (4-6).

Вейвлет-преобразование разработано на основе быстрого преобразования Фурье [17]. 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 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. 9, структура с несколькими разрешениями делит сигнал на низкочастотную (a1) и высокочастотную составляющие (b1). Затем низкочастотные составляющие допол-

нительно 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.

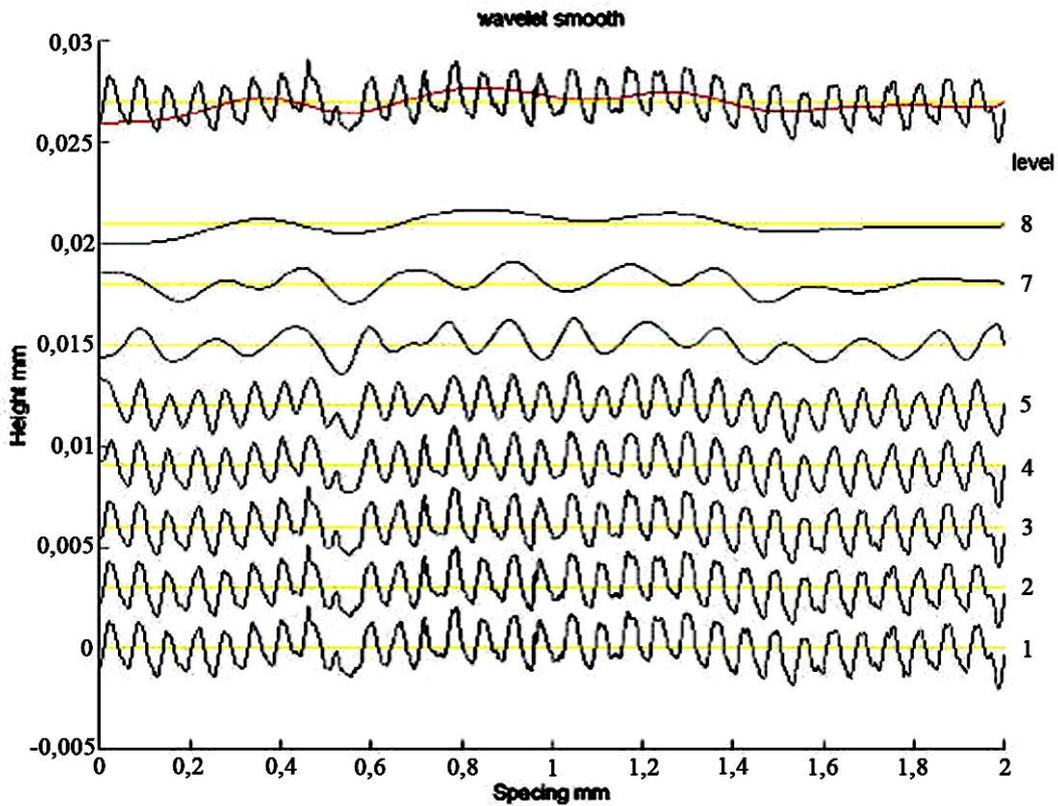


Рис. 8. Фильтрация фрезерованного профиля с использованием вейвлета [27]

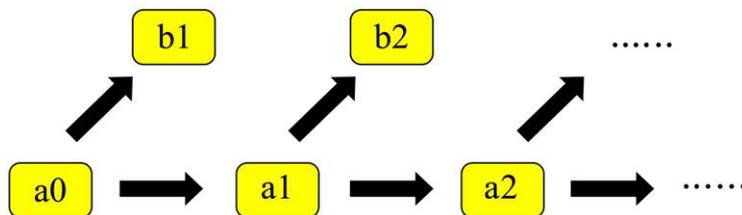


Рис. 9. Принцип многомасштабного анализа [28]

В настоящее время вейвлеты имеют модели первого, второго и третьего поколения. 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. Сплайн вейвлет с кубической интерполяцией в ISO 16610-29:2020 использует схему подъема. Однако кубический интерполяционный сплайн вейвлет имеет проблему искажения амплитудно-частотной характеристики. Таким образом, вейвлет кубического интерполяционного сплайна подходит для анализа топографии поверхности, но не рекомендуется для извлечения эталонной линии профиля.

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 профиле.

Сплайн вейвлет-фильтр можно использовать для разделения профиля на разные полосы, и он является идеальным многомасштабным фильтром для анализа и определения характеристик. Как показано на рис. 10, профиль разбивается на десять слоев с помощью вейвлета coif4 , а дифференциальный профиль и приближенный профиль изображаются для анализа с несколькими разрешениями. Сплайн вейвлет-фильтр также может выполнять анализ топографии поверхности и извлечение шероховатости на инженерных поверхностях. По сравнению с фильтрами Гаусса и линейными сплайн фильтрами вейвлет-фильтры лучше подходят для анализа топографии поверхности, сформированной несколькими процессами.

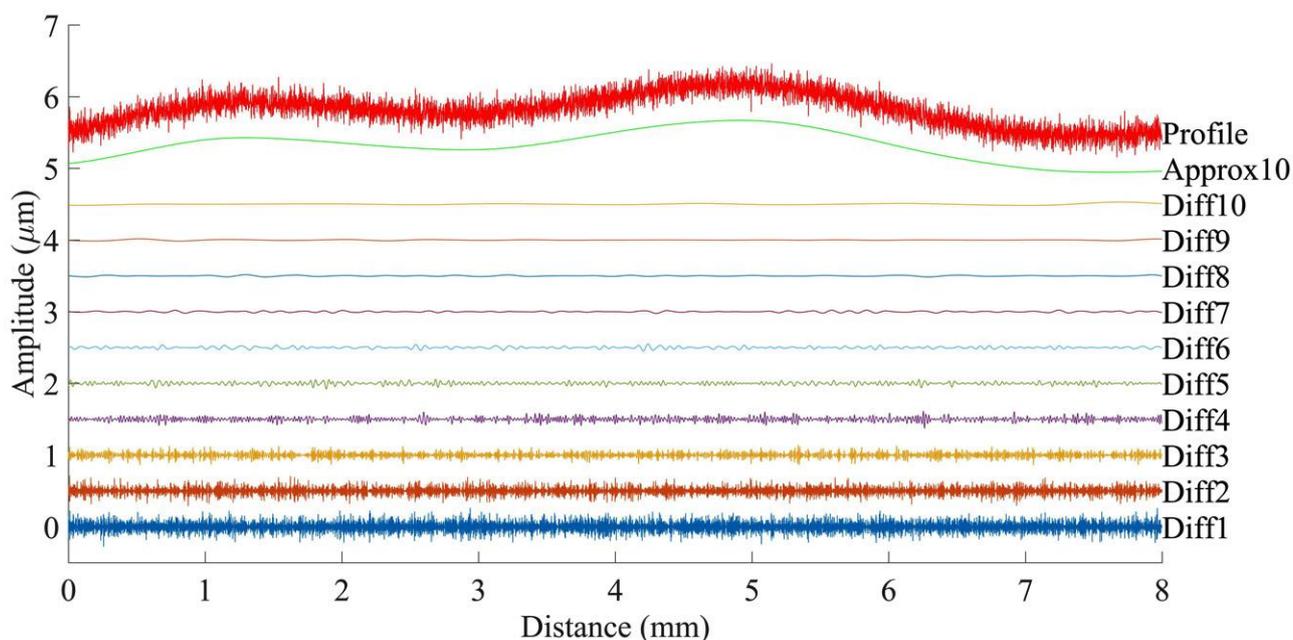


Рис. 10. Первичный, разностные и аппроксимирующие профили [17]

Заключение

В настоящей статье представлен анализ линейного и робастного сплайн и вейвлет-фильтров и проведено сравнение с фильтрами Гаусса. При анализе учитывались следующие факторы: конечные эффекты, устойчивость к выбросам, фильтрация формы, фильтрация данных с неоднородным шагом выборки и фильтрация замкнутых профилей. Сплайн фильтр представляет собой чисто цифровой фильтр, т. е. не требует дискретизации весовой функции. Алгоритм матричного решения вдвое быстрее, чем у фильтра Гаусса, и хорошо подходит для обработки больших объемов данных. Полностью отсутствуют конечные эффекты, в результате профиль может быть использован полностью или длину можно выборочно укоротить. Сплайн фильтр хорошо подходит в качестве фильтра формы, поскольку полиномы третьего порядка не имеют смещения. Эффективность робастного сплайн фильтра по отношению к выбросам сравнима с робастным фильтром Гаусса. Кроме того, сплайн фильтры можно адаптировать к любым граничным условиям, т. е. для открытого и закрытого профилей. Вейвлет-фильтр является идеальным многомасштабным фильтром. Поэтому данные типы фильтров расширяют возможности стандартных фильтров Гаусса, в первую очередь для анализа мультифункциональных поверхностей.

Благодарности

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

Список источников

1. Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Ч. 1. Обзор профильных фильтров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2. С. 22-37.
2. Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Ч. 2. Профильные фильтры Гаусса // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 3. С. 46-60.
3. Захаров О.В., Яковишин А.С., Жуков А.В. Применение фильтров серии ISO 16610 для анализа структуры поверхности. Ч. 3. Профильные морфологические фильтры // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 4. С. 36-49.
4. ГОСТ Р 8.895-2015. Геометрические характеристики изделий (ГХИ). Фильтрация. Часть 1. Обзор и основные понятия.
5. ISO 16610-22:2015. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 22: Linear profile filters: Spline filters.

6. ISO 16610-29:2020. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 29: Linear profile filters: wavelets.
7. ISO 16610-32:2009. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 32: Robust profile filters: Spline filters.
8. Krystek M. ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik ISO Filters for Precision Engineering // *Technisches Messen*, 2009, vol. 76, pp. 133-159.
9. Filtration Techniques for Surface Texture. URL: <https://guide.digitalsurf.com>.
10. Hüser D. Selected Filtration Methods of the Standard ISO 16610, 5 Precision Engineering, PTB. 2016.
11. Krystek M. Form filtering by splines // *Measurement*. 1996. Vol. 18. pp. 9-15.
12. ISO 16610-28:2016. Geometrical product specifications (GPS). Filtration. Part 28: Profile filters: End effects.
13. A robust spline filter on the basis of L2-norm / T. Goto, J. Miyakura, K. Umeda, S. Kadowaki, K. Yanagi // *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29. pp. 157-161.
14. Дискретный алгоритм на основе кусочно-линейной интерполяции для дискового морфологического фильтра / О.В. Захаров, А.Г. Лаптев, В.Г. Лысенко, Е.А. Милованова, Н.А. Табачникова // *Измерительная техника*. 2022. № 8. С. 35-40.
15. Analysis of the boundary conditions of the spline filter / M. Tong, H. Zhang, D. Ott, X. Zhao, J. Song // *Measurement Science and Technology*. 2015. Vol. 26. pp. 095001.
16. Порошин В.В., Богомолов Д.Ю., Лысенко В.Г. Исследование погрешности фильтрации неровностей поверхности сплайновым пространственным фильтром // *Измерительная техника*. 2018. № 3. С. 27-32.
17. A review of digital filtering in evaluation of surface roughness / B. He, H. Zheng, S. Ding, R. Yang, Z. Shi // *Metrology and Measurement Systems*. 2021. Vol. 28. pp. 217-253.
18. Захаров О.В., Погораздов В.В., Кочетков А.В. Методические основы гармонического анализа круглограмм // *Метрология*. 2004. № 6. С. 3-10.
19. Марков Б.Н., Шулепов А.В. Алгоритмы робастной фильтрации профиля шероховатости // *Измерительная техника*. 2015. № 7. С. 4-7.
20. Krystek M. Discrete L-spline filtering in roundness measurements // *Measurement*. 1996. Vol. 18. pp. 129-138.
21. Zeng W., Jiang X., Scott P. A generalised linear and nonlinear spline filter // *Wear*. 2011. Vol. 271. pp. 544-547.
22. Повышение точности воспроизведения и передачи единицы длины в области измерений параметров шероховатости поверхности нанометрового диапазона контактными профилометрами / В.Г. Лысенко, В.А. Костеев, Е.А. Милованова, Н.А. Табачникова и др. // *Законодательная и прикладная метрология*. 2021. № 5. С. 37-47.

23. Наномодификация приповерхностных слоев при электроэрозионной обработке оксидных нанокompозитов / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, А.А. Окунькова и др. // Вестник МГТУ Станкин. 2020. № 4. С. 11-22.

24. Гречников Ф.В., Захаров О.В., Королев А.А. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: сб. тр. Междунар. конф. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223-225.

25. Прогнозирование погрешностей сборки изделий с использованием действительных моделей деталей / Ю.С. Елисеев, М.А. Болотов, В.А. Печенин, И.А. Грачев, Е.В. Кудашов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 2. С. 128-137.

26. Robust Filtration Techniques in Geometrical Metrology and Their Comparison / S. Lou, W.H. Zeng, X.Q. Jiang, P. Scott // International Journal of Automation and Computing. 2013. Vol. 10. pp. 1-8.

27. Krystek M., Scott P.J., Srinivasan V. Discrete linear filters for metrology // XVI IMEKO World Congress. Vienna, Austria, 2000.

28. Seewig J. Areal filtering methods. Characterisation of Areal Surface Texture. Berlin: Springer, Heidelberg, 2013. pp. 67-106.

Сведения об авторах

Захаров Олег Владимирович – доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Технология авиационного приборостроения и машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg V. Zakharov – Dr.Sci. Tech., Senior Research Fellow at the Laboratory of Aeronautical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Яковишин Александр Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории «Технология авиационного приборостроения и машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander S. Yakovishin – Junior Research Fellow at the Laboratory of Aeronautical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Машиностроение

Сулейманова Фаина Денисовна –
дежурный по лаборатории «Технология
авиационного приборостроения
и машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Faina D. Suleymanova –
Laboratory Assistant, Laboratory
of Aeronautical Engineering
Technology, Yuri Gagarin
State Technical University
of Saratov

Жуков Андрей Владимирович –
дежурный по лаборатории «Технология
авиационного приборостроения
и машиностроения» Саратовского
государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey V. Zhukov –
Laboratory Assistant, Laboratory
of Aeronautical Engineering
Technology, Yuri Gagarin ,State
Technical University
of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.01.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

А.В. Панфилова

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА
СПОСОБА ЛЕЗВИЙНОЙ ОЧИСТКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОКАТА ОТ ОКАЛИНЫ**

Аннотация. В статье рассмотрены особенности механизма реализации нового способа лезвийной механической очистки поверхности металла от окалины. Представлены теоретические зависимости повышения эффективности очистки поверхности от соотношения величин силы прижима инструмента к заготовке, силы трения в опоре инструмента и силы воздействия окалины на инструмент.

Ключевые слова: окалина, прокат, способ очистки, устройство, инструмент, механизм воздействия, эффективность способа

A.V. Panfilova

**MECHANISM HIGHLIGHTS OF THE EDGE
CUTTING TECHNOLOGY FOR MECHANICAL
DESCALING OF METAL SURFACES**

Abstract. The article considers the key features of the mechanism implemented in a new edge cutting technology for mechanical descaling of metal surfaces. Theoretical dependences of increasing efficiency of descaling the surface on the ratio of the values of the pressing force of the tool to the workpiece, the friction force in the tool support, and the impact force of the scale on the tool are presented.

Keywords: scale, rolling, descaling method, device, tool, impact mechanism, efficiency of the method

Введение

Как известно, качество используемого в машиностроительной промышленности металла во многом зависит от его коррозионной стойкости, на которую, в свою очередь, оказывает существенное влияние поверхностная окалина и разного рода загрязнения, возникающие при изготовлении проката, его транспортировке и хранении. Окалина на

Машиностроение

поверхности металла представляет собой, кроме оксида железа, еще и оксиды других элементов, формирующиеся в процессе изготовления проката, а также во время термической обработки металла. Особо ценными свойствами поверхностная окалина не обладает, тем не менее с помощью различных восстановительных операций ее используют как сырье для получения железа.

Для того чтобы снизить негативное воздействие окалины на используемый металл, необходимо полностью удалять окалину с его поверхности. К настоящему времени разработаны и успешно используются в промышленности достаточно большое количество способов и методов удаления окалины – это как механические, так и химические и электрохимические, абразивные и гидроабразивные способы и многие другие [1-7].

В некоторых случаях способы механического удаления окалины имеют преимущества перед другими способами. Так, например, с коррозионностойких аустенито-ферритного класса сталей типа 08Х22Н6Т (ЭП53), применяемых для изготовления сварных аппаратов и сосудов, камер горения и других конструктивных элементов газовых турбин, корпусов аппаратов днищ, фланцев, деталей внутреннего устройства аппаратов, трубных дисков и пучков, работающих при температуре от -70° до $+300^{\circ}$ С под давлением и соприкасающихся с коррозионными средами окалину целесообразно удалять, используя механические методы, в силу того, что при химическом воздействии происходит вытравливание ферритной фазы и шероховатость поверхности проката возрастает, что требует дополнительной абразивной обработки – шлифования и даже полирования [8].

К механическим способам удаления окалины с поверхности металла можно отнести такие способы как протягивание стального проката или проволоки через ряд роликов, дробеструйную обработку поверхности металла чугунной колотой, алюминиевой, стеклянной дробью, крацевание и др. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и имеет недостатки, ограничивающие их применение в промышленности.

В связи с вышеизложенным целью статьи является рассмотрение особенностей механизма удаления окалины по новому способу и выявление граничных условий его эффективного использования.

Анализ механизма способа удаления окалины

Поиски решения этой проблемы позволили разработать новый способ [9] высокоэффективной механической очистки поверхности проката от окалины, в значительной мере улучшающий результаты выполнения этой операции (рис. 1).

В качестве окалиноудалителя в этом способе используется специальный многолезвийный инструмент, совершающий как вращательное движение вокруг своей оси, так и линейное перемещение вдоль очищаемой поверхности. Важным является то, что ока-

лина с поверхности металла не срезается, а разрушается со сдвигом вследствие удара высокой жесткости твердосплавных пластин по поверхности окалины. Несомненным достоинством этого способа является то, что в устройстве для реализации этого способа можно использовать стандартные режущие сменные многогранные твердосплавные пластины 4 пятигранной формы с отверстием ГОСТ 19064-80, а это значительно упрощает и удешевляет изготовление и эксплуатацию инструмента.

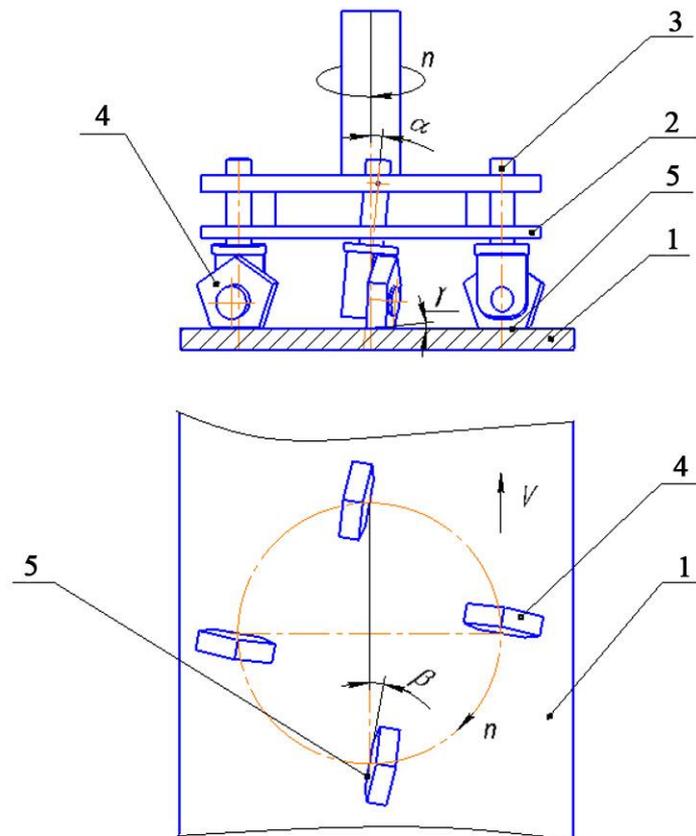


Рис. 1. Схема способа очистки плоской поверхности проката от окалины

Устройство (инструмент) содержит диск 2, на котором установлены и закреплены 4 специальные державки 3 с закрепленными твердосплавными пластинами 4. При этом твердосплавные пластины устанавливаются таким образом, чтобы выполнялось скольжение по обрабатываемой поверхности 1 без зарезания основного металла, но в то же время ударное взаимодействие с окалиной вызывало ее хрупкое разрушение со сдвигом. Для этого державки пластин устанавливались под углом $\alpha = 5 \div 15^\circ$, а сами пластины – под углом $\beta = 10 \div 20^\circ$ к плоскости оси инструмента. В то же время для сохранения постоянного контакта пластин с очищаемой поверхностью задняя поверхность пластин устанавливается в инструменте под углом $\gamma = 3 \div 6^\circ$ к поверхности обработки.

Для того чтобы удаление окалины с поверхности проката (заготовки) состоялось, необходимо рассчитать силу прижима окалиноломателя P_o к обрабатываемой поверхности, силу трения P_t и силу воздействия самой окалины на обрабатываемый инструмент F_o . Для этого воспользуемся зависимостями, полученными в [10].

Механизм удаления окалины с обрабатываемой поверхности следующий. Так как окалине присуща высокая хрупкость, то она быстро разрушается при ударном воздействии на нее твердосплавной пластины по плоскости сдвига. При этом вначале разрушаются мелкие микронеровности окалины, создавая более плотный ее контакт с обрабатываемым инструментом, и только затем при увеличении горизонтальной силы воздействия до необходимой величины окалина разрушается и скалывается вдоль всей плоскости скалывания.

Силу трения в опорах инструмента P_t можно определить из формулы [10]

$$P_t = f_o \cdot (P_{x1} + P_{x2}),$$

где f_o – коэффициент трения скольжения в опорах державки инструмента;

P_{x1} и P_{x2} – нормальные силы, действующие в опорных точках державки инструмента.

Для того чтобы не повреждать поверхность очищаемого металла, необходимо, чтобы режущая кромка рабочей пластины скользила по обрабатываемой поверхности и имела бы с ней упругий контакт, а для этого нужно, чтобы пластина имела радиус скругления r , величину которого можно определить из формулы [10]

$$r \geq \frac{P_o \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot \sigma_u^2 \cdot \eta \cdot b},$$

где P_o – сила взаимодействия инструмента и окалины, направленная вдоль оси инструмента, Н;

α – угол наклона режущего инструмента, рад;

σ_u – предел упругости материала изделия, МПа;

b – длина режущей кромки инструмента, мм;

η – коэффициент упругости материалов инструмента и заготовки.

Окалина на поверхности металла содержит большей частью три слоя:

$$h = h_1 + h_2 + h_3,$$

где h_1 – первый слой окалины – вюстит;

h_2 – второй слой окалины – магнетит;

h_3 – третий слой окалины – гематит.

Если $r(1 + \sin \alpha) \leq h_1$, то:

$$\begin{aligned}
 F_o &= \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \left(\sigma_1 \cdot \int_{\beta_o}^{\beta_1} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta + \sigma_2 \int_{\beta_1}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \cos(\beta - \lambda - \alpha) d\beta \right) + \\
 &+ \sigma_2 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h_1 + h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_3 \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} h_3 = \\
 &= \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot (\sigma_1 \cdot (\sin(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \sin(\beta_o - \lambda - \alpha)) + \sigma_2 (\cos \lambda - \sin(\beta_1 - \lambda - \alpha))) + \\
 &+ \sigma_2 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h_1 + h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \sigma_3 \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} h_3;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_t &= f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left((d + 2c)(\cos(\beta_o - \lambda - \alpha) - \cos(\beta_1 - \lambda - \alpha)) + \right. \\
 &\quad \left. + r \left((\sin^2(\beta_1) - \sin^2(\beta_o)) \cos(\lambda + \alpha) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sin(\lambda + \alpha)(\beta_1 - \beta_o + \cos(\beta_1 + \beta_o)) \sin(\beta_1 - \beta_o) \right) \right) + \\
 &+ f \frac{\sigma_2 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left((d + 2c)(\cos(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \sin \lambda) + \right. \\
 &\quad \left. + r \left((\cos^2 \alpha - \sin^2 \beta_1) \cos(\lambda + \alpha) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sin(\lambda + \alpha) \left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_1 - \cos(\alpha - \beta_1) \sin(\alpha + \beta_1) \right) \right) \right) + \\
 &+ f \frac{b}{d \cos \alpha} \left(\sigma_2 (h_1 + h_2 - r(1 - \sin \alpha)) \cdot (d + 2(c + r) - h_1 - h_2 - r(1 + \sin \alpha)) + \right. \\
 &\quad \left. + \sigma_3 \cdot h_3 \cdot (d + 2(c + r) - h - h_1 - h_2) \right).
 \end{aligned}$$

Если $h_1 + h_2 < r(1 + \sin \alpha) \leq h$, то

$$\begin{aligned}
 F_o &= \frac{b \cdot r}{\cos \lambda} \cdot \left(\sigma_1 \cdot (\sin(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \sin(\beta_o - \lambda - \alpha)) + \right. \\
 &\quad \left. \sigma_2 \cdot (\sin(\beta_2 - \lambda - \alpha) - \sin(\beta_1 - \lambda - \alpha)) \right) + \\
 &\quad + \sigma_3 \cdot (\cos \lambda) - \sin(\beta_2 - \lambda - \alpha) \\
 &\quad + \sigma_3 \cdot \frac{b \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\cos \alpha} (h - r(1 + \sin \alpha));
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_t &= f \cdot \frac{\sigma_1 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left((d + 2c)(\cos(\beta_o - \lambda - \alpha) - \cos(\beta_1 - \lambda - \alpha)) + \right. \\
 &\quad \left. + r \left(\cos(\lambda + \alpha)(\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_o) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sin(\lambda + \alpha)(\beta_1 - \beta_o + \cos(\beta_1 + \beta_o)) \sin(\beta_1 - \beta_o) \right) \right) + \\
 &+ f \frac{\sigma_2 \cdot b \cdot r}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left((d + 2c)(\cos(\beta_1 - \lambda - \alpha) - \cos(\beta_2 - \lambda - \alpha)) + \right. \\
 &\quad \left. + r \left(\cos(\lambda + \alpha)(\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sin(\lambda + \alpha)(\beta_2 - \beta_1 + \cos(\beta_2 + \beta_1)) \sin(\beta_2 - \beta_1) \right) \right) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + f \frac{\sigma_{3br}}{d \cdot \cos \lambda} \cdot \left((d + 2c)(\cos(\beta_2 - \lambda - \alpha) - \sin \lambda) + \right. \\
 & \left. \left((\cos^2 \alpha - \sin^2 \beta_2) \cos(\lambda + \alpha) - \right. \right. \\
 & \left. \left. + r \left(-\sin(\lambda + \alpha) \left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \beta_2 - \cos(\alpha - \beta_2) \sin(\alpha + \beta_2) \right) \right) \right) \right) + \\
 & + f \frac{b \cdot \sigma_3}{d \cos \alpha} ((h - r(1 - \sin \alpha)) \cdot (d + 2(c + r) - h - r(1 + \sin \alpha))) + \\
 & + P_o \cdot \cos \alpha \frac{d + 2(c + r)}{d}.
 \end{aligned}$$

Выводы

Таким образом, будет ли удалена окалина с обрабатываемой поверхности или нет, зависит от соотношения величин силы прижима инструмента к заготовке P_o , силы трения в опоре инструмента P_t и силы воздействия окалины на инструмент F_o . Если суммарная сила прижима инструмента к заготовке P_o с силой трения в опоре инструмента P_t превысит силу воздействия окалины на инструмент F_o , т. е. $P_o + P_t > F_o$, то окалина с поверхности металла будет удалена. Если же сила воздействия окалины на инструмент F_o будет больше суммарной силы прижима инструмента к заготовке P_o и силы трения в опоре инструмента P_t , т. е. $P_o + P_t < F_o$, то окалина будет вытеснять инструмент и может полностью остаться на поверхности заготовки, или может произойти неполное удаление окалины, но ее величина уменьшится.

Список источников

1. <https://nzmetallspb.ru/tehnologii/zheleznaya-okalina-protsess-obrazovaniya-metody-udaleniya.html>. (дата обращения: 24.03.2020).
2. <https://studfile.net/preview/383572/page:6>. (дата обращения: 24.03.2020).
3. Пат. 2014105408 Российская Федерация, МПК⁷ В08В 1/04. Способ очистки поверхности / Королев А.В., Королев А.А. заявл. 13.02.14; опубл. 20.08.15, Бюл. № 23.
4. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов. Москва: Металлургия, 1990.
5. https://markmet.ru/tehnologiya_metallov/metody-udaleniya-okaliny-s-poverkhnosti-metalla. (дата обращения: 24.03.2020).
6. Пат. 2 168 559 Российская Федерация, МПК. С2. Способ ультразвукового снятия окалины с поверхности металлических изделий / В.И. Лангборт, А.В. Макаров, Т.Ф. Моисеева, В.Т. Зыкин, Ю.А. Самойленко, З.С. Глазунова; опубл. 06.10. 2001.

7. Панфилова А.В. Эволюция разработки способа удаления окалины // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 52-58.

8. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов. Москва: Металлургия, 1990.

9. Способ очистки поверхности изделия от окалины / Королев А.В., Панфилова А.В., Решетникова О.П., Васин А.Н., Изнаиров Б.М. Патент на изобретение № 2766090. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 07.02.2022. Опубликовано 17.02.2022 г. Бюл. № 4. RU 2 766 090 C1. В24В 39/00 (2021.08); В08В 1/04 (2021.08); В08В 7/02 (2021.08).

10. Механизм лезвийной очистки металлического проката от окалины / А.В. Королев, А.В. Панфилова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин, О.П. Решетникова // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 11 (125). С. 12-19. DOI 10.30987/2223-4608-2021-11-12-19.

Сведения об авторе

Панфилова Анастасия Вячеславовна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anastasia V. Panfilova – Postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.02.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

Д.О. Чуриков, И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА,
В КОТОРОМ ВОЗБУЖДАЮТСЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ,
НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ**

Аннотация. Проведен анализ требований к промышленной чистоте жидкостей, а также методов, позволяющих осуществлять их очистку. Показано, что среди всех методов фильтрация обеспечивает наибольшую степень очистки, однако при этом существует ряд проблем. Предложено решение – фильтр, где жидкость пропускается через регулируемый зазор, в котором возбуждаются ультразвуковые колебания. Проведены исследования влияния величины зазора на степень очистки жидкости и установлено, что наибольшую степень очистки обеспечивает зазор 0,1 мм и менее.

Ключевые слова: методы очистки, фильтрация, загрязнения, очистка, классы частоты жидкостей, ультразвук, кавитация, диспергирование, зазор

D.O. Churikov, I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

**EFFECTS OF THE GAP SIZE WITH EXCITED
ULTRASONIC VIBRATIONS ON THE LEVEL
OF PROCESS LIQUID CLARIFICATION**

Abstract. Analysis of requirements for the purity of industrial liquids, as well as methods for their purification, is carried out. It is shown that among all the methods, filtration provides the highest degree of purification, though a number of problems still remain. The proposed solution to the problem includes a filter, where liquid passes through an adjustable gap with excited ultrasonic vibrations. Investigations of the effect of the gap size on the degree of liquid purification showed that the highest degree of purification is provided by a gap of 0,1 mm or less.

Keywords: purification methods, filtration, pollution, purity levels of liquids, ultrasound, cavitation, dispersion, gap

Введение

В различных областях промышленности и транспорте жидкости являются как вспомогательным, так и рабочим веществом. Они выполняют смазывающие, промывочные, транспортировочные, охлаждающие и другие функции. От их качества и степени загрязненности зависят надежность и работоспособность различных машин. Так, например, наличие в смазочных жидкостях, а также в топливе твердых частиц приводит к преждевременному износу двигателей и других двигающихся элементов технологических и транспортных машин.

Согласно стандартам Российской Федерации [1], установлены 19 классов чистоты жидкостей, применяемых при изготовлении и ремонте машин и приборов. Стандартом регламентируется количество частиц загрязнений в диапазоне размеров 0,5-200 мкм и волокон длиной 200-300 мкм в 100 см³ жидкости. При этом грубым классом очистки является класс 17, а наивысшим – класс 00.

В связи с этим наибольшее применение получили физические, химические и физико-химические методы очистки жидкостей, каждый из которых предназначен для устранения определенного количества и характера загрязнений [2-3].

На сегодняшний момент нет методов, которые бы сочетали в себе производительность, энергоэффективность, экологичность и тонкость очистки. Как правило, методы являются либо высокопроизводительными и не обеспечивают тонкую очистку, к тому же являются энергоемкими, либо же, наоборот, малопроизводительны, но обеспечивают высокий класс очистки.

Целью работы является исследование влияния величины зазора, в котором возбуждаются ультразвуковые колебания, на степень очистки жидкости.

Постановка задачи

Анализируя известные в настоящее время методы очистки жидкостей, следует отметить, что для устранения в жидкостях механических примесей в основном предназначены физические методы очистки.

Среди них в наибольшей степени критерию «тонкость очистки – стоимость» отвечают методы фильтрации, принцип работы которых заключается в пропускании загрязненной жидкости через пористые перегородки, объемные структуры или мембраны. Такой метод очистки является широко применяемым и позволяет получить на выходе жидкость высокого класса и к тому же является недорогим в сравнении с центрифугированием (физический метод).

Однако, несмотря на свое распространение, метод обладает рядом проблем: снижение удельной производительности вследствие загрязнения микропор, что требует частой замены картриджей (фильтрующих элементов) и остановки работы фильтрующих

Машиностроение

установок; низкие показатели качества очистки от различных органических веществ (около 20-60 %); использование для регенерации картриджей различных химических реагентов, что наносит непоправимый ущерб экологии.

Уже достаточно давно в промышленности широко применяются методы ультразвукового воздействия на газы, жидкости и твердые тела [4-7]. Наиболее распространены ультразвуковые технологии обработки в жидких средах, основанные на явлении акустической кавитации и позволяющие реализовать эффективные процессы эмульгирования, коагуляции, диспергирования, распыления, очистки [4-6].

Исследовано влияние ультразвука на проницаемость мембран [8-12] и разработаны технические решения применения ультразвука для повышения эффективности проникновения жидкостей через пористые структуры. Однако решение не исключает необходимости замены фильтрующих картриджей и не позволяет использовать один и тот же фильтр для очистки жидкостей с различной вязкостью, степенью загрязнения и разной дисперсностью частиц, хотя физические эффекты ультразвука могут позволить механически диспергировать твердые частицы в узком зазоре между торцом волновода и поверхностью технологической опоры, а также разрушать пластичные частицы типа масляных капель и микрочастиц полимеров в результате воздействия ударных волн, образующихся при схлопывании кавитирующих микропузырьков. Таким образом, пористый картридж может заменяться узким зазором (щелью), через которую пропускается очищаемая жидкость.

Методика и оборудование

Исследования проводили на экспериментальной установке (рис. 1), основанной на пьезокерамическом электромеханическом преобразователе с расчетной резонансной частотой 22 кГц, рабочий элемент которого представляет собой диск с диаметром 60 мм и толщиной 5 мм. Емкость для фильтруемой жидкости устанавливалась на столе с регулируемыми ножками.

В емкости зафиксирована опора с центральным отверстием 10 мм для слива отфильтрованной жидкости и высотой 20 мм для сбора загрязненной жидкости. Под емкостью устанавливался стакан с мерной шкалой для сбора отфильтрованной жидкости. Качество очистки оценивали по микрофотографиям цифрового микроскопа Bresser LCD 50×-2000× при увеличениях ×40 и ×400 путем подсчета количества частиц определенного размера в поле зрения и процентного соотношения загрязнения. В качестве очищаемой жидкости использовали водопроводную воду, загрязненную стружкой (мелкодисперсные частицы и волокна), образовавшейся в процессе резки углепластика.

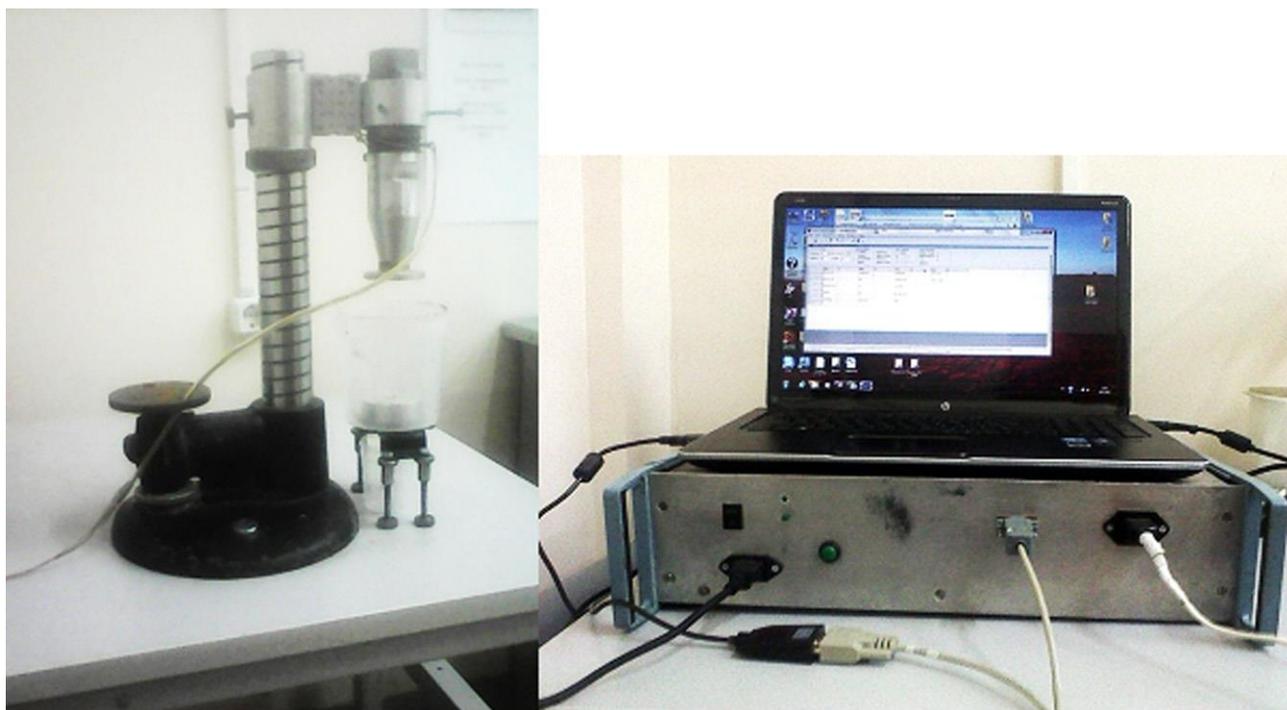


Рис. 1. Экспериментальная ультразвуковая установка для очистки жидкостей

Эксперимент проводился следующим образом. Емкость с опорой устанавливали на стол и опускали преобразователь до касания торца рабочего элемента с поверхностью опоры. Затем добивались равномерности контакта по всей поверхности при помощи регулировочных винтов. Под емкостью размещали стакан с мерной шкалой, после чего в емкость заливалась загрязненная жидкость, включался ультразвуковой генератор и отводился преобразователь для получения зазора.

Величина зазора выставлялась при помощи часового индикатора с ценой деления 0,01 мм. Сбор жидкости осуществляли в течение 30 с, затем генератор выключали. Эксперимент производили при величине зазора 0,1, 0,25 и 0,5 мм. Забирали пробы загрязненной и отфильтрованной жидкости и помещали на предметное стекло микроскопа. Выполняли фотографирование в проходящем свете.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования представлены в таблице.

Усредненные результаты исследования

| Зазор, мм | Исходная | 0,1 | 0,25 | 0,5 |
|-------------------------------------|----------|-------|-------|-------|
| Содержание загрязняющих частиц, % | 9,484 | 1,886 | 2,797 | 2,485 |
| Количество загрязняющих частиц, шт. | 71 | 18,3 | 26,3 | 27,7 |

Машиностроение

По результатам исследований видно, что зависимость влияния величины зазора, в котором возбуждаются ультразвуковые колебания, имеет не линейный характер (рис. 2). Наиболее эффективной величиной зазора является 0,1 мм и менее, при котором степень загрязнений снижается в 5 раз. Увеличение зазора приводит к снижению степени очистки. В жидкости наблюдается увеличение количества частиц, хотя и с размерами, меньшими размеров исходных частиц.

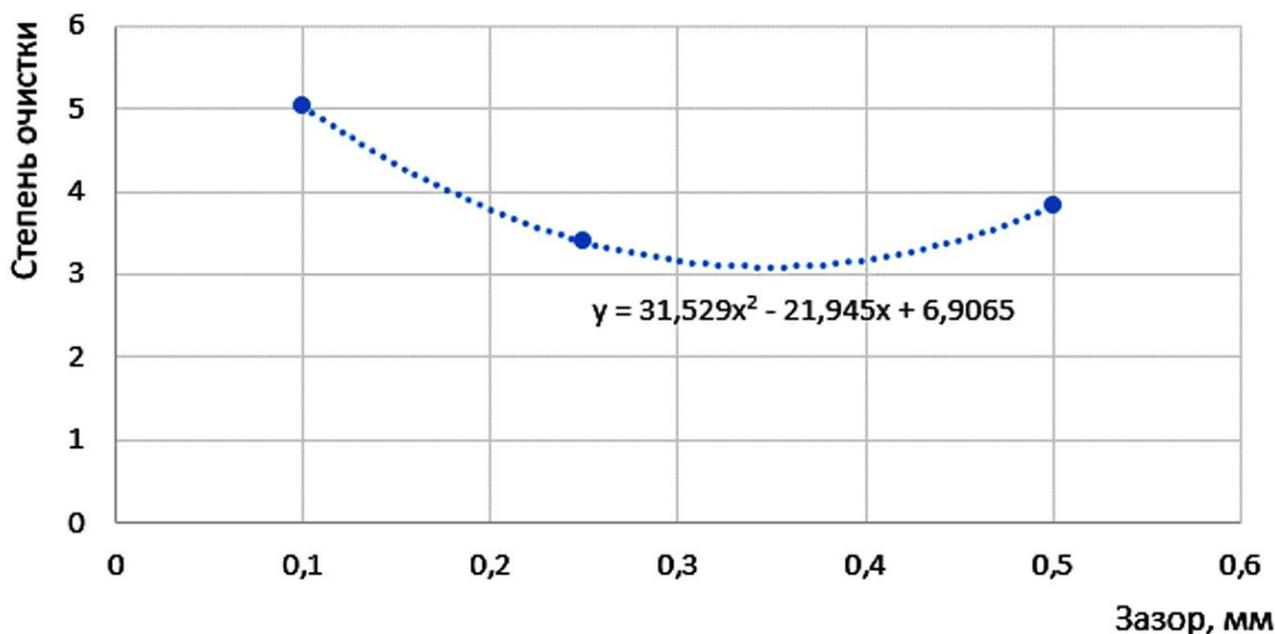


Рис. 2. График зависимости влияния величины зазора на степень очистки жидкости

На рис. 3 представлены типичные микрофотографии проб исходной и отфильтрованной жидкостей. Следует заметить, что при прохождении жидкости через зазор снижается количество загрязняющих частиц, а также их размеры.

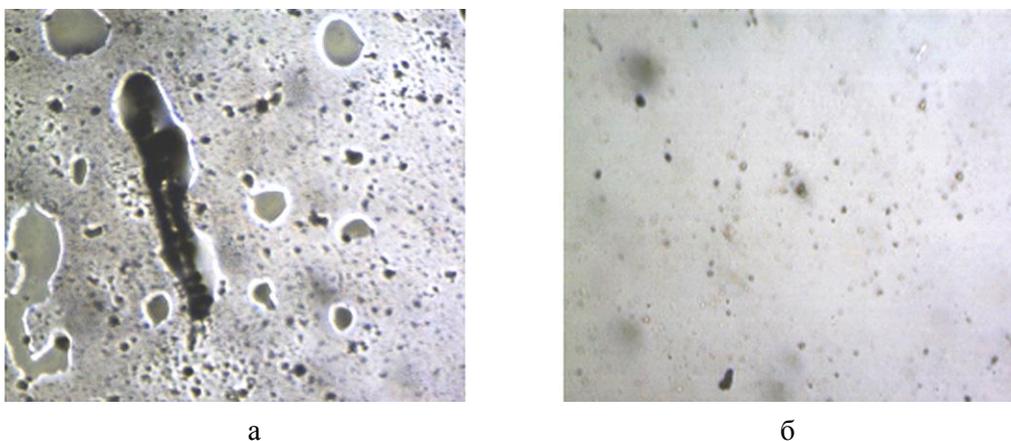


Рис. 3. Микрофотография ($\times 40$) проб жидкости: а – исходная, б – зазор 0,1 мм

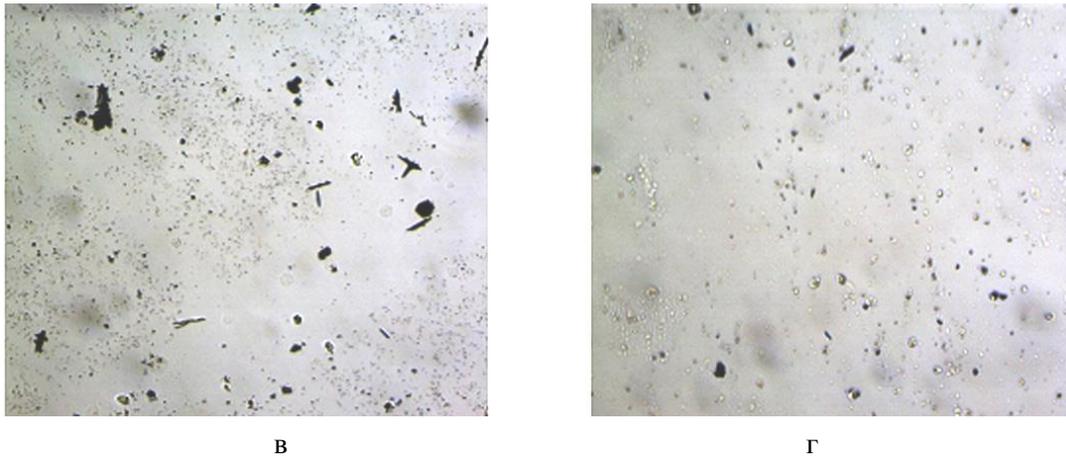


Рис. 3 (окончание). Микрофотография ($\times 40$) проб жидкости: в – 0,25 мм, г – 0,5 мм

Также в ходе исследования была определена производительность процесса в зависимости от величины зазора. График зависимости представлен на рис. 4.

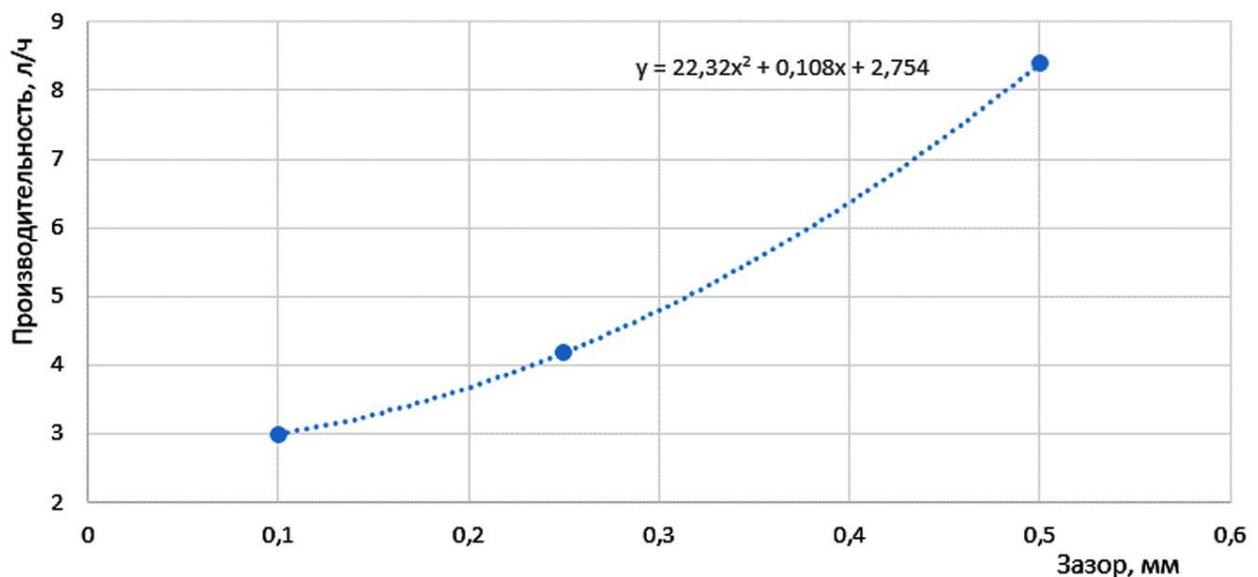


Рис. 4. График зависимости производительности от величины зазора

Заключение

В ходе исследований экспериментально установлено, что за счет пропускания жидкости с механическими загрязнениями через регулируемый зазор, в котором возбуждаются ультразвуковые колебания, осуществляется процесс фильтрации.

Установлено, что на степень очистки жидкости существенное влияние оказывает величина зазора. Чем меньше будет его величина, тем чище на выходе будет жидкость. Однако следует отметить, что с уменьшением величины зазора снижается производи-

тельность процесса. Наибольшая степень очистки обеспечивается при величине зазора 0,1 мм и менее.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (Договор № 17295ГУ/2022 от 11.04.2022).

Список источников

1. ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей.
2. Терентьев В.В., Баусов А.М., Каплаков Д.В. Существующие способы очистки загрязненных масел и рабочих жидкостей // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иваново, 30 ноября 2020 г. Иваново: Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, 2020. С. 164-167.
3. Локов Р.А. Очистка отработанного масла классическими методами // Вестник научных трудов молодых учёных, аспирантов, магистрантов и студентов ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет». Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2018. С. 195-197.
4. Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.
5. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Промышленные установки ультразвуковой промывки и очистки прецизионных деталей // Вопросы электротехнологии. 2016. № 1 (10). С. 26-34.
6. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Сарсенгалиев А.М. Обоснование контактного метода ультразвуковой очистки труднодоступных внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения // Вопросы электротехнологии. 2017. № 1 (14). С. 48-52.
7. Бекренев Н.В., Петровский А.П. Влияние частоты и направления ультразвуковых колебаний на эффективность сверления труднообрабатываемых материалов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 1 (52). С. 36-40.
8. Ландырев А.М. Повышение эффективности работы микропористой мембраны в системах водоподготовки промышленных предприятий: дис.... канд. техн. наук. / РХТУ имени Д.И. Менделеева. Москва, 2016. 129 с.
9. Vibration-induced mobilization of trapped oil ganglia in porous media: Experimental validation of a capillary-physics mechanism / W. Li, R.D. Vigil, I.A. Beresnev, P. Iassonov, R. Ewing // J. Colloid Interface Sci. 2005. V. 289. P. 193-199.

10. Removal of small particles from a porous material by ultrasonic irradiation / P. Poesio, G. M. E. Ooms, H. van Dongen, and D. M. J. Smeulders // Transp. Porous Media. 2004. 54, 239-364,

11. Elkhoury J.E., Niemeijer A., Brodsky E.E., Marone C. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. B. 02311.

12. Ефремова О.Е., Марфин Е.А. Исследование влияние ультразвука на извлечение жидкости из глиносодержащих образцов пористых сред // Труды Академэнерго. 2017. № 1. С. 139-140.

Сведения об авторах

Чуриков Данила Олегович – студент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Danila O. Churikov – Undergraduate, 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

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 05.02.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669. 046:546.3

С.Ж. Иброхимов, И.Н. Ганиев, Б.Б. Эшов

ТВЕРДОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ СПЛАВА АМг4, ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ (Sc, Y, La, Pr, Nd)

Аннотация. Введение в алюминий магния в количестве до 6 % в качестве главного легирующего элемента дает упрочнение твердого раствора сплава и высокую эффективность деформационного упрочнения. Это обеспечивает сплавам серии 5xxx довольно высокие прочностные свойства – выше, чем у сплавов серии 3xxx. Достижение высокой прочности за счет упрочнения твердого раствора магнием возможно потому, что магний в этой роли является очень эффективным. Кроме того, его высокая растворимость позволяет увеличивать его содержание до 5 % в наиболее легированных сплавах. Однако в сплавах с высоким содержанием магния существует тенденция к образованию интерметаллидной фазы Mg_5Al_8 по границам зерен и в областях локализованной деформации внутри микроструктуры. Это происходит потому, что равновесная растворимость магния в алюминии – всего лишь около 2 %. Выделение избыточной фазы в этом случае эквивалентно тому, что происходит в сплавах, упрочняемых старением, но с отрицательным эффектом для свойств сплава. Выделение частиц происходит медленно при комнатной температуре, но ускоряется с повышением температуры или если сплав подвергся интенсивной холодной пластической деформации. Это явление делает сплав восприимчивым к некоторым типам межзеренной коррозии, например, коррозии под напряжением, и/или ухудшение механических свойств в ходе эксплуатации при повышенных температурах. Исследования влияния РЗМ на механические свойства алюминиевого сплава АМг4 показали рост прочности при содержании РЗМ 0,05-0,1 мас. %.

Ключевые слова: механические свойства, твердость, прочность – сплав АМг4, редкоземельные металлы

S.Zh. Ibrokhimov, I.N. Ganiev, B.B. Eshov

HARDNESS AND STRENGTH OF AMg4 ALLOY HARDENED WITH RARE-EARTH METALS (Sc, Y, La, Pr, Nd)

Abstract. Introduction of magnesium in aluminum in the amount of up to 6 % as the main alloying element ensures hardening of the solid solution of the alloy and high efficiency of strain hardening. This provides the alloys of the 5xxx series with rather high strength properties – higher than those of the alloys of the 3xxx series. Achieving high strength properties by hardening the solid solution with magnesium is possible since for the given purposes magnesium is particularly effective. In addition, its high solubility allows increasing its content up to 5 % in the hardest alloys. However, in alloys with a high degree of magnesium content, there is a tendency to formation of an intermetallic Mg₅Al₈ phase along the grain boundaries and in the areas of localized deformation within the microstructure. This is due to the fact that equilibrium solubility of magnesium in aluminum is only about 2 %. The precipitation of an excess phase in this case is equivalent to what occurs in age hardened alloys, but with a negative effect on the properties of the alloy. Particle precipitation occurs slowly at room temperature, but it accelerates under temperature elevation or if the alloy is subjected to severe cold plastic deformation. This phenomenon makes the alloy susceptible to certain types of intergranular corrosion, such as stress corrosion, and/or degradation of mechanical properties during its service at elevated temperatures. Investigation of REM effects on mechanical properties of the AMg4 aluminum alloy showed a rise in its strength at the REM content of 0,05-0,1 wt. %.

Keywords: mechanical properties, hardness, strength-AMg4 alloy, rare earth metals (REM)

Введение

Согласно имеющимся сведениям, современное и будущее состояние алюминиевых сплавов определяется нахождением методов и достижением улучшения их физических, технологических и механических свойств [1]. Как показывает практика, наиболее перспективными методами решения проблемы на данный момент остаются легирование и модифицирование алюминия металлами, улучшающие его различные свойства. Естественно, при этом надо учесть экономическую сторону вопроса, так как возможно создание новых композиций сплавов с улучшенными характеристиками, которые невыгодны на рынке материалов.

С учётом этого анализ влияния различных металлов на свойства алюминиевых сплавов можно считать необходимым, так как это способствует правильному и рациональному подбору различных легирующих добавок.

Согласно работе [2], основными легирующими компонентами для деформируемых конструкционных алюминиевых сплавов являются Cu, Mg, Zn и Si, Li и Ag. Главным признаком выбора данных элементов является их наибольшая растворимость в твердом алюминии, резко снижающаяся с уменьшением температуры, в результате чего при охлаждении сплавов с этими компонентами из твердого раствора выделяются интерметаллидные фазы, а при нагреве – растворяются. Этот фазовый переход позволил значительно повлиять на структуру и свойства сплавов посредством термической обработки [3, 4].

Промышленные сплавы, разработанные на основе систем Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg-Si, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Li, Al-Cu-Li и Al-Cu-Mg-Ag, имеют высокий комплекс механических свойств. Следовательно, это происходит после упрочняющей термической обработки, когда матрицей сплава является твердый раствор, упрочненный дисперсными частицами интерметаллидных фаз, выделившихся из твердого раствора при старении.

Различие данных сплавов заключается в составе, строении кристаллической структуры и свойствах дисперсных частиц интерметаллидов. Этим сплавам свойственны хорошая формируемость, высокая прочность, отличная коррозионная стойкость, хорошая анодируемость и лучшая свариваемость. Поэтому сплавы серии АМг применяют во многих конструкциях, работающих при суровых атмосферных воздействиях, например в судостроении и конструкциях в прибрежных районах и в открытом море, включая нефтяные платформы. Сварные алюминиевые лодки и катера изготавливают исключительно из сплавов этой серии. Благодаря хорошей комбинации прочности и формируемости из этих сплавов изготавливают штампованные детали корпуса и шасси в автомобилестроении.

При содержании магния более 3 % алюминиево-магниевые сплавы имеют хорошую коррозионную стойкость (при определенной восприимчивости к межзеренной коррозии). Особенно можно выделить способность сопротивлению коррозии в морской воде и морской атмосфере (которое значительно выше, чем у сплавов других серий).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены состав и результаты исследования микротвердости упрочняющих фаз, присутствующих в промышленных алюминиевых сплавах.

Из табл. 1 видно, что в составе более сложных сплавов могут присутствовать несколько фаз. Упрочняющий эффект интерметаллидных фаз зависит от многих факторов. Например, разнородность полуфабрикатов из сплавов системы Al-Mg-Si привела к неудаче их использования [3].

Таблица 1

Максимальная растворимость легирующих компонентов в твердом алюминии
и микротвердость основных упрочняющих фаз в промышленные алюминиевые сплавы [3]

| Система | Максимальная растворимость в твердом алюминии | Фазы | Максимальная достигнутая прочность, кг/мм ² при 20° С | Микротвердость, НВ, кгс/мм ² |
|---------------------------|---|--|--|---|
| Al | – | – | 7 | – |
| Al-Cu-Mg | 5,7 % Cu 17,4 % Mg | θ (Al ₂ Cu) S (Al ₂ CuMg) | 52 | 400-600 560 |
| Al-Mg-Si, Al-Mg-Si,-Cu | 1,65 % Si | Mg ₂ Si W (AlMg ₅ Si ₄ Cu ₄) | 35 | 560 580 |
| Al-Zn-Mg-Cu, Al-Zn-Mg | 82 % Zn | MgZn ₂ T (Al ₂ Mg ₃ Zn ₃) | 70-80 | 430 420 |
| Al-Cu-Li | 4.2 % Li | T1 (Al ₂ CuLi) δ' (Al ₃ Li) | 65 | 430-520 |

Приведенные в табл. 2 состав и микротвердость интерметаллидных фаз, образующихся в сплавах алюминия с некоторыми элементами периодической системы, показывают, что твердость интерметаллидных фаз выше твердости основных упрочняющих фаз и твердости основных упрочняющих промышленных сплавов.

Таблица 2

Максимальная растворимость металлов в твердом алюминии и микротвердость
алюминиевых фаз, образующихся в сплавах [3]

| Система | Максимальная растворимость компонентов в твердом алюминии | Интерметаллидная фаза | Микротвердость, НВ, кгс/мм ² |
|----------|---|----------------------------------|---|
| Al-Mn | 1,8 % Mn | Al ₆ Mn | 540-560 |
| Al-Cr | 0,9 % Cr | Al ₇ Cr | 500-700 |
| Al-Ti | 0,26 % Ti | Al ₃ Ti | 600-700 |
| Al-Zr | 0,28 % Zr | Al ₃ Zr | 420-740 |
| Al-Sc | 0,40 % Sc | Al ₃ Sc | 260 |
| Al-Co | 0,02 % Co | Al ₉ Co ₂ | 650-750 |
| Al-Ni | 0,04 % Ni | Al ₃ Ni | 700-770 |
| Al-Fe | 0,05 % Fe | Al ₃ Fe | 800-1100 |
| Al-Fe-Si | 0,05 % Fe | α (Al-Fe-Si) | 1100 |
| Al-Nd | 0,05 % Nd | Al ₁₁ Nd ₃ | 350 |
| Al-Ce | 0,05 % Ce | Al ₄ Ce | – |

Сотрудниками ВИАМ и МИСиС проведено комплексное исследование структурно-фазового состояния, физических, механических и технологических свойств сплавов системы Al-Mg-Sc. Установлено, что наибольшее упрочнение наблюдается в сплавах, содержащих 8 % магния. Оптимальная концентрация скандия для повышения механических свойств установлена в пределах 0,15-0,3 %. Сообщается о повышении прочностных характеристик сплавов алюминия с магнием при легировании со скандием. В системе Al-Mg-Sc в зависимости от содержания скандия и магния могут выделяться Al_3Mg_2 , $Al_3Mg_2 + Al_3Sc$ и Al_3Sc , находящиеся в равновесии с α -твердым раствором [3].

Техника измерения твердости по Бринеллю

Твердость сплавов измеряли согласно методу Бринелля на твердомере ТШ-2. Проверке подверглись образцы-таблетки толщиной 10 мм и диаметром 14 мм [6].

Диаметр шарика выбирают в зависимости от толщины изделия ($D = 10; 5; 2,5$ мм). Нагрузку P выбирают в зависимости от диаметра шарика и измеряемой твердости. При $D = 10$ мм $P = 30000$ Н, время – 10 секунд.

Между твердостью по Бринеллю и пределом прочности металла или сплавов существует приближенная эмпирическая зависимость:

$$\sigma_b = K \cdot HB, \text{ Па,}$$

где значение коэффициента K для алюминиевых и цветных сплавов равно $\sigma_b = 0,34 \dots 0,35$ HB. В зависимости от этого подсчитаны значения σ_b для исследуемых сплавов.

Результаты исследования твердости по Бринеллю сплавов системы алюминий-магний-редкоземельный металл (РЗМ), где РЗМ – Sc, Y, La, Pr, Nd представлены в табл. 3. Среднее значение определено по результатам трёх измерений [6, 7].

Таблица 3

Твердость сплава АМг4, легированного редкоземельными металлами

Твёрдость алюминия по Бринеллю – 24...32 кгс/мм²

| Состав сплавов, мас. % | *Твёрдость HB, кгс/мм ² | *Твёрдость HB, МПа | Расчетная прочность, МПа |
|------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Al | 24...32 | 240-320 | 81,6-108,8 |
| АМг4 | 38,56 | 385,6 | 134,9 |
| АМг4 + 0,01Sc | 40,69 | 406,9 | 142,4 |
| АМг4 + 0,05Sc | 42,53 | 425,3 | 148,8 |
| АМг4 + 0,1Sc | 44,47 | 444,7 | 155,6 |
| АМг4 + 0,5Sc | 44,46 | 444,6 | 155,6 |
| АМг4 + 0,01Y | 41,27 | 412,7 | 144,4 |
| АМг4 + 0,05Y | 41,91 | 419,1 | 146,6 |

| Состав сплавов, мас. % | *Твёрдость НВ, кгс/мм ² | *Твёрдость НВ, МПа | Расчетная прочность, МПа |
|------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| АМг4 + 0,1Y | 42,43 | 424,3 | 148,5 |
| АМг4 + 0,5Y | 42,29 | 422,9 | 148,0 |
| АМг4 + 0,01La | 41,68 | 416,8 | 145,8 |
| АМг4 + 0,05La | 42,41 | 424,1 | 148,4 |
| АМг4 + 0,1La | 43,26 | 432,6 | 151,4 |
| АМг4 + 0,5La | 43,2 | 432 | 151,2 |
| АМг4 + 0,01Pr | 41,35 | 413,5 | 144,7 |
| АМг4 + 0,05Pr | 42,21 | 422,1 | 147,7 |
| АМг4 + 0,1Pr | 42,16 | 421,6 | 147,5 |
| АМг4 + 0,5Pr | 42,0 | 420 | 147,0 |
| АМг4 + 0,01Nd | 39,51 | 395,1 | 138,2 |
| АМг4 + 0,05Nd | 40,09 | 400,9 | 140,3 |
| АМг4 + 0,1Nd | 40,13 | 401,3 | 140,4 |
| АМг4 + 0,5Nd | 39,98 | 399,8 | 139,9 |

* – среднее значение определено по результатам трёх измерений

Как видно из табл. 3 и рис. 1, при добавке редкоземельных элементов до 0,1 мас. % твердость исходного сплава повышается.

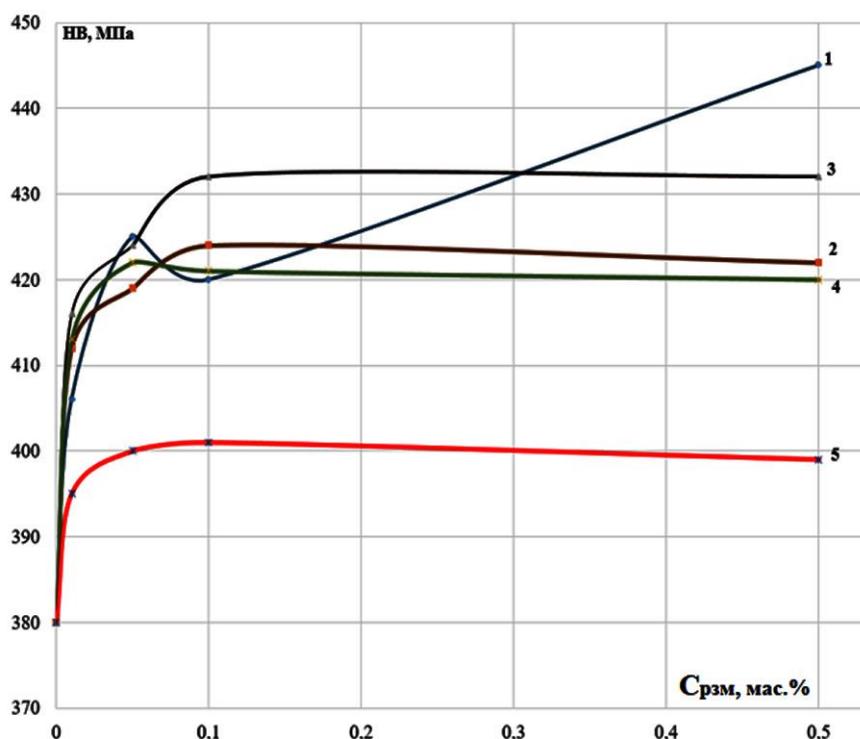


Рис. 1. Зависимость влияния Sc (1), Y(2), La(3), Nd (4) и Pr (5) на твердость сплава АМг4

При увеличении концентрации легирующих добавок более 0,1 мас. % роста твердости сплавов не наблюдается. Среди изученных редкоземельных элементов наибольшее положительное воздействие оказывают добавки скандия. Из этих результатов следует, что повышение концентрации более 0,1 мас. % указанными элементами можно считать нецелесообразным.

По результатам твердости сплавов определены их расчетные значения прочности, которые представлены на рис. 2.

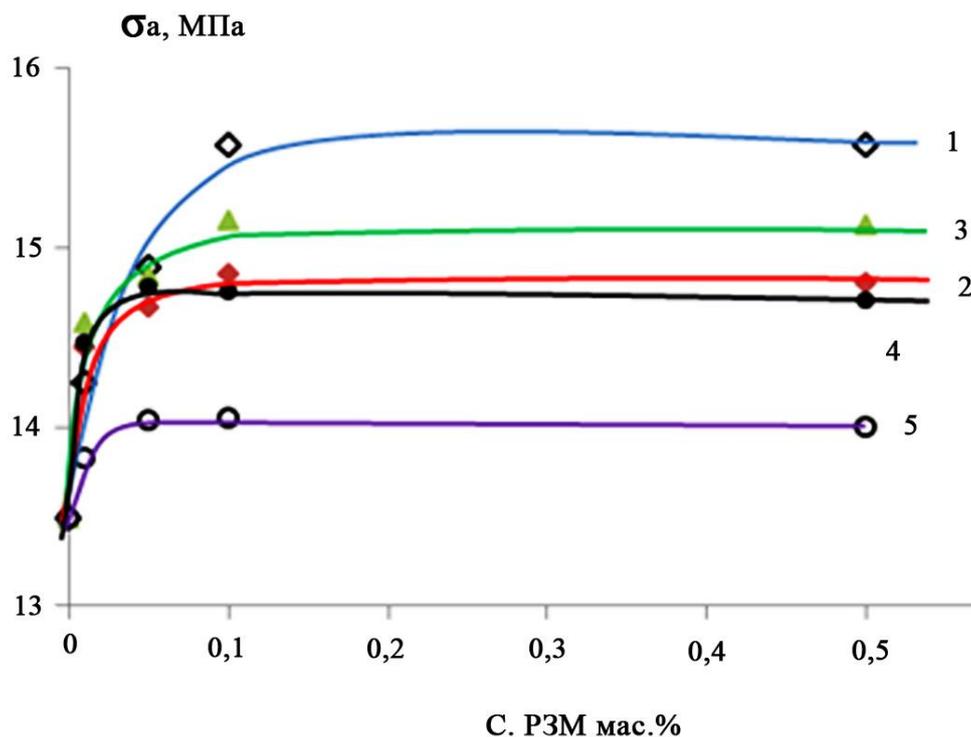


Рис. 2. Влияние Sc(1), Y(2), La(3), Nd(4) и Pr(5) на расчётную прочность сплава АМг4

Среди исследованных составов максимальное значение расчетной прочности наблюдается у сплава, легированного скандием и лантаном. Исходя из результатов изучения структуры, такой характер влияния скандия можно объяснить его модифицирующим эффектом.

Заключение

Малые добавки растворимых в алюминии редкоземельных элементов приводят к незначительному изменению механических свойств. При этом более выраженное влияние оказывает скандий, что связано, по-видимому, с электронным строением скандия, размерным фактором. Оптимальные концентрации РЗМ в сплаве АМг4 составляют 0,05-0,1 мас.%.

Список источников

1. Влияние титана, ванадия и ниобия на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава АМг2 / Ф.С. Давлатзода, И.Н. Ганиев, Н.Ф. Иброхимов, П.Н. Караев, С.С. Раджабалиев // Политехнический вестник. Сер. Инженерные исследования. 2019. № 2 (46). С. 67-71.
2. Белицкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник / под общ. ред. акад. РАН И.Н. Фридляндера. Киев: «КОМИНТЕХ», 2005. 365 с.
3. Влияние скандия на физико-химические свойства сплава АМг4 / С.Ж. Иброхимов, Б.Б. Эшов, И.Н. Ганиев, Н.Ф. Иброхимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 4. С. 256-260.
4. Иброхимов С.Ж., Эшов Б.Б. Физико-химия и механика легированных алюминий-магниевого сплавов // Таджикская наука – ведущий фактор развития общества: материалы научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов. Душанбе, 26-27 апреля 2017 г. / ТГУ имени академика М.С. Осими. Душанбе, 2017. С. 169-172.
5. Особенности формирования структуры и свойств литейных Al-Mg сплавов, легированных скандием / В.В. Черкасов, П.П. Побежимов, Л.П. Нефедова, Е.В. Белов и др. URL: www.viam.ru/public
6. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. Москва: Машиностроение, 1990. 224 с.
7. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев и др. Москва: Мир, 2004. 161 с.

Сведения об авторах

Иброхимов Сухроб Жанайдуллоевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Республика Таджикистан

Sukhrob Zh. Ibrohimov – Senior Lecturer, Department of Life Safety and Ecology, Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, Republic of Tajikistan

Химические технологии, науки о материалах, металлургия

Ганиев Изатулло Наврузович –
академик, доктор химических наук,
профессор кафедры «Технология
химического производства»
Таджикского технического университета
имени академика М.С. Осими,
Республика Таджикистан

Izatullo N. Ganiev –
Academician, Dr.Sci.(Chemistry),
Professor, Department of Chemical
Production Technology, Tajik
Technical University named after
academician M.S. Osimi,
Republic of Tajikistan

Эшов Бахтиёр Бадалович –
доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Института химии имени В.И. Никитина
Академии наук Республики Таджикистан

Bakhtiyor B. Eshov –
Dr.Sci. Tech., Leading Research
Fellow, V.I. Nikitin Institute of
Chemistry, Academy of Sciences,
Republic of Tajikistan

Статья поступила в редакцию 25.01.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

О.А. Маркелова, С.Я. Пичхидзе, А.А. Фомин

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ
ВНУТРИКОСТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТОДА ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ
МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫМ ФИЛАМЕНТОМ**

Аннотация. Предложен метод создания персонализированных конструкций с использованием новой перспективной технологии трехмерной печати, заключающейся в послойной печати металл-полимерным филаментом и последующей термообработке полученной конструкции. Приведены микрофотографии металл-полимерного филамента и образцов, напечатанных на 3D-принтере с использованием данного материала. Установлены технологические режимы трехмерной печати металл-полимерным филаментом, такие как высота слоя, максимальная высота слоя, скорость печати, температура сопла, температура подогрева стола.

Ключевые слова: аддитивные технологии, металлонаполненный филамент, металл-полимерный филамент, 3D-печать

O.A. Markelova, S.Ya. Pichkhidze, A.A. Fomin

**TECHNOLOGY FOR CREATING INDIVIDUAL
INTRAOSSUEOUS CONSTRUCTIONS USING THE METHOD
OF LAYERED METAL-POLYMER FILAMENT PRINTING**

Abstract. A method for creating personalized structures using a novel and promising technology of 3D-printing, which integrates a layered metal-polymer filament printing and subsequent heat treatment of the resulting structure, is proposed. Microphotographs of the metal-polymer filament and 3D-printer samples using the given material are presented. Technological modes of metal-polymer filament 3D-printing, such as layer height, maximum layer height, printing speed, nozzle temperature, and table heating temperature, have been established.

Keywords: additive technologies, metal-filled filament, metal-polymer, 3D-printing

Введение

Несмотря на то, что приживаемость имплантатов составляет 95-97 %, остается риск отторжения вследствие преимплантантной инфекции или биологических факторов, нарушающих остеогенез, например остеопороза. Перспективным является придание имплантируемым внутрикостным конструкциям формы, приближенной к анатомической, что позволит учитывать особенности конкретного пациента, а в некоторых случаях такая форма является необходимой при имплантации, например при сложном протезировании.

Известны несколько методик создания персонализированных конструкций для инженерии костной ткани (рис. 1). Традиционная технология заключается в получении заданной формы с использованием известных технологических процессов, таких как литье, штамповка, механическая обработка и т. д. [1-4]. Данная методика позволяет массово получать конструкции, обладающие унифицированными размерами. Для создания индивидуальных конструкций необходима разработка каждый раз новой оснастки и инструмента, что является дорогостоящим и нетехнологичным.

Передовым методом изготовления индивидуальных имплантируемых изделий медицинского назначения является применение технологий 3D-моделирования в совокупности с методами аддитивного производства [5-10].

Методика получения изделий во многом зависит от используемой технологии трехмерной печати. Существующие методы и технологии печати можно классифицировать в зависимости от используемых материалов и способов воздействия на них [11]. Наиболее распространенными методами формирования объемных конструкций сложной геометрии с высокой точностью являются: стереолитография (SLA-метод, основанный на фотополимеризации слоев), селективное лазерное сплавление (SLM), селективное лазерное спекание (SLS), сплавление электронным лучом (EBM), экструзия материалов (ME) [12]. Несмотря на эффективность данных методов, они являются дорогостоящими и сложными в реализации; кроме того, в изделии возникают сложные термомеханические напряжения, которые влияют на механические свойства готового изделия [13]. В связи с этим интерес представляет разработка технологии трехмерной печати металлами, которую можно реализовать, применяя недорогое технологическое оборудование, в частности распространенные 3D-принтеры, использующие технологию послойного плавления пластика.

Известно, что определенное значение плотности ткани или органа человека соответствует различным цветам на томограмме. Следовательно, выбрав интервал плотности, можно выделить требуемую ткань или орган человека. Основываясь на полученных данных и применяя метод 3D-моделирования, можно создавать максимально приближенный к форме дефекта объект, т. е. индивидуальное медицинское изделие. Полученные ком-

пьютерные модели загружаются в системы конечноэлементного анализа, где проводятся численные эксперименты. Таким образом, построение индивидуализированной модели позволяет не только проанализировать ее геометрические особенности, но и исследовать напряженно-деформированное состояние созданной системы и дать прогноз поведения составляющих ее структур при воздействии нагрузок.

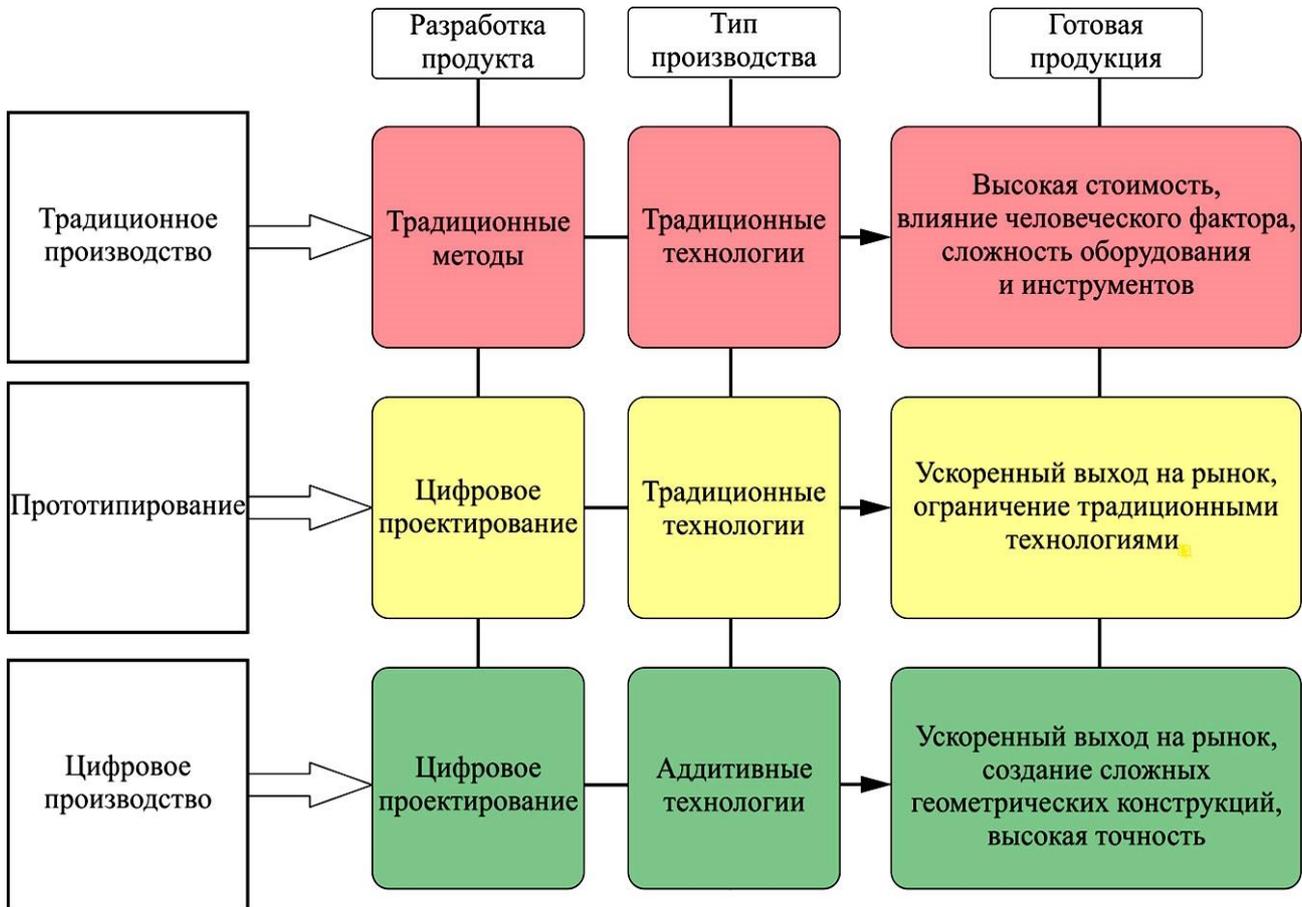


Рис. 1. Сравнение типов производства

Для создания персонализированных конструкций предлагается использовать новую перспективную технологию трехмерной печати, основанную на методе FDM и заключающуюся в послойной печати металлонаполненным (металл-полимерным) филаментом и последующей термообработке полученной конструкции. Предложенная технология обладает актуальностью в области разработки новых материалов и аддитивных технологий за счет возможности регулирования пористости и прочности полученных конструкций и возможностью дальнейшей модификации газотермическими и электрохимическими методами для создания композитных наноструктурированных биоактивных покрытий.

Разработанная технология включает следующие основные этапы (рис. 2):

1. Подготовка порошка для получения металлонаполненного филамента. Смешение металлического порошка (70 %), связующего полимера (25 %) и специальных добавок (5 %).
2. Смешение в шаровой мельнице порошков.
3. Экструзия филамента с параллельным нагревом гранул.
4. Трехмерная печать металлонаполненным филаментом при следующих технологических режимах: высота слоя – $0,5 \pm 0,5$ мм, максимальная высота слоя – $0,8 \pm 0,5$ мм, скорость печати – 10 ± 1 мм/мин, температура сопла – $230 \pm 5^\circ \text{C}$, температура подогрева стола – $70 \pm 5^\circ \text{C}$.
5. Удаление связующего вещества путем нагрева изделия и выдержкой в течение определенного времени.
6. Спекание изделия в вакуумной печи.

1. Подготовка материалов 2. Подготовка смеси 3. Изготовление филамента

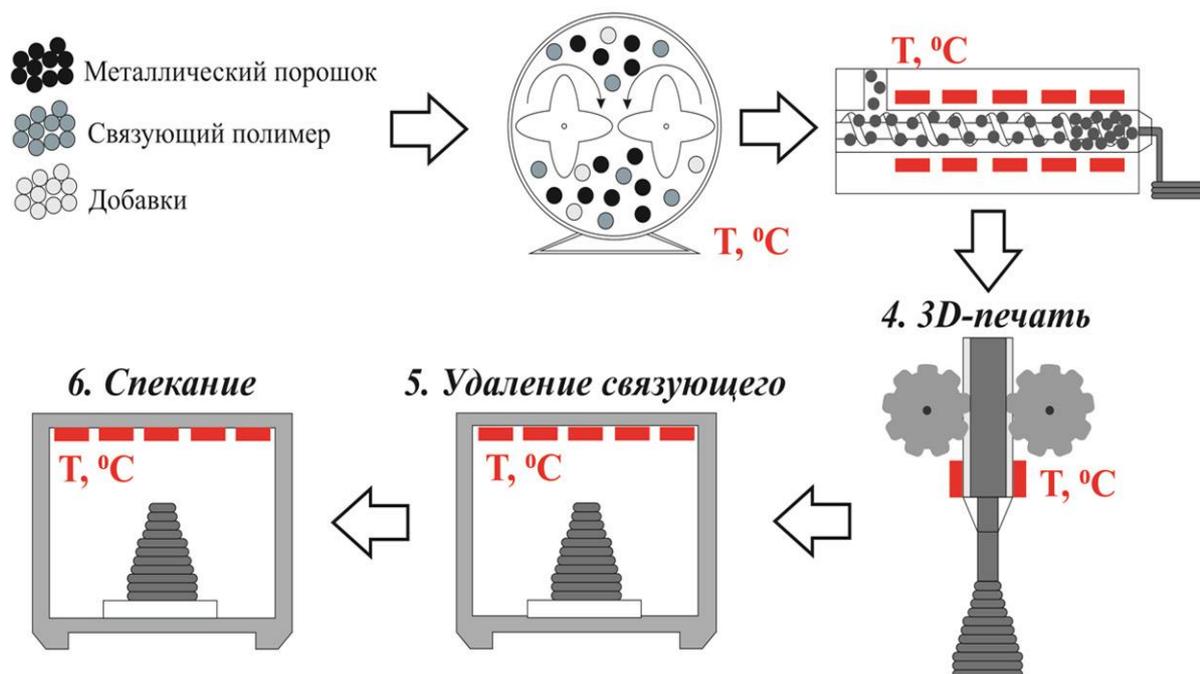


Рис. 2. Технология получения трехмерных конструкций методом послойной печати металлонаполненным филаментом

Филаменты (рис. 3) на основе порошка стали и алюминия со смесью с полимером PVA были получены по оригинальным методикам. Исследование структуры филамента показало, что он состоит из длинных нитей полимера с включением частиц металла размером до 40 мкм. Анализ поверхности образцов, напечатанных с исполь-

зованием 3D-принтера для послойной печати, показывает, что при печати филаментом с алюминием удастся создать ровные слои без дефектов в отличие от печати филаментом с частицами стали. В слоях сформированных образцов имеются частицы металла размером 20-40 мкм, связанные расплавленным и затвердевшим полимером. Металлические частицы распределены равномерно по всей поверхности и занимают 50-60 % объема образца.

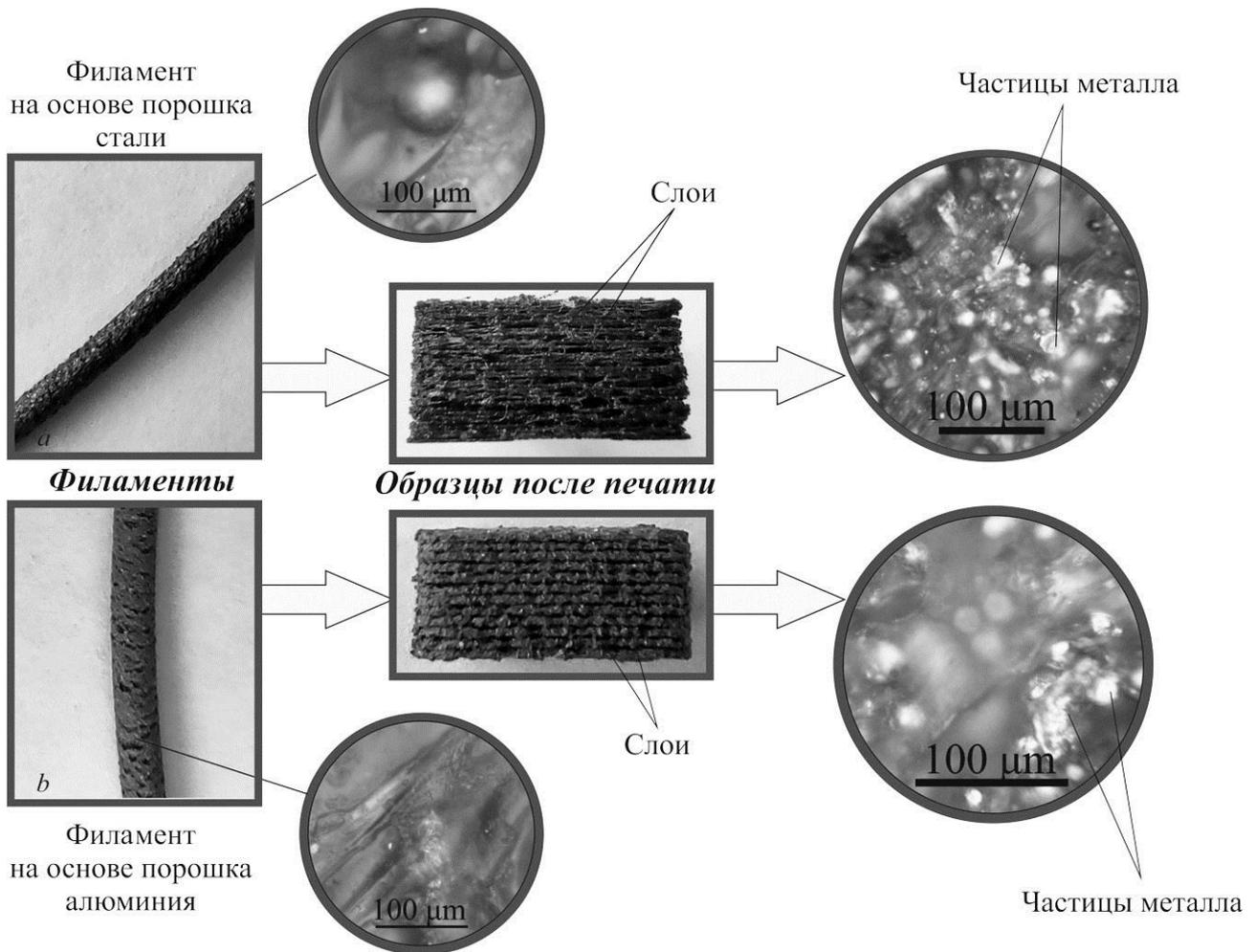


Рис. 3. Филаменты на основе порошка стали (а) и алюминия (б) и напечатанные образцы на их основе

После термической обработки образцы имеют усадку порядка 20-30 %, что является значительным и влияет на форму готового изделия. При этом на этапе предварительного удаления связующего вещества, осуществляется медленный нагрев изделия в течение 6-8 ч, за счет чего удастся добиться равномерной усадки готового изделия.

С помощью технологии плазменного напыления на полученных изделиях можно формировать слоистые пористые наноструктурированные покрытия, обладающие заданными характеристиками. За счет представленной методики и применения нескольких технологий удастся максимально воссоздавать объекты по размерам, форме и структуре соответствующие утраченным органам и тканям.

Заключение

Разработана аддитивная технология трехмерной печати имплантационных конструкций с использованием нового типа материала – металлонаполненного (металл-полимерного) филамента. Дальнейшее развитие технологии заключается в разработке методик термической обработки внутрикостных индивидуальных конструкций для различных металлов, входящих в состав филаментов. Актуальной является модификация поверхности полученных конструкций с использованием электрофизических и электрохимических методов. Разработанная технология послойной печати может также использоваться для изделий приборо- и машиностроения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов СП-50.2022.4.

Список источников

1. Дентальная имплантология: учеб. пособие / Ф.З. Мирсаева, М.Б. Убайдуллаев, А.Б. Вяткина, С.Ш. Фаткуллина; под ред. проф. Ф.З. Мирсаевой. Уфа: Изд-во ГБОУ ВПО БГМУ Минздрава России, 2015. 124 с.

2. Иванов А.С. Основы дентальной имплантологии: учеб. пособие. 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: СпецЛит, 2013. 63 с.

3. Конструирование, производство и применение внутрикостных стоматологических имплантатов: учеб. пособие для студентов специальности 190500. Ч. 2 / В.Н. Бекренев, Н.В. Протасова, И.В. Родионов, А.В. Лясникова. Саратов, 2003. 93 с.

4. Фандеев В.П., Базыкина К.С. Проблема конструирования протезов межпозвонковых дисков // Вестник Пензенского государственного университета. 2014. № 2 (6). С. 90-98.

5. Производство новых внутрикостных остеointегрируемых имплантатов методом аддитивных технологий / В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц, А.В. Анিকেев,

А.А. Еманов // Вестник Курганского государственного университета. 2017. № 2 (45). С. 120-125.

6. Проблемы и перспективы применения аддитивных технологий при изготовлении кастомизированных имплантатов для травматологии и ортопедии / А.В. Губин, В.П. Кузнецов, Д.Ю. Борзунов, А.А. Корюков, А.В. Резник, А.Ю. Чевардин // Медицинская техника. 2016. № 4 (298). С. 52-55.

7. Зленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2013. С. 87-96.

8. Машинные дизайн-технологии быстрого прототипирования / И.Б. Челпанов, С.О. Никифоров, Т.В. Кочева, Б.С. Никифоров // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2010. № 9. С. 283-289.

9. Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1 // Омский научный вестник. 2016. № 1 (145). С. 12-17.

10. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 2 / С.Н. Литунов, В.С., Слободенюк, Д.В. Мельников, В.В. Федянин, Н.С. Кошечева // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 20-24.

11. Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. Изучение методов и технологий трехмерной печати для получения высокопористых материалов // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 6 (229). С. 85-87.

12. Qu H. Additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds // Materials Today Communications. 2020. Vol. 24. P. 101024.

13. 3D-printing metals like thermoplastics: Fused filament fabrication of metallic glasses / M.A. Gibson, N.M. Mykulowycz, J. Shim, R. Fontana, P. Schmitt, A. Roberts, J. Ketkaew, L. Shao, W. Chen, P. Bordeenithikasem, J.S. Myerberg, R. Fulop, M.D. Verminski, E.M. Sachs, Y. Chiang, C.A. Schuh, A.J. Hart, J. Schroers // Materials Today, 2018. Vol. 21, Iss. 7. P. 697-702.

Сведения об авторах

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

Olga A. Markelova – Ph.D (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Химические технологии, науки о материалах, металлургия

=====

Пичхидзе Сергей Яковлевич –

доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey Ya. Pichkhidze –

Dr.Sci. Tech., Senior Research Fellow, Professor, Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Фомин Александр Александрович –

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksander A. Fomin –

Dr.Sci. Tech., Associate Professor, Head: Department of Materials Science and Biomedical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.01.2023, принята к опубликованию 06.03.2023

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник Саратовского государственного технического университета», 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

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

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

2.5 – Машиностроение

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

2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)

2.6 – Химические технологии, науки о материалах, металлургия

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!

| <u>Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник Саратовского государственного технического университета»</u> | | |
|--|------------------------|--|
| Фамилия | Имя | Отчество |
| Полное название статьи | | |
| Ученая степень | Ученое звание | Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории |
| Наименование организации – места работы | | |
| Электронная почта | Служебный телефон/факс | Домашний адрес и телефон |
| Группа специальностей, к которой относится статья | | |