
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№ 1(5)
2017

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования
в машиностроении» (11 – 15 сентября 2017 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 17-08-20448)*

Севастополь 2017

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., доц. – ГОЛОВИН В.И.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

БАКУЛИНА А.Н.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. н., проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ВЕТРОГОН А.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., проф. (г. Белгород)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МЕШКОВ В.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НЕМЕНКО А.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
НИЧКОВА Л.А.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СЕВРИКОВ В.В.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ФИЛИПОВИЧ О.В.	к. т. н., доц. (г. Севастополь)
ХАРЧЕНКО А.О.	к. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Бондарчук Е.Ю., Н.Д. Бондарчук Н.Д., А.Н. Феофанов А.Н., Гришина Т.Г. Обзор состояния перехода высокотехнологичных и наукоемких предприятий машиностроения к структуре виртуального предприятия	4
Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О. Перспективы повышения качества деталей при круглошлифовальной обработке в условиях плавающей мастерской	11
Дьяконов А.А., Шипулин Л.В., Шмидт И.В. Определение логарифмического декремента затухания колебаний металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков	26
Максимов А.Б., Гадеев А.В., Ерохина И.С. Коэрцитиметрия в мониторинге качества стальных конструкций	32
Нефёлов И.С., Баурова Н.И. Способы предотвращения технологических дефектов деталей машин, изготовленных с использованием аддитивных технологий	36
Саетшин А.А., Борбузанов В.Г., Валишина З.Т., Матухин Е.Л., Косточко А.В. Интенсификация технологии измельчения и методы исследования структуры волокнистых материалов в процессе получения	41
Тарасова Т.В., Аблеева Р.Р. Изготовление изделий методом селективного лазерного плавления из порошков алюминиевых сплавов	48
Чалая Е.Ю. Усовершенствование цилиндрических арочных передач смешанного зацепления синтезом исходного контура по геометрокинематическим критериям	52
Шамиева А.Р., Иванов Ю.Ф., Лопатин И.В. Разработка комбинированного метода модифицирования поверхности технически чистого алюминия	60

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

Chief Editor	
D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.	
Associate Editor in Chief	
Ph.D., Associate Prof. – GOLOVIN V.I.	
Scientific Editor	
D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.	
Executive Secretary	
Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.	
Editorial team	
BAKULINA A.N.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
BERENGARTEN M.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
VETROGON A.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
DUYUN T.A.	D.Sc., Prof. (Belgorod)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MESHKOV V.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NEMENKO A.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NICHKOVA L.A.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SEVRIKOV V.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (St. Petersburg)
FILIPOVICH O.V.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)
KHARCHENKO A.O.	Ph.D., Associate Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Bondarchuk E.Y., Bondarchuk N.D., Feofanov A.N., Grishina T.G. Overview of the state of transition of high-tech and science-intensive engineering enterprises to the structure of a virtual enterprise.....	4
Vladetskaya E.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O. Prospects of increasing the quality of details in the round-grinded treatment under the conditions of the floating workshop.....	11
Dyakonov A.A., Shipulin L.V., Shmidt I.V. Definition of logarithmic decrement damping vibrations metallconcrete basic elements of machine tools.....	26
Maksimov A.B., Gadeev A.V., Erokhina I.S. Coarticulatory in monitoring quality of steel structures.....	32
Nefelov I.S., Baurova N.I. Way to prevent technological defects machine parts manufactured using additive technology.....	36
Saetshin A.A., Borbuzanov V.G., Valishina Z.T., Matuhin E.L., Kostochko A.V. Intensification of grinding technology and methods for studying the structure of fibrous materials in the process of its production.....	41
Tarasova T.V., Ableyeva R.R. Fabrication of parts by selective laser melting using aliminum alloys.....	48
Chalaya E.U. Improvement of arch cylindrical gear mixed gearing by synthesis of the original circuit geometrodynamics criteria.....	52
Shamieva A.R., Ivanov Yu.F., Lopatin I.V. Development of the combined method modification of surface of technically pure aluminium.....	60

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 621.92

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ПЕРЕХОДА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ И НАУКОЕМКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ К СТРУКТУРЕ ВИРТУАЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.Ю. Бондарчук¹, Н.Д. Бондарчук¹, А.Н. Феофанов¹, Т.Г. Гришина¹¹ФГАОУ ВО «Московский Государственный Технический Университет «СТАНКИН», Москва, Российская федерация

Аннотация

Борьба за рынок вынуждает отечественные предприятия постоянно совершенствовать свои технологии. По структуре управления предприятием будем рассматривать предприятия с функционально-процессной структурой управления или бесцеховые предприятия, как предписывается в семействе стандартов ИСО 9000. Рассмотрено развитие оптовой компании по доставке автозапчастей в регионы на примере компании AUTODOC. С внедрением виртуального предприятия время доставки продукта от изготовителя до заказчика сократилось в 4-6 раз. В машиностроении пока только решается проблема адекватного моделирования, то есть установления соответствия между физическим и информационным пространством.

Ключевые слова: совершенствование технологий, виртуальное предприятие, интернет-ресурсы, субконтракция, машиностроение.

OVERVIEW OF THE STATE OF TRANSITION OF HIGH-TECH AND SCIENCE-INTENSIVE ENGINEERING ENTERPRISES TO THE STRUCTURE OF A VIRTUAL ENTERPRISE

E.Y. Bondarchuk¹, N.D. Bondarchuk¹, A.N. Feofanov¹, T.G. Grishina¹¹Moscow State Technical University "STANKIN", Moscow, Russian Federation

Abstract

The struggle for the market forces domestic enterprises to constantly improve their technologies. According to the structure of enterprise management, we will consider enterprises with a functional-process management structure or unfiliated enterprises, as prescribed in the ISO 9000 family of standards. The development of a wholesale company for the delivery of auto parts to regions by the example of AUTODOC is considered. With the introduction of a virtual enterprise, the delivery time of the product from the manufacturer to the customer was reduced by 4-6 times. In engineering, the problem of adequate modeling, that is, establishing a correspondence between the physical and information space, is being solved.

Keywords: Perfection of technologies, virtual enterprise, Internet resources, subcontracting, engineering.

Борьба за рынок вынуждает отечественные предприятия постоянно совершенствовать свои технологии, производственные фонды, структуру, управление, готовить и вести переподготовку кадров. Эта деятельность предприятий связана с необходимостью овладения наукоемкими, современными, быстро обновляемыми производственными, обучающими и информационными технологиями. Прежняя структура предприятия просто множество цехов, отделов и групп, а не совокупность бизнес-процессов

не выдерживает конкуренции. Практика доказывает, что работа должна быть организована вокруг бизнес-процессов [8, 11].

Производственное предприятие – это обособленная специализированная единица, основанием которой является профессионально организованный трудовой коллектив, способный с помощью имеющихся в его распоряжении средств производства изготовить нужную потребителям продукцию (выполнять работы, оказывать услуги) соответствующего назначения, профиля и ассорти-

мента [16]. Однако, трудовой коллектив на сегодня будем рассматривать не как одно целое, а распределенное географически профессиональное сообщество, изменяющееся в зависимости от выпускаемой продукции. Тогда «обособленная специализированная единица» уже не единица, а множество единиц. Получаем виртуальное производственное предприятие или виртуальное предприятие. Виртуальное предприятие тогда представляет собой группу производственных предприятий, объединяющих свои силы для изготовления определенной продукции или предоставления определенной услуги, которая традиционно предоставлялась одним предприятием.

По структуре управления предприятием будем рассматривать предприятия с функционально-процессной структурой управления или бесцеховые предприятия, как предписывается в семействе стандартов ИСО 9000.

К началу нового века использование сетевых принципов организации компаний становится в западных странах ведущим направлением. Это обусловлено следующим:

- постоянным изменением внешней среды и необходимостью адаптации компаний к этим изменениям;
- постоянным усложнением производственной и коммерческой деятельности компаний;
- повышением значения фактора времени (повышение оперативности действий требует нового подхода к методам производства и управления);
- расширением пространства компании (если она хочет выжить, надо очень быстро раздвинуть свой рынок до национальных, а затем до мировых масштабов);
- низкой эффективностью общепринятых форм кооперации при решении сложных проблем хозяйственной деятельности;
- стремлением к автономным формам труда;
- наличием межорганизационных систем информации и коммуникации [17].

Необходимые условия для возникновения виртуальных компаний. Человечество

вступило в новую стадию своего развития - "стадию построения информационного общества", а информационное общество можно характеризовать следующими особенностями:

- любой человек или группа лиц могут в любом месте и в любое время свободно иметь доступ через автоматизированные системы связи к любой необходимой для них информации;

- любой человек или группа лиц умеют использовать современную информационную технологию для решения стоящих перед ними проблем;

- любой человек, группа лиц или общество в целом имеют необходимые технические средства, инфраструктуру и социальную базу для производства и воспроизводства требуемой информации.

Термин «виртуальное предприятие» используется в двояком смысле. В более абстрактном контексте он означает передовую и эффективную форму организации компании из ряда «мысленно возможных», которая является наилучшей с точки зрения имеющихся технических и экономических условий [13]. В другом смысле виртуальное предприятие интерпретируется как «искусственно образованное» или как «мнимое, не существующее в реальном физическом пространстве» [14]. Кратко виртуальное предприятие определяется как кооперирование юридически независимых предприятий или частных лиц для обеспечения услуг (производства) на основе общего понимания бизнеса. Иначе говоря, виртуальные предприятия представляют собой группы людей, совместно занимающихся общим бизнесом, независимо от их фактического места работы и местонахождения, в том числе независимо от страны, где они находятся.

Более детально виртуальное предприятие определяется следующим образом [15]. Виртуальное предприятие – это временная межпроизводственная кооперация ряда юридически независимых предприятий, которая создается в короткий срок и поддерживается с помощью современных информационных технологий.

Техническими предпосылками появления виртуальных предприятий явились компьютеризация производства и информационная интеграция.

Виртуальные предприятия, основанные на информационных технологиях, характеризуются следующими принципиальными особенностями:

1. решаемые задачи выходят за границы отдельного предприятия или организации, участники информационного взаимодействия (производитель конечного изделия, поставщики материалов и комплектующих, потребители, сервисные службы и др.) могут быть территориально удалены друг от друга, располагаться в разных городах и даже странах;

2. осуществляется информационная интеграция всех процессов жизненного цикла изделия, в отличие от компьютерной автоматизации и интеграции отдельных процессов, например, в производстве;

3. технологии представления, обмена и корректной интерпретации данных для совместного использования должны быть стандартизованы, поскольку совместно используемая информация очень разнородна: это маркетинговые, конструкторско-технологические, производственные данные, данные мониторинга изделий в процессе эксплуатации и обслуживания и т.д.;

4. основной средой передачи данных служит глобальная сеть Интернет, кроме особых случаев, обусловленных требованиями информационной безопасности [4].

Уже в 80-е годы было осознано, что устоять в конкурентной борьбе смогут только те предприятия, которые будут применять в своей деятельности современные информационные технологии (ИТ). Именно ИТ наряду с прогрессивными технологиями материального производства позволяют существенно повысить производительность труда и качество выпускаемой продукции при значительном сокращении сроков постановки на производство изделий, отвечающих запросам и ожиданиям потребителей [1]. Постоянное расширение и углубление возможностей интернет-ресурсов изменяет возможности информационного обеспечения пред-

приятия. Этому способствует развитие электронной коммерции. Интернет торговля развивается активно и охватила весь непродовольственный рынок. Крупнейшие предприятия интернет-торговли Amazon (1995), eBay(1995), Alibaba (2007) и другие. eBay это не только крупнейший Веб-сайт, но и аукцион. Здесь можно купить новые и поддержанные товары, а также продать. Ваши старые вещи на аукционе. eBay стоят приблизительно \$10 миллиардов. Alibaba — китайская компания электронной коммерции, которая относительно недавно начала свою работу (2007 год). Она имеет миллионные доходы и находится среди лучших 100 веб-сайтов в мире. В структуре интернет-торговли преобладают операции с потребительской электроникой и техникой (42%), одеждой и обувью (13%) и автозапчастями (10%) [18].

Рассмотрим развитие оптовой компании по доставке автозапчастей в регионы на примере компании AUTODOC (<https://www.autodoc.ru>). На рис. 1 показана общая структура компании образца до 2000г., где сплошными линиями показаны материальные потоки, прерывистыми — информационные.

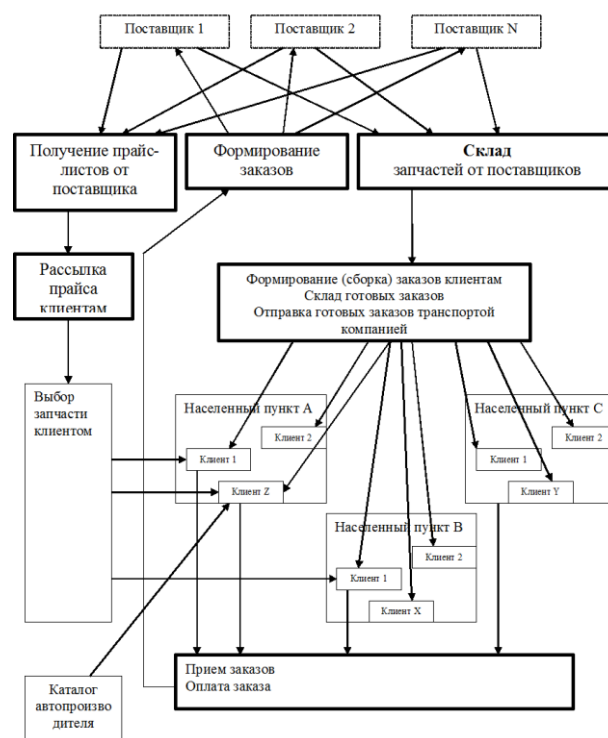


Рис. 1. Структура компании AUTODOC

Поставщик 1 (или 1,2...N) отправляет прайс-лист на бумажном носителе почтой (курьером) в оптовую компанию. Срок доставки – несколько дней. Или отправляет прайс-лист электронной почтой в оптовую компанию. Срок доставки: до нескольких мин. В оптовой компании AUTODOC формируется общий прайс-лист от всех поставщиков и рассылается потенциальным заказчикам по эл. почте. Заказчик 1 (и/или 1, 2...Z, X, Y) определяет необходимые запчасти в соответствии с каталогом автопроизводителя, находит их в прайс-листе AUTODOC и отправляет заказ на отдельные позиции прайс-листа в AUTODOC. Формируются отдельные заказы на автозапчасти по каждому поставщику в виде накладной. Поставщики отправляют автозапчасти на склад AUTODOC, где проводится входной контроль и разбор по заказам клиентов. Формируется упаковка заказа конкретному клиенту на складе выдачи заказов. В случае оплаты заказа, отправка в конкретный населенный пункт. Время получения заказа от 4-6 дней. На каждом участке возможны ошибки (не то заказали, не то отправили, не поступил платеж), как правило, исключительно человеческий фактор. На рис. 2 показаны технологические цепочки функционирования предприятия после 2000 года с использованием интернет-магазина.



Рис. 2. Технологические цепочки функционирования предприятия

Все прайсы поставщиков сразу становятся доступны заказчику (клиенту) и оперативно обновляются. Заказчики регистрируются в магазине, становятся постоянными

клиентами со своими реквизитами, с возможностью оплаты заказов электронным способом и выбором запчастей с помощью электронных каталогов на весь мировой автопарк. Клиентами компании стали не только розничные магазины, но и автосервисы и отдельные покупатели – рынок существенно расширился. Расширилась география как клиентов, так и поставщиков до планетарных размеров.

Внедрение штрих-кодов позволило отслеживать каждую поступившую деталь от прихода на склад до отправки клиенту, при этом видео-фиксация всех действий персонала компании позволяет выявить все ошибки (рис. 3). Видеотрансляция доступна всем клиентам 24 часа в сутки.

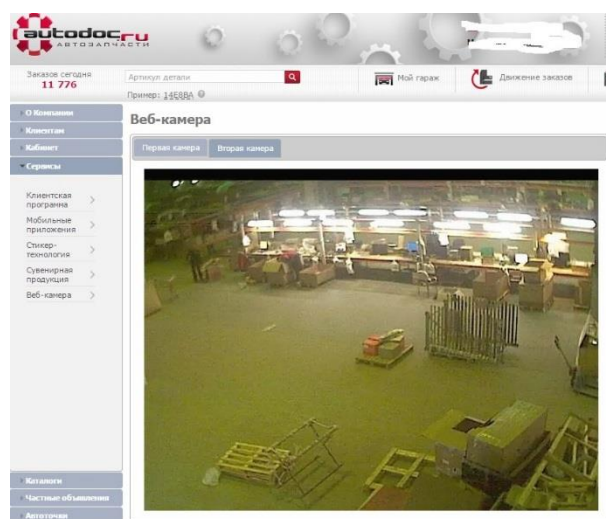


Рис. 3. Видеотрансляция всех действий персонала компании

Для расширения возможностей клиента доступны мобильные приложения интернет-магазина. Все это потребовало набрать штат сотрудников в отдел ИТ, которые следят за работой всей информационной сети, устраняют неполадки, улучшают сервисные функции. По заявлению руководства компании благодаря интернет технологиям они из оптовой трансформировались в логистическую компанию. Время доставки продукта от изготовителя до заказчика сократилось в 4-6 раз.

Развитие интернет торговли в области машиностроения развивается не достаточными темпами. Сдерживающим фактором является отсутствие общего «стандарта», как

в торговле автозапчастями. Где стандарт – каталог автозапчастей, в нем все запчасти обозначены буквенно-цифровым кодом, который одинаково понятен поставщикам и заказчикам.

В машиностроении активно развивается пока субконтрактация. Субконтрактинг (субконтрактация) — одна из форм производственного (промышленного) аутсорсинга, применяемая промышленными предприятиями для оптимизации производственных процессов. Заключается в том, что одно промышленное предприятие (контрактор) размещает на другом предприятии (субконтракторе) заказ на разработку или изготовление некоторой продукции, или на выполнение технологических процессов в соответствии с требованиями заказчика, позволяющее компании-контрактору выстроить более действенную и эффективную организационную структуру производства. Информационные системы только строятся и только по некоторым направлениям производства и функционируют не в полной мере [19].

Пока только решается проблема адекватного моделирования, т.е. установления соответствия между физическим и информационным пространством, соответственно преобразование производственных проблем в информационные, а также обратный переход из информационного мира в физический одним из эффективных средств повышения конкурентоспособности продукции, поставляемой на рынок, является широкое и комплексное применение управленческих и информационных технологий поддержки жизненного цикла (ЖЦ) продукции. В последние годы совокупность таких технологий получила обобщенное название ИПИ-технологий (ИПИ – Информационная Поддержка жизненного цикла Изделий). Непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции: концепция и идеология информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, основанная на использовании единого информационного пространства (интегрированной информационной среды ИИС), обеспечивающая единообразные способы информационного взаимодействия всех

участников этого цикла: заказчиков продукции, поставщиков (производителей) продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала, реализованная посредством нормативных документов, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support; CALS) [5, 6].

Однако проникновение и освоение новых информационных технологий в машиностроении очень медленно развивается. Например, один из ведущих производителей подшипников в СНГ корпорация ЕПК, куда входят 4 завода, инженеринговый центр и торговые дома, где непосредственно совершаются торговые операции. Во главе корпорации находится ОАО "Управляющая компания ЕПК". Только в 2016 АО "ЕПК Степногорск" (Казахстан) (завод существует с 1976 года) получил новое оборудование – станки с ЧПУ [10]. Предприятие имеет цеховую структуру производства. Существенные преимущества имеет бесцеховая структура управления производством. Она заключается в том, что количество административных звеньев сокращается, и руководство производством становится более конкретным [11]. Отдельные предприятия корпорация ЕПК только планируют переход от цеховой структуры и введение компьютерной автоматизации и интеграции отдельных процессов в производстве, но в целом корпорацию можно рассматривать как виртуальное предприятие с точки зрения функций ОАО "Управляющая компания ЕПК".

Список литературы

1. Судов Е.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / Е.В. Судов, А.И. Левин // НИЦ CALS- технологий «Прикладная логистика» – 2002.
2. Саломатина А. А. Методы и алгоритмы функционирования технологической подготовки производства в информационной среде виртуального предприятия. Диссертация КТН. Санкт-Петербург 2011.
3. Ершова И.В. Управление машиностроительным предприятием: учеб. пособие для студентов, обучающихся программе бакалавриата по направлению подготовки «Машиностроение» /

- под ред. И.В. Ершовой. // ЮНИТИ ДАНА, 2016. — С. 263.
4. Суханов А.А. Концепция развития ИПИ-технологий для продукции военного назначения, поставляемой на экспорт / А.А. Суханов, О.Н. Рязанцев, С.А. Артизов, А.Н. Бриндигов, Н.И. Незаленов, А.В. Карташев, П.М. Елизаров, Е.В. Судов // НИЦ CALS «Прикладная логистика», 2013.
 5. <http://docs.cntd.ru/document/1200028627>
 6. Левин А.И. CALS – сопровождение жизненного цикла / А.И. Левин, Е.В. Судов // Открытые системы. – 2001. – Март. – С. 58-62.
 7. Яблочников Е.И. Методы управления жизненным циклом приборов и систем в расширенных предприятиях / Е.И. Яблочников, Ю.Н. Фомина, А.А. Саломатина, В.С. Гусельников // Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 149.
 8. Фомин А. Цеховая и бесцеховая структуры управления производством. Проблемы внедрения бесцеховой структуры - М.: Эдитус, 2013. – С. 116.
 9. Туркин Д.А. Обзор зарубежного опыта реализации стратегии развития компаний высокотехнологического сектора / Д.А. Туркин, Н.И. Кробка. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016).
 10. <http://prestige-step.kz/?p=2764>
 11. Схиртладзе А.Г. Проектирование единого информационного пространства виртуальных предприятий / А.Г. Схиртладзе, А.В. Сковорцов, Д.А. Чмырь. // Абрис. –2012.
 12. Маховский А. Внедряем процессный подход / А. Маховский, В. Патешман // Настольный журнал IT-руководителя. – 2012. №11. – С. 23-28.
 13. Феофанов А.Н Информационно-аналитические системы управления промышленным предприятием / А.Н. Феофанов, А.В. Капитанов // Технология машиностроения, 201. – №7. – С. 50-57.
 14. Феофанов А.Н Автоматизированные системы идентификации и анализа рисков поставок для повышения эффективности машиностроительного производства / А.Н. Феофанов, М.В. Турапин // Янус-К, 2016. – С. 151.
 15. Феофанов А.Н Технологическое оборудование автоматизированных машиностроительных производств. Янус-К, 2017. – С. 316.
 16. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. // Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – С. 320.
 17. Титов В.И. Экономика предприятия: учебник – Эксмо, 2008. – С. 416.
 18. Владимирова И.Г. Компании будущего: организационный аспект. //Менеджмент в России и за рубежом. – 1999. №2. С. 58-72.
 19. <http://провэд.пф/analytics/16849-statistika-intepnet-topgovli-v-stpanah-mipa-osnovnye-tendentsii-i-pokazateli.html>
 20. <http://subcontract.ru/>
 21. Феофанов А.Н. Автоматизация управления показателями качества продукции и работы организации / А.Н. Феофанов, К.С. Карасев // Технология машиностроения: обзорно-аналитический, научно-технический и производственный журнал, 2010. - N 8, С. 50-51.
 22. Сковорцов А.В. Основы технологии автоматизированных машиностроительных производств : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", и специалистов "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств", "Автоматизированные технологии и производства" (специальность "Автоматизация технологических процессов и производств") / А. В. Сковорцов, А. Г. Схиртладзе // Высш. шк., 2010. – С. 588
 23. Сковорцов А.В. Автоматизация управления жизненным циклом продукции / А.В. Сковорцов, А. Г. Схиртладзе, Д.А. Чмырь. // Академия - Издательский центр 2013. - С. 320.

References

1. Sudov E.V. Kontseptsiiia razvitiia CALS-tekhnologii v promyshlennosti Rossii / E.V. Sudov, A.I. Levin // NITs CALS- tekhnologii «Prikladnaia logistika» – 2002.
2. Salomatina A. A. Metody i algoritmy funktsionirovaniia tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v informatsionnoi srede virtual'nogo predpriatiia. Dissertatsiia KTN. Sankt-Peterburg 2011.
3. Ershova I.V. Upravlenie mashinostroitel'nym predpriatiem: ucheb. posobie dlia studentov, obuchaiushchikhsia programme bakalavriata po napravleniiu podgotovki «Mashinostroenie» / pod red. I.V. Ershovoi. // IuNITI DANA, 2016. – S. 263.
4. Sukhanov A.A. Kontseptsiiia razvitiia IPI-tekhnologii dlia produktsii voennogo naznacheniiia, postavliaemoi na eksport / A.A. Sukhanov, O.N. Riazantsev, S.A. Artizov, A.N. Brindikov, N.I. Nezalenov, A.V. Kartashev, P.M. Elizarov, E.V. Sudov // NITs CALS «Prikladnaia logistika», 2013.
5. <http://docs.cntd.ru/document/1200028627>
6. Levin A.I. CALS – soprovozhdenie zhiznennogo tsikla / A.I. Levin, E.V. Sudov // Otkrytye sistemy. – 2001. – Mart. – S. 58-62.
7. Iablochnikov E.I. Metody upravleniia zhiznennym tsiklom priborov i sistem v rasshirenykh predpriatiakh / E.I. Iablochnikov, Iu.N. Fomina, A.A. Salomatina, V.S. Gusel'nikov // Uchebnoe posobie – SPb: SPbGU ITMO, 2009. – S. 149.
8. Fomin A. Tsekhovaiia i bestsekhovaiia struktury upravleniia proizvodstvom. Problemy vnedreniia bestsekhovoi struktury - M.: Editus, 2013. – S. 116.
9. Turkin D.A. Obzor zarubezhnogo opyta realizatsii strategii razvitiia kompanii vysokotekhnologicheskogo sektora / D.A. Turkin, N.I. Krobka. // In-

- ternet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 8, №3 (2016).
10. <http://prestige-step.kz/?p=2764>
 11. Skhirtladze A.G. Proektirovanie edinogo informatsionnogo prostranstva virtual'nykh predpriatii / A.G. Skhirtladze, A.V. Skvortsov, D.A. Chmyr'. // Abris. – 2012.12. Makhovskii A. Vnedriaem protsessnyi pod-khod / A. Makhovskii, V. Pateshman // Nastol'nyi zhurnal IT-rukovoditelia. – 2012. №11. – S. 23-28.
 13. Feofanov A.N Informatsionno-analiticheskie sistemy upravleniia promyshlennym predpriatiem / A.N. Feofanov, A.V. Kapitanov // Tekhnologiya mashinostroeniia, 201. – №7. – S. 50-57.
 14. Feofanov A.N Avtomatizirovannye sistemy identifikatsii i analiza riskov postavok dlia povysheniia effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva / A.N. Feofanov, M.V. Turapin // Ianus-K, 2016. – S. 151.
 15. Feofanov A.N Tekhnologicheskoe oborudovanie avtomatizirovannykh mashinostroitel'nykh proizvodstv. Ianus-K, 2017. – S. 316.16. Norenkov I.P. Informatsionnaia podderzhka naukoemkikh izdelii. CALS-tekhnologii. / I.P. Norenkov, P.K. Kuz'mik. // Izd-vo MVTU im. N.E. Bauman, 2002. – C. 320.
 17. Titov V.I. Ekonomika predpriatii : uchebnik – M. : Eksmo, 2008. – C. 416.
 18. Vladimirova I.G. Kompanii budushchego: organizatsionnyi aspekt. //Menedzhment v Rossii i za rubezhom. – 1999. №2. S. 58-72.
 19. <http://proved.rf/analytics/16849-statistika-intepnet-topgovli-v-stpanah-mipa-osnovnye-tendentsii-i-pokazateli.html>
 20. <http://subcontract.ru/>
 21. Feofanov A.N. Avtomatizatsiia upravleniia pokazateliami kachestva produktsii i raboty organizatsii / A.N. Feofanov, K.S. Karasev // Tekhnologiya mashinostroeniia: obzorno-analiticheskii, nauchno-tekhnikeskii i proizvodstvennyi zhurnal, 2010. - N 8, S. 50-51.
 22. Skvortsov A.V. Osnovy tekhnologii avtomatizirovannykh mashinostroitel'nykh proizvodstv : uchebnik dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedenii, obuchaiushchikhsia po napravleniiam podgotovki bakalavrov i magistrrov "Tekhnologiya, oborudovanie i avto-matizatsiia mashinostroitel'nykh proizvodstv", i spetsialistov "Konstruktorsko-tekhnologicheskoe obespechenie mashinostroitel'nykh proizvodstv", "Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva" (spetsial'nost' "Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv") / A. V. Skvortsov, A. G. Skhirtladze // Vyssh. shk., 2010. – S. 588
 23. Skvortsov A.V. Avtomatizatsiia upravleniia zhiznennym tsiklom produktsii / A.V. Skvortsov, A. G. Skhirtladze, D.A. Chmyr'. // Akademiia - Izdatel'skii tsentr 2013. - S. 320.

УДК 621.9-219.1-752

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРИ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ

Е.А. Владецкая¹, С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская федерация

Аннотация

Приведены результаты лабораторных исследований процесса шлифовальной обработки с учетом оценки качества поверхностей шеек валов при возмущающих вибрационных воздействиях на оборудование внешних сил, являющихся следствием морского волнения, а также соседнего работающего оборудования в условиях плавучей мастерской. Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовали экспериментальный стенд, включающий круглошлифовальный станок с комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, а также компрессор, размещаемый на разном удалении от станка, создающий при работе на разных режимах внешние вибрационные воздействия, имитирующие внешние возмущения через поверхность пола и фундамент на станину станка, соответствующие воздействиям внешней среды и работающего соседнего оборудования. Получены зависимости частоты механических колебаний (в зонах измерения – станина-фундамент и на направляющих стола станка в поперечном и вертикальном направлениях), амплитуды виброперемещения в указанных зонах от состояний круглошлифовального станка и уровней морского волнения. Определены изменения погрешности формы обрабатываемых деталей, шероховатости обрабатываемой поверхности, волнистости поверхностей шеек валов по базовому и достигнутому вариантам с учетом использования новых конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств.

Ключевые слова: плавучая мастерская, шлифовальный станок, процесс шлифовальной обработки, морское волнение, параметры вибраций, частота колебаний, амплитуда виброперемещения, погрешность формы, шероховатость поверхности, волнистость, виброизолирующая опора.

PROSPECTS OF INCREASING THE QUALITY OF DETAILS IN THE ROUND-GRINDED TREATMENT UNDER THE CONDITIONS OF THE FLOATING WORKSHOP

Е.А. Vladetskaya¹, S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The results of laboratory studies of the grinding processing process are given taking into account the evaluation of the quality of the surfaces of the shafts of the shafts with disturbing vibrational influences on the equipment of external forces that are the consequence of sea waves, as well as the neighboring operating equipment in a floating workshop. To determine the influence of external influences on the quality of processing during grinding, an experimental stand was used, including a cylindrical grinding machine with a complex of test equipment, as well as a compressor placed at a different distance from the machine, creating external vibration effects simulating external disturbances through the surface Floor and foundation on the machine bed, corresponding to the effects of the external environment and the operating neighboring equipment. The dependences of the frequency of mechanical oscillations (in the measuring zones-the base-bed and the machine table guides in the transverse and vertical directions) are obtained, the amplitude of the vibro-displacement in these zones from the conditions of the circular grinding machine and sea-wave levels. The changes in the error in the shape of the machined parts, the roughness of the machined surface, the waviness of the roll neck surfaces according to the basic and achieved variants are determined taking into account the use of new designs of effective vibration isolating supports and devices.

Keywords: floating workshop, grinding machine, grinding process, sea waves, vibration parameters, vibration frequency, vibration displacement amplitude, shape error, surface roughness, waviness, vibration isolating support.

Актуальность проблемы

Для промышленности приморских городов характерно наличие таких мобильных мини-заводов, как плавучие мастерские (ПМ) и рейдовые плавучие мастерские (ПМР) с размещенными на палубах производственными участками, в том числе и механообрабатывающими, имеющими широкий спектр станочного оборудования, включая шлифовальные станки. ПМ и ПМР способны выполнять сложные работы по изготовлению и модернизации высокотехнологичных изделий, узлов и агрегатов в удалённых от основных пунктов базирования районах. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных воздействием на него различных источников, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей в ходе технологического процесса [1, 2].

Повышение качества обработки деталей в условиях ПМ непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников, в том числе и от воздействий внешней среды – волнений водной поверхности.

Как правило, на палубах ПМ фиксация станков обеспечивается фундаментом, который не обеспечивает достаточной виброизоляции вследствие значительных внешних колебательных воздействий, которые до настоящего времени являются малоизученными и их влияние на качество обработки, особенно на финишных операциях, усложненных колебательными процессами разного уровня, не исследовалось.

В работах [3, 4, 5] выполнено моделирование взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки в условиях плавучих мастерских. Рассмотрена динамическая система со сложными стационарными и нестационарными вибрационными воздействиями, а также ударными воздействиями от внешнего оборудования и длительного морского волнения через плавучее основание и поверхность палубы.

На основе системного подхода предложена структура операции, сформулированы основные положения и методы анализа процесса; определены входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем. Установлено, что параметры технологической системы могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом под действием различных факторов. Решение задачи об оценке неизменяемых параметров может быть обеспечено применением подхода, основанного на использовании схем со «стохастическим наблюдателем», где оценка неизменяемых компонент производится по результатам моделирования динамики технологической системы с входным сигналом управления, поступающего на реальный динамический объект – технологическую систему.

Исследованию процессов шлифования шеек валов с целью определения параметров качества обрабатываемых поверхностей, получаемых при различных уровнях внешних воздействий на ПМ-56 и ПМР-463 в производственных условиях (рис. 1) и на экспериментальном стенде (рис. 2) в лаборатории ФГАОУ ВО «СевГУ» посвящены работы [6, 7, 8, 9]. На основе морфологического анализа и синтеза структур виброизолирующих устройств (ВУ) и системного анализа ВУ (рис. 3) построена морфологическая матрица, рассмотрены признаки и характеристики подсистем и элементов, выявлены связи между ними. Синтезированы варианты структур виброизолирующего устройства с учетом существенных признаков и технических требований, определяющих свойства системы. Выполнена структурно-компоновочная оптимизация виброизолирующих устройств. Параметрический синтез, теоретические и экспериментальные исследования реальных конструкций виброизолирующих устройств привели к созданию новой конструкции виброизолирующего устройства станка плавучей мастерской на основе опоры (рис. 4) с резино-металлическим и гидравлическим демпферами.

Целью данной статьи является выработка практических рекомендаций по повы-

шению качества шлифования деталей в условиях плавучих мастерских на основе результатов испытаний новых виброизоли-

рующих устройств в условиях, аналогичных условиям плавучей мастерской.

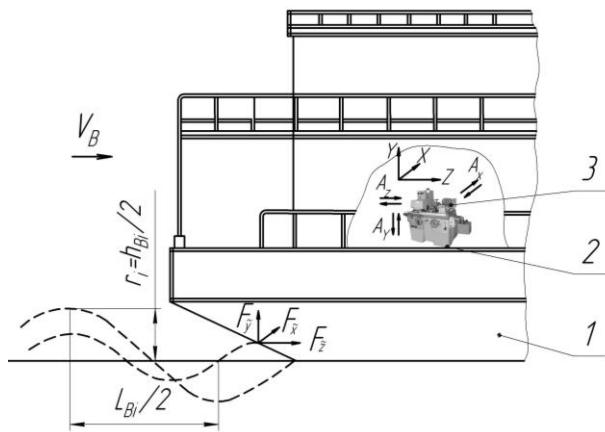


Рис. 1. Схема расположения круглошлифовального станка на участке ПМ:
1 – плавучее основание, 2 – поверхность палубы, 3 – станок 3В12

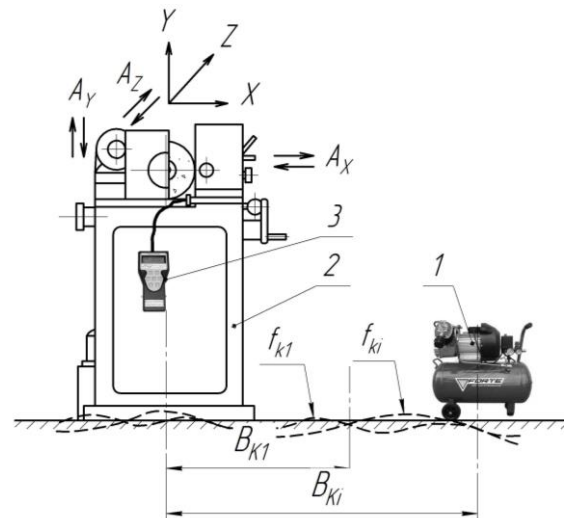
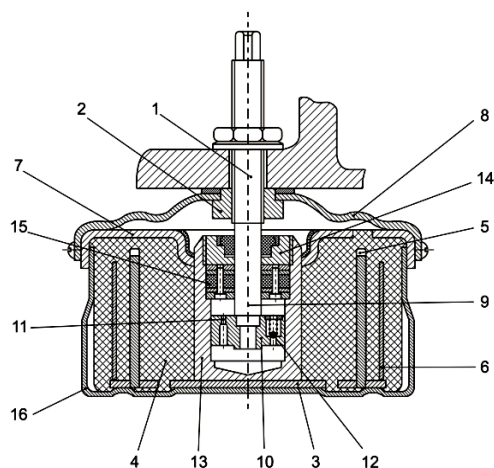


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для имитации внешних вибрационных воздействий при шлифовании, идентичных возникающим на ПМ:
1 – компрессор FINI Tiger 245; 2 – станок BUA 16; 3 – виброметр «Вибротест-МГ4.01»



Рис. 3. Структурная схема системы виброизолирующего устройства (ВУ)



a



б

Рис. 4. Общий вид (*a*) и фото (*б*) новой конструкции виброизолирующей опоры с резинометаллическим и гидравлическим демпферами

Методика проведения исследований

Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовали лабораторное оборудование (рис. 2) в составе экспериментального стенда, включающего круглошлифовальный станок BUA 16, оснащенный комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, а также компрессором 1 (FINI Tiger 245), размещаемым на разном удалении ($B_{k1} \dots B_{ki}$) от станка 2, создающим при работе на разных режимах внешние вибрационные воздействия на технологическую систему станка ($f_{k1} \dots f_{ki}$), имитирующие внешние возмущения через поверхность пола и фундамент на станину станка, соответствующие воздействиям на станки в ПМ внешней среды (морского волнения) и работающего соседнего оборудования, вызывая вибрации и виброперемещения с амплитудами A_x, A_y, A_z соответственно в направлениях его осей координат. Для определения параметров вибраций, амплитуды, виброскорости и виброускорения использовали виброметр 3 «Вибротест-МГ4.01». Проведенный этап имитационного моделирования позволил определить основные условия, при которых возможно проведение шлифовальной обработки на лабораторном оборудовании с получением показателей качества, соответствующих тем или иным условиям внешних воздействий (уровню волнения, работе внешнего

оборудования) на круглое шлифование в плавучей мастерской [3, 4]. По разработанной методике и при заданных условиях проводили на универсальном круглошлифовальном станке BUA 16 обработку поверхностей шеек валов ($d = 26,00^{+0,050}_{-0,025}$, мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие или отсутствие работающего внешнего оборудования. Для проведения испытаний новых конструкций на экспериментальном стенде (рис. 2) станок BUA 16 установили на виброизолирующие опоры новой конструкции (рис. 5), остальное технологическое и контрольно-измерительное оборудование без изменений использовали на тех же режимах, имитируя в лабораторных условиях разные уровни морского волнения и состояний станка с учетом работы соседнего технологического оборудования и системы вентиляции.

Основное содержание работы

Результаты сравнительных испытаний по показателям вибрационных воздействий на круглошлифовальный станок при установке на фундамент (базовый вариант) или на виброизолирующие опоры (достигнутый вариант) получены в лабораторных условиях, соответствующих условиям плавучей мастерской. Зависимости частот механических

колебаний (f_{kx} , f_{ky} , f'_{ox} , f'_{oy}) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения $h_{3\%}$ проиллюстрированы графиками на рис. 6. Графики 1 и 4 соответствуют отключенному состоянию круглошлифовального станка, 2 и 5 – работающему, 3 и 6 – работающему одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией



Рис. 5. Круглошлифовальный станок BUA 16 в составе экспериментального стенда, установленный на виброизолирующие опоры новой конструкции (патент UA 36389)

На рис. 6, а показаны графически зависимости частоты механических колебаний в зонах измерения станина-фундамент $f_{kx}=f(h_{3\%})$ и станина – виброизолирующая опора $f_{ox}=f(h_{3\%})$, измеренных в поперечном направлении (вдоль оси X) а также соответственно – $f_{ky}=f(h_{3\%})$, $f_{oy}=f(h_{3\%})$, измеренных в вертикальном направлении (вдоль оси Y) (рис. 6, б). Анализируя кривые 1 и 4, характеризующие вибрацию станины вдоль оси X при выключенном станке (при воздействии только морского волнения через палубу плавающего основания), очевидно, что кривая $f_{ox}=f(h_{3\%})$ для станины, установленной на виброизолирующие опоры новой конструкции, проходит ниже кривой $f_{kx}=f(h_{3\%})$ для станины на фундаменте, снижается частота вибрации от 1,9 раза при слабом и значительном волнениях до 2,4 – при сильном волнении. При работающем круглошлифовальном станке (кривые 2 и 5) снижение вибраций f_{ox} в этой зоне при использовании

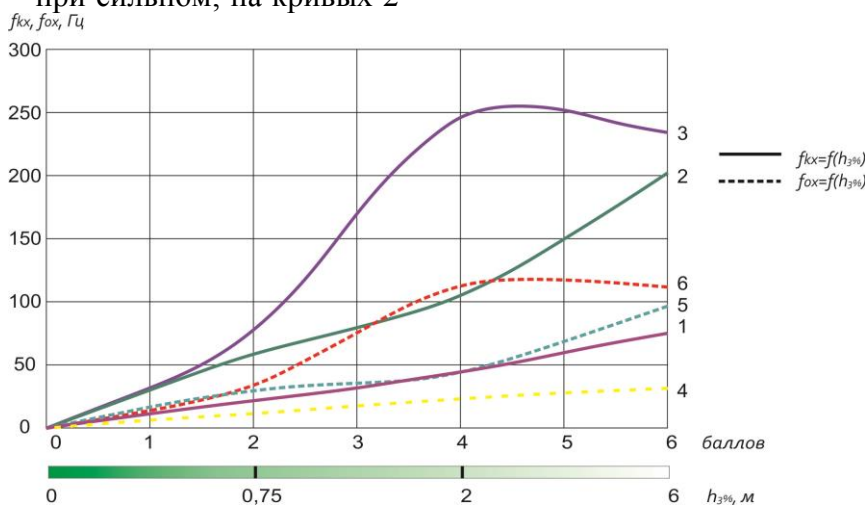
виброизолирующих опор достигается соответственно в 2 (при слабом волнении), 2,45 и 2,1 раза при значительном и сильном волнениях. При включенном одновременно соседнем оборудовании и вентиляции (кривые 3 и 6) эти вибрационные показатели f_{ox} снижаются соответственно в 2,3; 2,2 и 2,1 раз. В вертикальном направлении (вдоль оси Y) анализ кривых 1 и 4 (рис. 6, б) также показывает снижение частоты вибраций f_{oy} соответственно в 1,8; 1,4 и 1,67 раза; кривых 2 и 5 – в 2,5; 1,6 и 1,8 раза; кривых 3 и 6 – соответственно в 2,16; 1,54 и 1,86 раза при использовании виброизолирующих опор новой конструкции по сравнению с установкой станка на фундамент.

Графики зависимостей амплитуды виброперемещения (рис. 7) (S_{kx} , S_{ky} , S_{ox} , S_{oy}) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения $h_{3\%}$ при измерениях в зонах станина-фундамент $S_{kx}=f(h_{3\%})$, станина-опора $S_{ox}=f(h_{3\%})$ в поперечном направлении (а) также показывают преимущества виброизолирующих опор (на кривых 1 и 4 – амплитуда S_{ox} уменьшается соответственно в 2,3 раза при слабом и значительном волнениях и в 2,42 раза – при сильном; на кривых 2 и 5 – соответственно в 2,5; 2,6 и 3,7 раз; на кривых 3 и 6 – в 2,4; 2,1 и 2,7 раз); а также $S_{ky}=f(h_{3\%})$ и $S_{oy}=f(h_{3\%})$ в вертикальном направлении (б) на кривых 1 и 4 – амплитуда S_{oy} уменьшается соответственно в 1,1 раза при слабом и значительном волнениях и в 1,35 раза – при сильном; на кривых 2 и 5 – соответственно в 1,3; 1,7 и 1,2 раз; на кривых 3 и 6 – в 1,3; 1,8 и 1,5 раз.

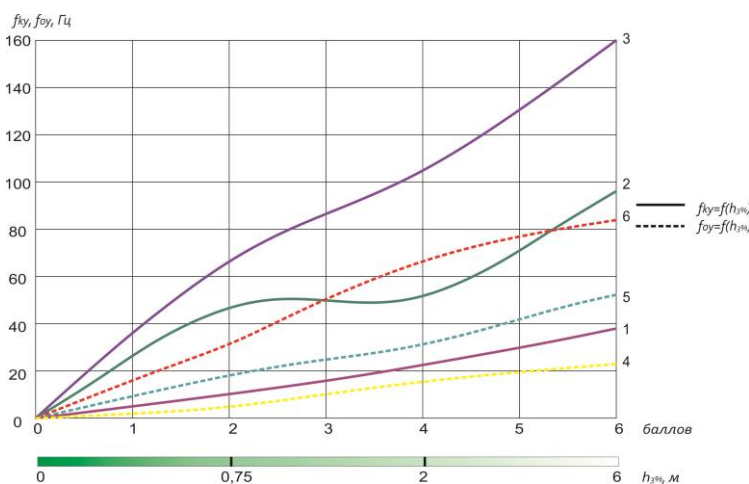
Аналогичным образом представлены графики зависимостей частоты механических колебаний (f'_{kx} , f'_{ky} , f'_{ox} , f'_{oy}) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения $h_{3\%}$ в зоне направляющих станка (рис. 8) $f'_{kx}=f(h_{3\%})$, $f'_{ox}=f(h_{3\%})$, измеренных в поперечном направлении (а), где кривые 1 и 4 – показывают уменьшение f'_{ox} соответственно в 2 раза при слабом волнении и в 1,8 раза – при значительном и сильном; на кривых 2 и 5 – соответственно в 2,1; 1,8 и 1,78 раз; на кривых 3 и 6 – в 2,1; 2,1 и 1,8 раз); а также для $f'_{ky}=f(h_{3\%})$, $f'_{oy}=f(h_{3\%})$, измеренных в вертикальном направлении (б)

на кривых 1 и 4 – частота вибраций f'_{oy} уменьшается соответственно в 1,8 раза при слабом, в 1,5 раза при значительном волнении и в 1,7 раза – при сильном; на кривых 2

и 5 – соответственно в 1,76; 1,7 и 1,7 раз; на кривых 3 и 6 – в 1,7; 1,5 и 1,6 раз.



а



б

Рис. 6. Графики зависимостей частоты механических колебаний (f_{kx} , f_{ky} , f'_{ox} , f_{oy}) от состояний круглошлифовального станка (1, 4, – отключен; 2, 5– работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$: в зонах измерения станина-фундамент $f_{kx}=f(h_{3\%})$, станина-опора $f_{ox}=f(h_{3\%})$, измеренных в поперечном направлении (а); а также соответственно – $f_{ky}=f(h_{3\%})$, $f_{oy}=f(h_{3\%})$, измеренных в вертикальном направлении (б)

Графики зависимостей амплитуды виброперемещения (S'_{kx} , S'_{ky} , S'_{ox} , S'_{oy}) от состояний круглошлифовального станка (рис. 9) и уровня волнения $h_{3\%}$ в зоне направляющих станка $S'_{kx}=f(h_{3\%})$, $S'_{ox}=f(h_{3\%})$, выполненные при измерениях (а) в поперечном направлении (вдоль оси X) также показывают преимущества виброизолирующих опор (на кривых 1 и 4 – амплитуда S'_{ox} уменьшается соответственно в 2,6 раза при слабом и

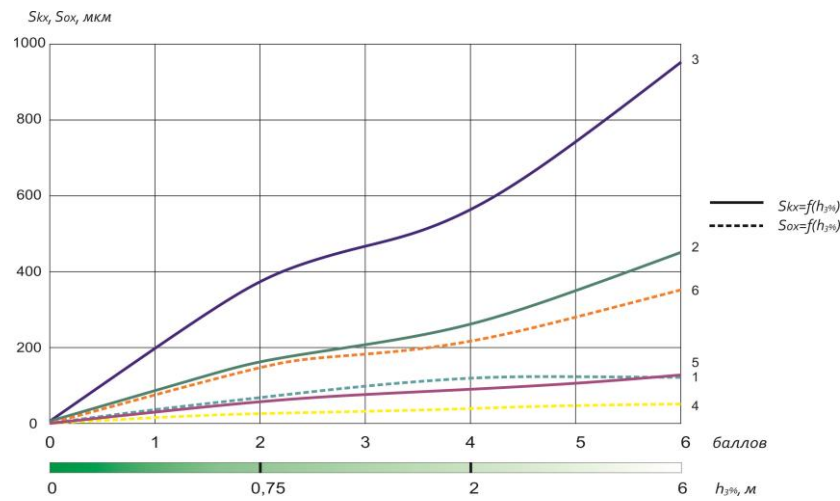
значительном волнениях и в 2,48 раза – при сильном; на кривых 2 и 5 – соответственно в 2,5; 2,64 и 2,6 раз; на кривых 3 и 6 – в 3,8; 3,3 и 2,3 раз); а также – $S'_{ky}=f(h_{3\%})$ и $S'_{oy}=f(h_{3\%})$ в вертикальном направлении (б) на кривых 1 и 4 – амплитуда S'_{oy} уменьшается соответственно в 2,7 раза при слабом, в 2,3 раза при значительном волнении и в 1,7 раза – при сильном; на кривых 2 и 5 – соот-

ветственно в 2,3; 2,9 и 2,3 раз; на кривых 3 и 6 – в 2,3; 2,2 и 2,1 раз.

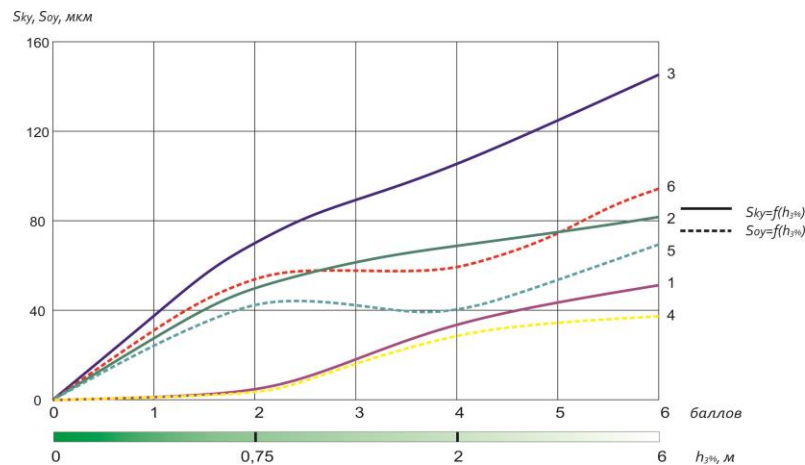
Таким образом, установка станка на виброизолирующие опоры новой конструкции показывает снижение частоты механических колебаний f_{ox} в нижней части станины в поперечном направлении (вдоль оси X) в среднем от 1,9 раз (при слабом волнении и неработающем станке) до 2,45 раз при значительном волнении и работающем станке.

Снижение частоты механических колебаний f_{oy} в нижней части станины в вертикальном направлении (вдоль оси Y) в среднем от 1,4 раз (при значительном волнении и

неработающем станке) до 2,5 раз при значительном волнении и работающем станке. Виброперемещения S_{ox} в нижней части станины в поперечном направлении (вдоль оси X) снижаются в среднем от 2,14 раз (при значительном волнении и работающем станке) до 3,74 раз при значительном волнении и неработающем станке. Виброперемещения S_{oy} в нижней части станины в продольном направлении (вдоль оси Y) снижаются в среднем от 1,1 раз (при слабом волнении и неработающем станке) до 1,8 раз при значительном волнении и работающем станке.

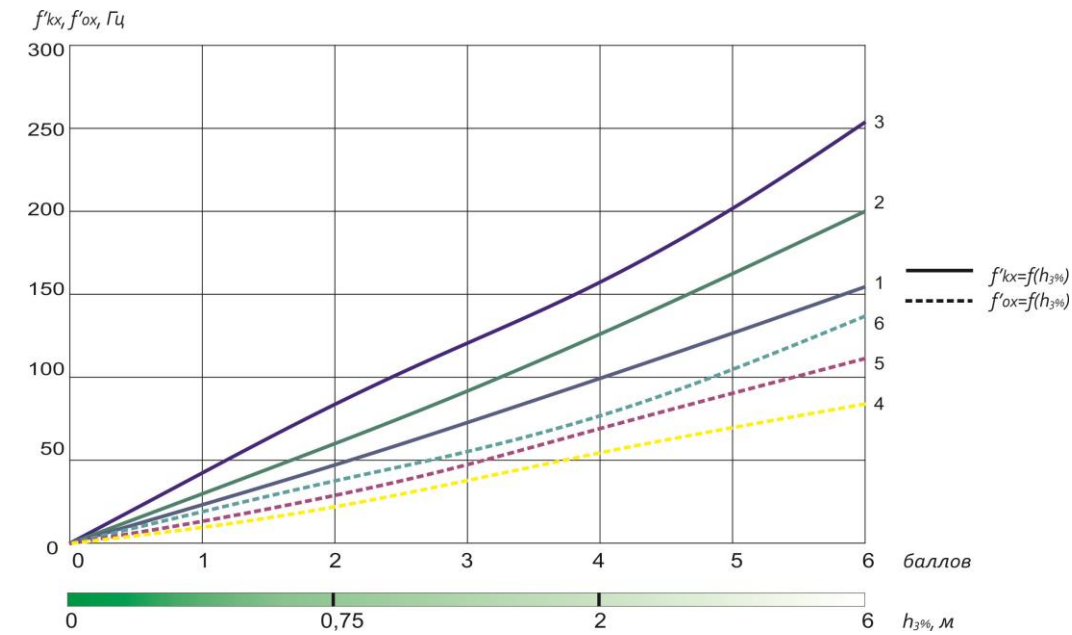


а

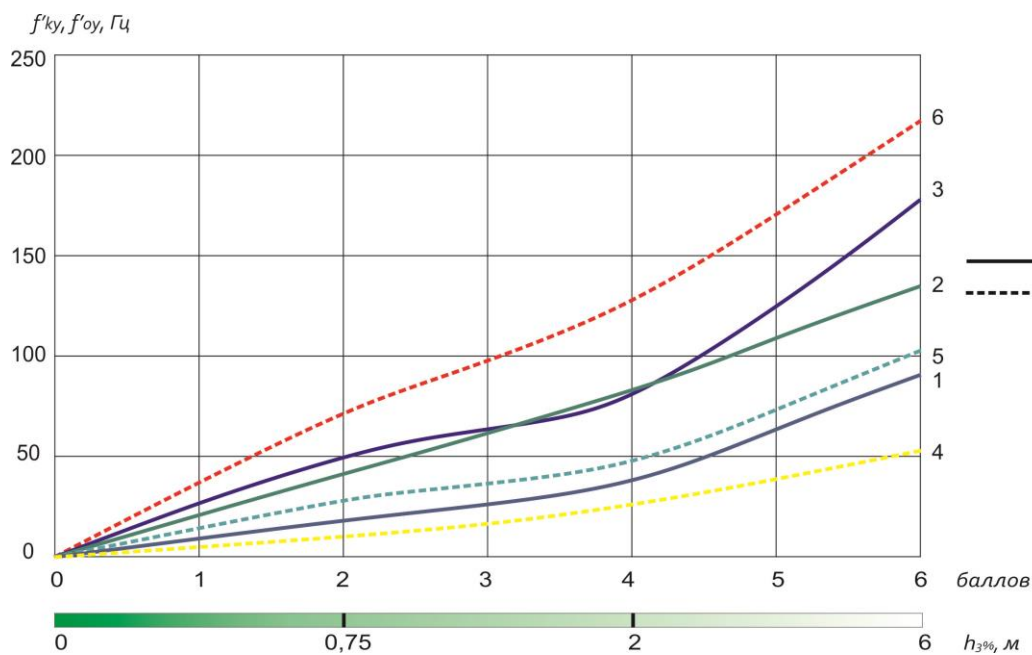


б

Рис. 7. Графики зависимостей амплитуды виброперемещения (S_{kx} , S_{ky} , S_{ox} , S_{oy}) от состояний круглошлифовального станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$ в зонах измерения станина-фундамент $S_{kx}=f(h_{3\%})$, станина-опора $S_{ox}=f(h_{3\%})$, измеренных в поперечном направлении (а); а также соответственно – $S_{ky}=f(h_{3\%})$ и $S_{oy}=f(h_{3\%})$, измеренных в вертикальном направлении (б)



a



b

Рис. 8. Графики зависимостей частоты механических колебаний (f'_{kx} , f'_{ky} , f'_{ox} , f'_{oy}) от состояний круглошлифовального станка (1, 4, – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$: в зоне направляющих станка $f'_{kx}=f(h_{3\%})$, $f'_{ox}=f(h_{3\%})$, измеренных в поперечном направлении (a); а также соответственно – $f'_{ky}=f(h_{3\%})$, $f'_{oy}=f(h_{3\%})$, измеренных в вертикальном направлении (б)

Анализ показателей при установке станка на виброизолирующие опоры новой конструкции показывает снижение частоты механических колебаний f'_{ox} в зоне направляющих станка в поперечном направлении (вдоль оси X) в среднем от 1,8 раз (при зна-

чительном и сильном волнении как работающего станка, так и одновременно соседнего оборудования и вентиляции) до 2,1 раз при слабом волнении (всех трех состояний станка) и работающем станке при значительном волнении.

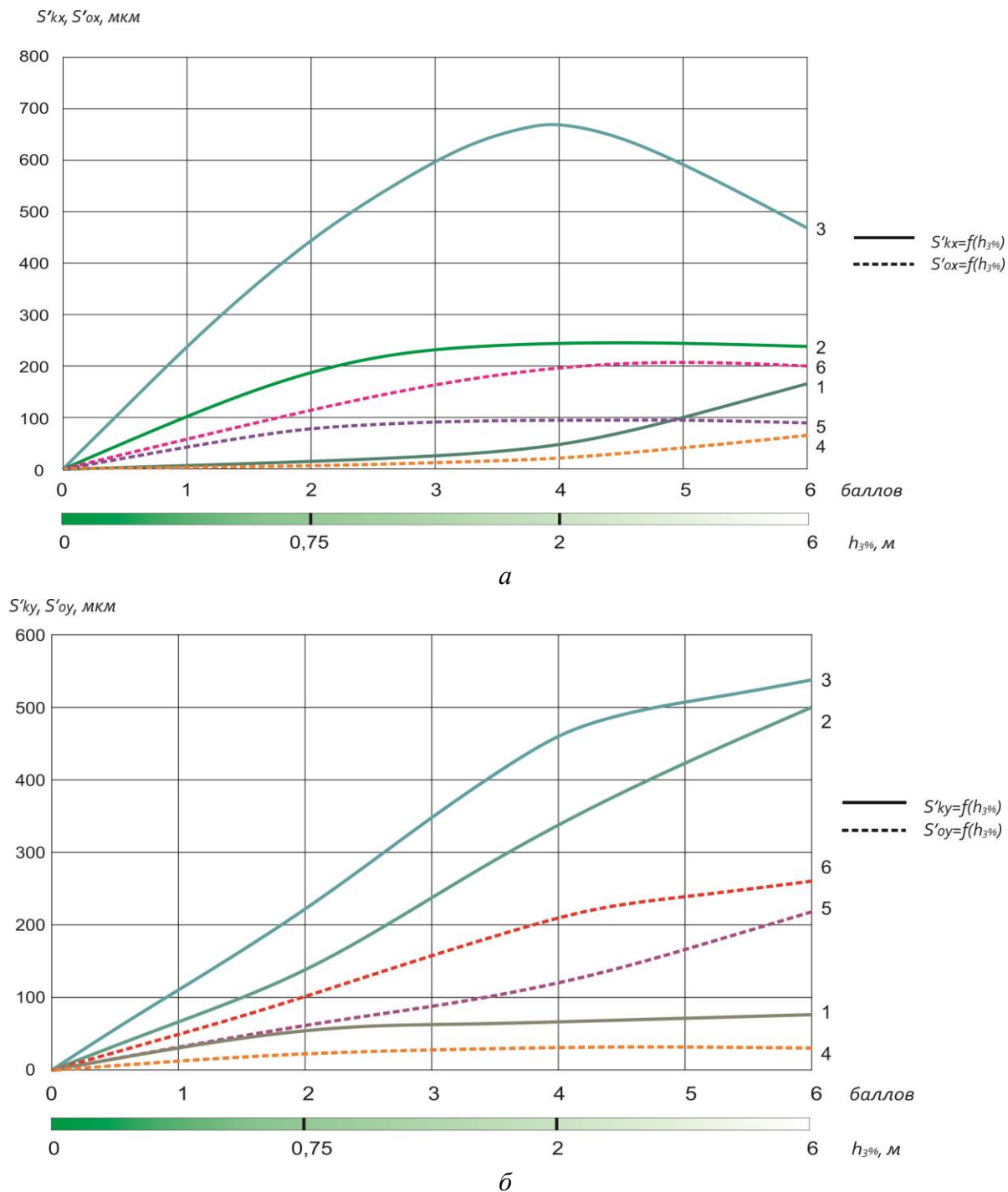


Рис. 9. Графики зависимостей амплитуды виброперемещения (S'_{kx} , S'_{ky} , S'_{ox} , S'_{oy}) от состояний круглошлифовального станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и уровня волнения $h_{3\%}$: в зоне направляющих станка $S'_{kx}=f(h_{3\%})$, $S'_{ox}=f(h_{3\%})$, измеренных в поперечном направлении (а); а также соответственно – $S'_{ky}=f(h_{3\%})$ и $S'_{oy}=f(h_{3\%})$, измеренных в вертикальном направлении (б)

Снижение частоты механических колебаний f'_{oy} в зоне направляющих станка в вертикальном направлении (вдоль оси Y) составляет в среднем от 1,5 раз (при значительном волнении и неработающем станке)

до 1,8 раз при слабом волнении и неработающем станке.

Виброперемещения S'_{ox} в зоне направляющих станка в поперечном направлении (вдоль оси X) снижаются в среднем от 2,3

раз (при сильном волнении и работающем станке одновременно с соседним оборудованием и вентиляцией) до 3,8 раз при слабом волнении и неработающем станке. Виброперемещения S'_{oy} в зоне направляющих станка в продольном направлении (вдоль оси Y) снижаются в среднем от 1,7 раз (при сильном волнении и работающем станке одновременно с соседним оборудованием и вентиляцией) до 2,9 раз при значительном волнении и работающем станке.

При выполнении круглошлифовальной обработки поверхностей шеек валов ($d = 26,00^{+0,050}_{-0,0025}$, мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие или отсутствие работающего внешнего оборудования, получены результаты проверки качества обработанных при этом поверхностей (табл.1).

Таблица 1 – Сравнение результатов качества поверхностей шеек валов, обработанных по базовому и достигнутому вариантам

Биение опорных шеек – Δ , мкм (базовый/достигнутый)			Шероховатость поверхности – R _a , мкм (базовый/ достигнутый)		
max	min	Дисперсия σ ² , мкм ²	max	min	Дисперсия σ ² , мкм ²
Слабое волнение					
0,025/0,016	0,010/0,011	6,2x10 ⁻⁶ /0,7x10 ⁻⁶	0,63/0,50	0,41/0,32	1,3x10 ⁻³ /0,9x10 ⁻³
0,048/0,029	0,009/0,008	4,2x10 ⁻⁵ /1,2x10 ⁻⁵	0,80/0,63	0,51/0,42	2,3x10 ⁻³ /1,2x10 ⁻³
Значительное волнение					
0,094/0,052	0,018/0,015	15,9x10 ⁻⁵ /3,8x10 ⁻⁵	1,00/0,82	0,46/0,54	8,1x10 ⁻³ /2,2x10 ⁻³
0,123/0,079	0,008/0,017	3,7x10 ⁻⁶ /1,1x10 ⁻⁶	1,25/1,02	0,50/0,48	15,6x10 ⁻³ /8,1x10 ⁻³
Сильное волнение					
0,124/0,069	0,020/0,014	2,9x10 ⁻⁶ /8,4x10 ⁻⁵	1,6/1,25	0,50/0,52	3,3x10 ⁻² /1,5x10 ⁻²
0,162/0,097	0,023/0,018	5,4x10 ⁻⁴ /1,7x10 ⁻⁴	2,0/1,58	0,63/0,62	5,2x10 ⁻² /2,6x10 ⁻²
Показатели волнистости					
Слабое волнение					
W _{max} , мкм		W _z , мкм	S _w , мкм		L _w , мкм
5,6/5,1		4,8/4,2	192/169		960/845
7,2/5,8		5,3/3,9	265/211		1457,5/1170
Значительное волнение					
6,9/5,7		5,4/4,2	297/264		1782/1420
10,2/6,1		5,8/5,0	916/870		4580/4350
Сильное волнение					
15,4/7,8		9,9/6,1	574/526		3920/2530
23,8/10,2		10,6/7,4	1328/1170		6640/5850

Графики $\Delta=f(h3\%)$ на рис. 10, а показывают, что разность величины отклонений формы поверхностей шеек валов ($\Delta_{max}-\Delta_{min}$), обработанных по базовому варианту (1, 3 – для Δ_{max} , 2, 4 – для Δ_{min}) больше, чем по предлагаемому варианту с виброизолирующими опорами (5, 7 – для Δ_{max} , 6, 8 – для Δ_{min}) соответственно в среднем в 2,3 раза при работе круглошлифовального стан-

ка и неработающем внешнем оборудовании (от 1,9 – при сильном волнении, до 3 – при слабом) и в 1,82 раза – при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и вентиляции (от 1,76 – при сильном волнении, до 1,86 – при слабом). Также графики (рис. 10, б) $R_a=f(h3\%)$ отклонений шероховатости для $R_a \max$ (1, 3 – базовый, 5, 7 – предлагаемый вариант) подтверждают по-

вышение качества при использовании новых виброизолирующих опор в среднем в 1,25 раза (как при работе без внешнего оборудования, так и при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и вентиляции, причем для всех уровней волнения повышение качества по показателю шероховатости примерно одинаковое – от 1,22 до 1,28 раз). Изменения показателей для Ra_{min} при

этом незначительны, хотя также достигнутый вариант дает уменьшение шероховатости в среднем от 1,03 раз (при работе круглошлифовального станка и неработающем внешнем оборудовании) до 1,08 раз (при работающем одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией).

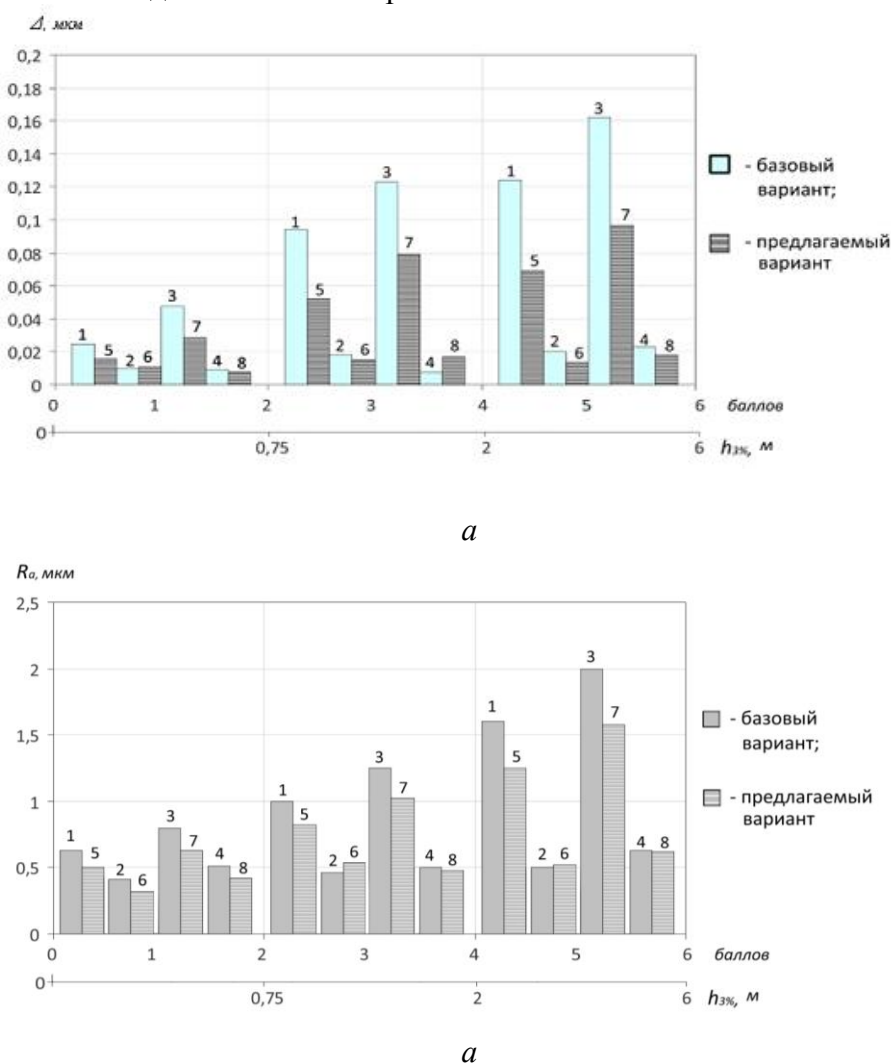


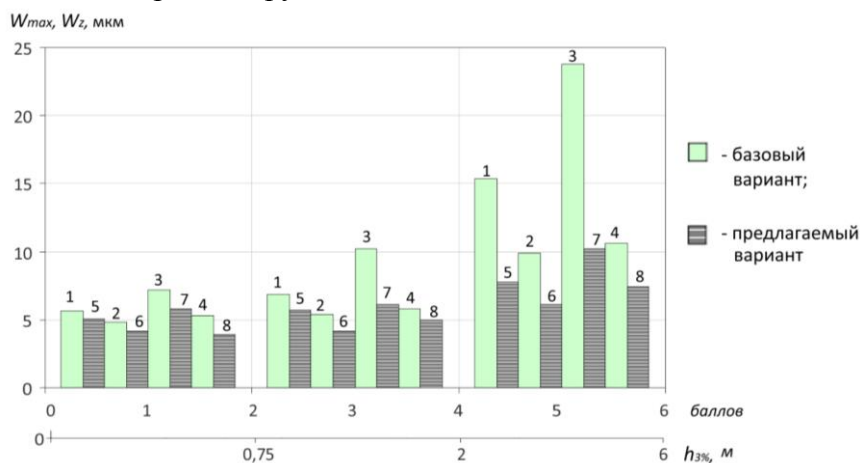
Рис. 10. Графики зависимостей отклонений формы $\Delta=f(h_{3\%})$ для Δ_{max} (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и Δ_{min} (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) (а), а также шероховатости $Ra=f(h_{3\%})$ для Ra_{max} (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и Ra_{min} (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) (б) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2, 5, 6 – работает; 3, 4, 7, 8 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией)

Графики зависимостей $W=f(h_{3\%})$ показателей волнистости (рис. 11, а) для W_{max} (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и W_z (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2, 5, 6 – работает; 3, 4, 7, 8 –

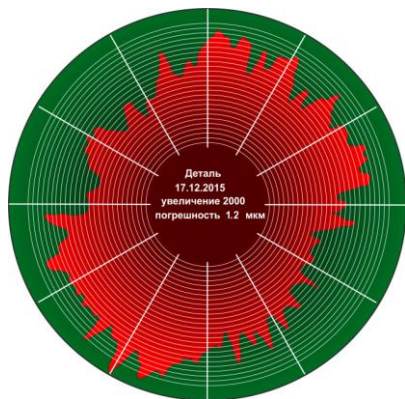
работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), а также пример полученной профилограммы по базовому варианту (б) и с использованием новых виброизолирующих опор (в) показывают, что уменьшение волнистости W_{max} составляет в среднем от 1,39 раза (при работе

круглошлифовального станка и неработающем внешнем оборудовании) до 1,75 раза (при работающем круглошлифовальном станке одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией). Аналогично по параметру W_z уменьшение волнистости при использовании новых виброизолирующих

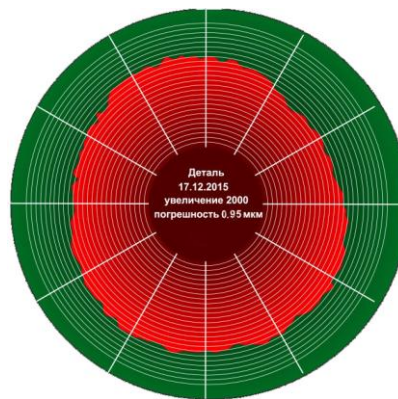
опор составляет в среднем соответственно 1,35 раза для обработки при отсутствии работы внешнего оборудования и 1,32 раза при работающем круглошлифовальном станке одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией



а



б



в

Рис. 11. Графики зависимостей показателей волнистости $W=f(h_{3\%})$ для W_{max} (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и W_z (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) (а) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2, 5, 6 – работает; 3, 4, 7, 8 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), а также пример полученной круглограммы по базовому варианту (б) и с использованием новых виброизолирующих опор (в)

Сравнение полученной профилограммы по базовому варианту обработки с установленным на фундамент круглошлифовальным станком (рис. 11, б) с достигнутый вариантом при использовании новых виброизолирующих опор (в) наглядно иллюстрирует преимущества разработанных в данной работе мероприятий и методики по синтезу рациональных вариантов виброизолирующих устройств.

Таким образом, виброизолирующие опоры (рис. 4, б) по патенту UA 36389 в процессе проведенных испытаний подтвердили достижение поставленной цели – повышение качества шлифования при работе, усложненной наличием значительных внешних вибрационных воздействий (как от морского волнения, так и от соседнего технологического оборудования), соответствующей работе в условиях плавучей мастерской. Од-

нако в представленных для испытаний образцах опор для использования их в плавучей мастерской необходимы некоторые элементы крепления, так как находящееся на палубах плавучих мастерских технологическое оборудование подвергается опасности смещения из-за отрыва основания опоры от поверхности палубы. Для этого их необходимо надежно фиксировать с помощью рычажной системы на стойке и оснащать гидроцилиндром с пружинным аккумулятором. Такие адаптированные к условиям плавучих мастерских виброизолирующие устройства (патент UA 51621) [10, 11], созданные на базе испытанных в лабораторных условиях опор, обеспечивают повышение качества шлифовальной обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы, уменьшения шероховатости и волнистости путем снижения уровней внешних и внутренних колебаний, гашению которых способствуют виброизолирующие опоры и пружинные аккумуляторы в гидроцилиндрах. Кроме того, возможна дальнейшая модернизация указанных устройств с целью создания систем автоматической виброзащиты и виброизоляции шлифовальных (а также других прецизионных) станков, способных по сигналам от вибродатчиков менять демпфирующие свойства виброопор в процессе механической обработки деталей в условиях плавучих мастерских.

Выводы

Такой подход позволил экспериментально исследовать влияние на качество деталей при шлифовальной обработке морского волнения, воздействующего на плавучее основание мастерской, выявил целесообразность использования новой виброзащитной системы станка для решения задач обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования [12-15] и создания конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств. Предложенные конструкции виброизолирующих опор и устройств упрощают возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования, способствуют повышению качества обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних колебательных воздействий. Полученные результаты явля-

ются основой для дальнейших экспериментальных исследований параметров и характеристик технологической системы круглошлифовального станка в условиях плавучей мастерской [16, 17, 18]. Кроме предложенных выше мероприятий в условиях плавучих мастерских возможно применение высокоточных станков с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного управления, построенных на основе разработки новых моделей оптимальных систем со стохастическим регулятором процесса.

Список литературы

1. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования / С.М. Братан, Е.А. Владецкая. // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 35 – С. 13-22.
2. Владецкая Е.А. Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – Вип.7 – С. 103-111.
3. Владецкая Е.А. Оценка параметров качества шлифуемой поверхности / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Прогрессивные направления развития машино-приборостроения, транспорта и экологии: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., аспирант. и мол. ученых, г. Севастополь, 20-23 мая 2013 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – С. 186-188.
4. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем автоматизации виброзащиты станка в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Современные инженерные и инженерно-педагогические технологии: сб. статей науч.-практ. конф. – Симферополь: ДАЙПИ, 2015. – С.82-85.
5. Владецкая Е.А. Обеспечение динамической стабилизации шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов.– Севастополь: СевГУ, 2016. – Вып.1.– С.21-41.
6. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской/ Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.– Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314).– С.88-103.

7. Владецкая Е.А. Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Перспективы науки – 2016: Сб. докл. III Междунар. конк. науч.-иссл. работ, 29 апреля 2016 г. –Том III (Ест. и техн. науки). – Казань: ООО «Рокета Союз», 2016. – С.247-257.
8. Владецкая Е.А. Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко // Вісник СевНТУ. – Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013. – С. 14-20.
9. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36-40.
10. Харченко А.О. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка / А. Харченко, С. Братан, Е. Владецкая // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
11. Владецкая Е.А. Анализ методов и средств виброзащиты динамических систем от вынужденных колебаний в машиностроении / Е.А. Владецкая // Прогрессивные направления развития машиноприборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., аспирант. и мол. ученых, г. Севастополь, 19-22 мая 2009 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – С. 79-81.
12. Владецкая Е.А. Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств / Е.А. Владецкая, А.О. Харченко, С.М. Братан // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь-2015: Сб. статей по материалам междунар. науч.-техн. конф. – г. Севастополь, 14-15 сентября 2015 г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. –С.139-148.
13. Долгин В.П. Реакция динамической системы на произвольный сигнал / В.П. Долгин, Е.А. Владецкая, С.М. Братан // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. – Вып. 43. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2014. – С. 53-58.
14. Харченко А.О. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской / А. Харченко, Е. Владецкая, В.Долгин, С. Братан // Monografie «Maszynu i procesy produkcyjne» (Машины и производственные процессы). – Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – С. 86-98.
15. Владецкая Е.А. Снижение вибрационных воздействий на технологическую систему шлифовального станка в плавучих ремонтных мастерских / Е.А. Владецкая, А.О. Харченко, С.М. Братан // Гуманистическая экономика и качество жизни: сб. статей по материалам международной научн.-практ. конф. с элем. научн. школы. – Ульяновск: УлГПУ, 2013. – С.255-268.
16. С.М. Братан. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. №9 (63). – с. 10-15.
17. Владецкая Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях / Е.А. Владецкая // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2016. – Вып.4. – С.25-34.
18. Владецкая Е.А. Обеспечение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских / Е.А. Владецкая // Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Владецкая Екатерина Александровна. – Севастополь, 2017. – 20с.

References

1. Bratan S.M. Analiz vlijanija kolebanij, peredavaemyh cherez fundament stanka, na kachestvo processa shlifovaniya / S.M. Bratan, E.A. Vladeckaja. // Vestnik NTU «HPI»; Sb. nauchn. trudov. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – № 35 – S. 13-22
2. Vladeckaja E.A. Povyshenie vibroustojchivosti shlifoval'nyh stankov plavuchih remontnyh masterskih / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. prac'. – Harkiv: NTU «HPI», 2012. – Vip.7 – S. 103-111.
3. Vladeckaja E.A. Ocenka parametrov kachestva shlifujemoj poverhnosti / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan // Progressivnye napravleniya razvitija mashino-priborostrojenja, transporta i jekologii: materialy mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. stud., aspir. i mol. uchenyh, g. Sevastopol', 20-23 maja 2013 g. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2013. – S. 186-188.
4. Vladeckaja E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noj obrabotki putem avtomatizacii vibrozashhity stanka v uslovijah plavuchej masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Sovremennye inzhenernye i inzhenerno-pedagogicheskie tehnologii: sb. statej nauch.-prakt. konfer. – Simferopol': DAJPI, 2015. – S.82-85.
5. Vladeckaja E.A. Obespechenie dinamicheskoy stabilizacii shlifoval'noj obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushhenij v uslovijah plavuchej masterskoj/ E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Vestnik sovremennyh tehnologij: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol': SevGU, 2016. – Yyp.1. – S.21-41.

6. Vladeckaja E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noj obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushhenij v usloviyah plavuchej masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii.– Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314).– S.88-103.
7. Vladeckaja E.A. Povyshenie kachestva shlifoval'noj obrabotki v usloviyah plavuchej masterskoj / E.A. Vladeckaja, S.M. Bratan // Perspektivy nauki – 2016: Sb. dokl. III Mezhdunar. konk. nauch.-issl. rabot, 29 aprelja 2016 g. –Tom III (Est. i tehn. nauki). – Kazan': OOO «Róketa Sojuz», 2016. – S.247-257.
8. Vladeckaya E.A. Optimizaciya struktury vibrozashchitnyh sistem shlifoval'nogo stanka na osnove morfologicheskogo analiza / E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko // Visnik SevNTU. – Vip.140: Mashinopriladobuduvannya ta transport: zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2013.– S. 14-20.
9. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchej remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
10. Harchenko A.O. Povyshenie tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoj vibroizol'yacii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
11. Vladeckaya E.A. Analiz metodov i sredstv vibrozashchity dinamicheskikh sistem ot vynuzhdennykh kolebanij v mashinostroenii / E.A. Vladeckaya // Progressivnye napravleniya razvitiya mashinopriborostroitel'nyh otraslej i transporta: materialy mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf. stud., aspir. i mol. uchenyh, g. Sevastopol', 19-22 maya 2009 g. – Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2009. – S. 79-81.
12. Vladeckaya E.A. Povyshenie dinamicheskogo kachestva shlifoval'nogo stanka na osnove optimizacii vibroizoliruyushchih ustrojstv / E.A. Vladeckaya, A.O. Harchenko, S.M. Bratan // Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii. Sevastopol'-2015: Sb. statej po materialam mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – g. Sevastopol', 14-15 sentyabrya 2015 g. – Sevastopol': FGBOU VO «SevGU», 2015.–S.139-148.
13. Dolgin V.P. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal / V.P. Dolgin, E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan // Uchyonye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. – Vyp. 43. Tekhnicheskie nauki.– Simferopol': NIC KIPU, 2014.– S. 53-58.
14. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal na primere stanka v usloviyah plavuchej masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // Monografiye «Maszyny i procesy produkcyjne» (Mashiny i proizvodstvennye processy).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015.– S. 86-98.
15. Vladeckaya E.A. Snizhenie vibracionnyh vozdeystvij na tekhnologicheskuyu sistemu shlifoval'nogo stanka v plavuchih remontnyh masterskikh / E.A. Vladeckaya, A.O. Harchenko, S.M. Bratan // Gumanisticheskaya ehkonomika i kachestvo zhizni: sb. statej po materialam mezhdunarodnoj nauchn.-prakt. konf. s ehlem. nauchn. shkoly.– Ul'yanovsk: UIGPU, 2013.– S.255-268.
16. S.M. Bratan. Issledovaniye nadezhnosti vibroizoliruyushchego ustroystva shlifoval'nogo stanka / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii.– Bryansk: FGBOU VO «BGTU», 2016. №9 (63).– s. 10-15.
17. Vladetskaya Ye.A. Modelirovaniye vibratsionnykh vozdeystviy ot vneshnikh istochnikov pri shlifovanii detaley v laboratornykh usloviyakh / Ye.A. Vladetskaya // Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov.– Sevastopol': SevGU, 2016. – Vyp.4.– S.25-34.
18. Vladetskaya Ye.A. Obespecheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh / Ye.A. Vladetskaya // Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.07 / Vladetskaya Yekaterina Aleksandrovna. – Sevastopol', 2017. – 20s.

УДК 620.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МЕТАЛЛОБЕТОННЫХ БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

А.А. Дьяконов¹, Л.В. Шипулин¹, И.В. Шмидт¹¹ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национально исследовательский университет)», Челябинск, Российская федерация

Аннотация

Приводится описание экспериментального исследования вибрационной устойчивости металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков. Описаны проведенные исследовательские испытания станков с помощью системы вибродиагностики. Представлена методика обработки результатов испытаний – амплитудно-частотных характеристик колебаний системы станка. Приводится описание разработанного программного модуля для автоматизированной обработки экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний действующих станков с металлобетонными базовыми элементами. Модуль позволяет по выбранным пользователем файлам с результатами испытаний построить графики амплитудно-частотной кривой, рассчитать декремент затухания и сформировать файл с отчетом. В разработанном модуле обработаны результаты испытаний тринадцати станков, в результате чего получен набор файлов с отчетами, из которых сформирована сводная таблица. В конце статьи приводится анализ и объяснение полученных результатов в сводной таблице.

Ключевые слова: металлобетонные базовые элементы, металлорежущие станки, декремент затухания колебаний.

DEFINITION OF LOGARITHMIC DECREMENT DAMPING VIBRATIONS METALLCONCRETE BASIC ELEMENTS OF MACHINE TOOLS

A.A. Dyakonov¹, L.V. Shipulin¹, I.V. Shmidt¹¹South Ural State University (national research university) Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract

The article is describing the experimental research of the vibration rigidity of the metalconcrete basic elements of machine tools. Experimental research of machine tools using vibration diagnostics is described. The technique of processing of test's results – amplitude-frequency characteristics of fluctuations of system of the machine is provided. The description of the developed program module for the automated processing of the experimental data obtained during research of the working machine tools with metalconcrete basic elements is provided. The module make it possible according to the chosen by the user files with results of research to construct graphs of an amplitude-frequency curve, to calculate logarithmic increment and to create the file with the report. In the developed module results of testing of thirteen machine tools are processed and after that a set of files with reports is received and formed to the summary table. At the end of article the analysis and an explanation of the received results in the summary table is provided.

Keywords: grinding, metallconcrete basic elements, machine tools, logarithmic increment.

Введение

Станки с базовыми металлобетонными элементами являются прогрессивным направлением развития станкостроительной отрасли. Станки с базовыми металлобетонными элементами имеют большую устойчивость к вибрациям и колебаниям, оказывающим негативное влияние на точность и стабильность обработки заготовок резанием.

Для исследования жесткости и устойчивости к вибрациям и колебаниям, используют системы вибродиагностики, включающие в себя набор датчиков, преобразователь сигналов с датчиков в амплитудно-частотные характеристики и молоток для импульсного воздействия на исследуемый объект [1–16]. Для проведения испытаний на объекте фиксируются датчики и осуществляется удар молотком, подключенным к системе вибро-

диагностики, в момент удара данные фиксируются и сохраняются в виде файлов с амплитудно-частотными характеристиками.

В рамках выполнения проекта проведены испытания по определению вибрационной устойчивости ряда действующих станков с металлобетонными базовыми элементами. Исследуемые станки находятся на предприятии ПАО «Ковровский механический завод» в г. Ковров во Владимирской области и на предприятии ООО «Уральский завод газовых центрифуг» в г. Новоуральск в Свердловской области.

Методика обработки амплитудно-частотных характеристик колебаний элементов станка

В результате проведенных испытаний получен набор файлов с амплитудно-частотными характеристиками собственных колебаний базовых элементов. Для определения вибрационной устойчивости станков по экспериментальным данным применяется методика, разработанная В.А. Кудиновым [1]. Используя методику, можно определить параметры резонансной кривой, в частности, амплитуду и ширину резонансного пика, частоты его расположения, и уже по ним вычислить значение логарифмического декремента затухания собственных колебаний. Полученные расчетным путем по резонансной кривой значения декремента затухания характеризуют вибрационную устойчивость исследуемого объекта.

При обработке экспериментальных данных для определения декремента затухания колебаний в базовых элементах токарных и расточных станков по методике В.А. Кудинова [1] предлагается использовать программные средства физико-математических методов в прикладном пакете Mathcad. Первым этапом реализации методики в программном обеспечении является визуализация результатов измерений амплитудно-частотной характеристики, представленных в табличном виде (рис. 1).

Для реализации методики необходимо произвести интерполяцию кубическим сплайном экспериментальных точек резо-

нансной кривой колебаний узлов токарного станка, применив специальные функции программного обеспечения. Затем на аппроксимированной кривой производится усечение на высоте 0,707 от максимального резонансного пика через функцию построения отрезка. Полученные точки на максимальной амплитуде резонансного пика позволяют произвести расчет логарифмического декремента затухания исследуемых перемещений узлов токарного станка (рис. 2).

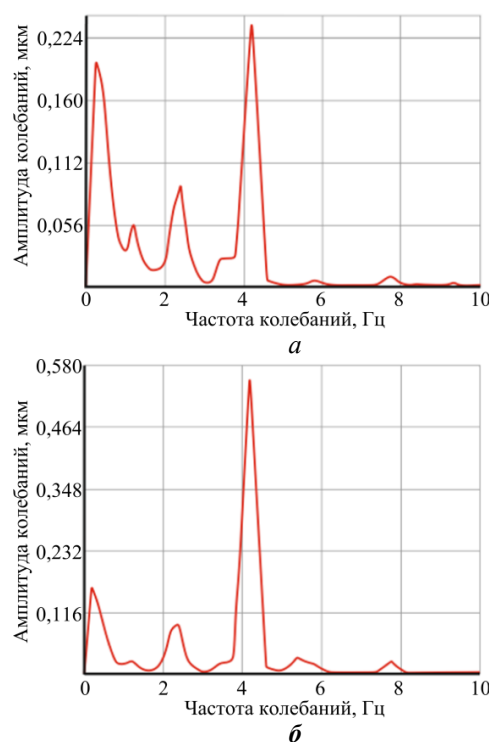


Рис. 1. Пример графического отображения амплитудно-частотных характеристик после преобразования для узлов: а – токарного станка; б – расточного станка

Следует отметить, что указанные действия проводятся для одного файла с результатами испытаний. Но в ходе серии испытаний исследованы тринадцать станков, для каждого из которых формируется двенадцать файлов, таким образом, в общей сложности необходимо обработать 156 файлов. Обработать вручную такое количество файлов весьма проблематично, поэтому для автоматизации обработки файлов с экспериментальными данными предлагается разработать модуль расчета декремента затухания собственных колебаний.

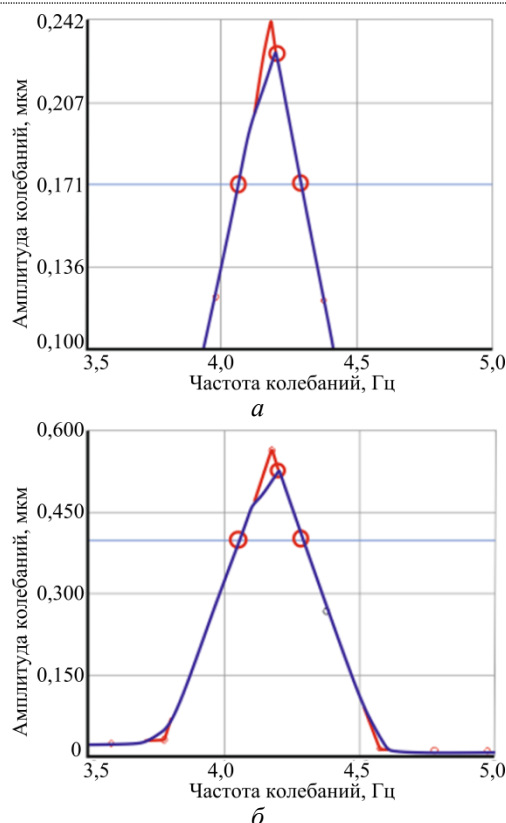


Рис. 2. Пример определения опорных точек и расчет логарифмического декремента затухания для: а – токарного станка; б – расточного станка

Модуль автоматизированного расчета логарифмического декремента затухания

В ходе проведения испытаний базовых элементов станка с помощью системы измерения вибрационных характеристик механических конструкций формируются файлы с данными о собственных колебаниях. Эти файлы представляют собой необработанные массивы данных, содержащие снятые с датчиков амплитудно-частотные характеристики, вызванные физическим колебанием базовых элементов станка. На выходе требуется получить отчет с результатами вычислений, включая графики и значение декремента затухания колебаний станины. Для разработки описанного программного модуля предлагается следующий алгоритм его функционирования.

В начальной части алгоритма выполняются следующие подготовительные действия: подключаются используемые библиотеки; подключаются COM библиотеки Microsoft Word 12.0 Object Library и

Microsoft Excel 12.0 Object Library; задаются начальные параметры Microsoft Word и Excel; задаются системные и общие переменных. Далее открывается диалоговое окно для выбора одного или нескольких текстовых файлов формата DTU.

В основной исполнительской части алгоритма отрабатывается цикл, каждая итерация которого соответствует исследованию одного файла с результатами эксперимента из всех, выбранных пользователем. Внутри цикла производятся следующие действия: открывается файл DTU с результатами измерений и из него считываются амплитуды и частоты в массив внутренней памяти приложения, точки массива интерполируются кубическим сплайном. Далее программно определяется резонансная амплитуда, а также параметры резонансного пика – частоты начала и конца на высоте 0,707 от резонансной амплитуды и ширина пика, после чего рассчитывается декремент затухания. В конце цикла строятся графики (рис. 3) и формируется страница отчета в Microsoft Word с исходными данными, результатами и графиками.

На заключительном этапе программы в исходную папку приложения сохраняется файл Microsoft Word с отчетом о результатах исследований амплитудно-частотных характеристик, а в файл Microsoft Excel заносятся основные результаты вычислений. Далее завершаются все процессы приложения и оно закрывается.

В качестве инструментария для реализации модуля [17] принимается объектно-ориентированный язык программирования C# и среда Microsoft Visual C# Express.

Функционирование программного модуля осуществляется следующим образом: запускается исполнительный файл программного модуля, открывается диалоговое окно с просьбой выбрать файлы на обработку. Пользователю следует выбрать все файлы, принадлежащие к одному станку и нажать кнопку «Открыть». Далее программный модуль запустит основной алгоритм, описанный выше. В ходе выполнения алгоритма будут получены значения параметров резонансной кривой, значения декрементов

затухания, будут построены графики кусочно-линейной функции и графики сплайна, будет сформирован отчет со всеми результатами в формате Microsoft Word.

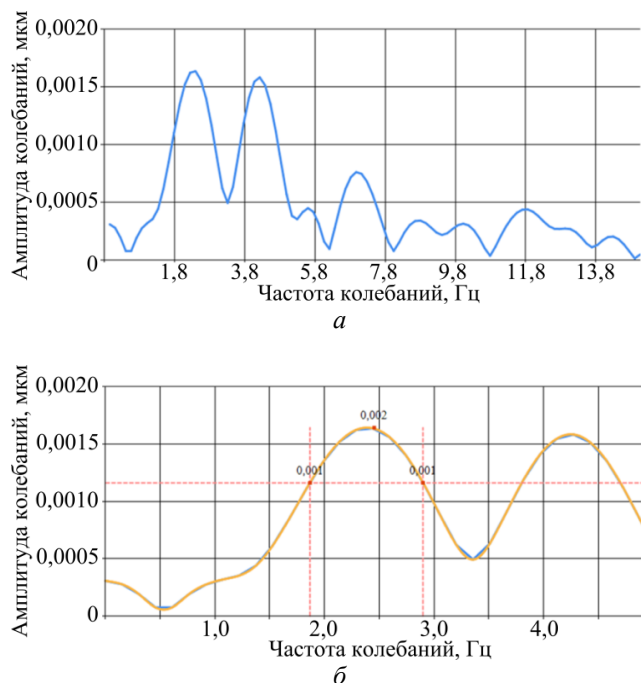


Рис. 3. Результаты эксперимента: а – в виде кусочно-линейной функции; б – аппроксимированные сплайном

Обработка результатов испытаний

Для каждого из испытанных станков в разработанном программном модуле исследованы амплитудно-частотные характеристики и получены значения декремента затухания собственных колебаний. Отметим, что в ходе эксперимента проводились несколько различных замеров, при которых импульсное воздействие производилось по бабке и по станине. В каждом из них данные снимались с датчиков, размещенных на бабке и на станине станка. В результате обработки экспериментальных данных сформирована сводная таблица (табл. 1) с декрементами затухания собственных колебаний для каждого из станков.

Таблица 1. Сводная таблица с декрементами затухания собственных колебаний базовых металлобетонным элементам

Марка станка и место его расположения	Декремент затухания при воздействии			
	на бабку		на станину	
	датчик на бабке	датчик на станине	датчик на бабке	датчик на станине
Токарные станки				
КС62-09ЛФ2, г. Ковров	0,850	1,178	0,685	0,945
КСА-8, г. Ковров	1,795	0,683	0,794	1,230
16КС20-01-Л, г. Ковров	1,682	0,968	1,053	1,161
16КС20, г. Новоуральск	1,324	1,079	0,685	1,185
16КС202М, г. Новоуральск	1,627	0,796	1,050	0,962
Расточные станки				
КС01-09ЛФ3, г. Ковров	1,221	1,903	1,236	0,807
КС02-09ЛФ3, г. Ковров	1,832	1,428	0,939	1,040
24КС01-Л, г. Новоуральск	0,780	1,284	0,755	0,773
24КС01-Л, г. Новоуральск	1,299	0,954	0,870	1,105
24КС01-М, г. Новоуральск	2,092	1,084	1,074	1,032
24КС01-Л, г. Новоуральск	0,651	0,946	0,941	0,973
24КС01-М, г. Новоуральск	1,888	0,703	1,943	0,952
24КС02, г. Новоуральск	0,708	0,787	1,159	1,651

Анализ результатов в сводной таблице

Отметим, что декремент затухания характеризует то, как быстро затухают колебания, возникшие в некоторой технической системе. В связи с этим, чем ниже значение декремента – тем станок более устойчив к колебаниям, лучше гасит вибрации. И наоборот, чем выше значение декремента затухания – тем станок менее устойчив к колебаниям, хуже гасит вибрации. Учитывая эти положения и анализируя данные, приведенные в табл. 1, можно сделать следующие выводы.

1. Анализируя каждый станок в отдельности, следует отметить, что декремент затухания базовых элементов станины станка не

поддается каким-либо правилам. Так, при ударе молотком по станине декремент затухания для одних станков меньше у станины, а у других у бабки. При ударе молотком по бабке наблюдается аналогичная картина.

2. Более того, декремент затухания существенно разнится даже для аналогичных марок станков при проведении аналогичных испытаний. Например, расточные станки из г. Ковров марки КС01-09ЛФ3 имеют одинаковую конструкцию, но декремент затухания качественно отличается, причем прямо противоположно.

3. Указанные результаты в табл. 1 и выводы 1 и 2 могут быть объяснены тем, что все исследованные станки находятся в эксплуатации различное время (от 1 до 10 лет), применяются для различных видов операций (грубой черновой или тонкой чистовой обработки) и имеют не всегда полностью аналогичную конструкцию. Такие различия в конструкции, времени и интенсивности эксплуатации могут существенно влиять на значения декремента затухания.

4. Для уточнения результатов исследований будут проведены испытания станков, еще не запущенных в производство, будут определены величины декремента затухания собственных колебаний, которые будут считаться эталонными для новых станков. Далее планируется все исследованные станки разбить по временному интервалу и проследить за тем, как декремент затухания изменился в каждом конкретном условиях и чем это обусловлено.

Выводы

Таким образом, проведены исследовательские испытания металлорежущих станков с металлобетонными базовыми элементами на вибрационную устойчивость. Подобрана методика обработки экспериментальных данных и по ней разработан модуль автоматизированной обработки результатов испытаний. В разработанном модуле обработаны данные, полученные при испытании тринадцати станков с действующих машиностроительных предприятий. Проведена обработка и анализ полученных результатов,

по полученным данным сделаны выводы. Представленная методика исследования вибрационной устойчивости может быть применена при исследовании любых других марок станков и прочих механизмов.

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России в ходе выполнения проекта «Разработка конструкций и технологии полного цикла изготовления металлобетонных базовых элементов металлорежущих станков», реализуемого в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.577.21.0170 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57715X0170).

Список литературы

1. Кудинов В.А. Динамика станков. / В.А. Кудинов и др. – М.: Машиностроение. – 1967. – 300 с.
2. Пуш А.В. Шпиндельные узлы. Качество и надежность. / А.В. Пуш. – М.: Машиностроение. – 1992. – 288 с.
3. Синопальников В.А. Надежность и диагностика технологических систем / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин». – 2003. – 331 с.
4. Явленский К.Н. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем / К.Н. Явленский, А.К. Явленский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. – 1983. – 239 с.
5. Акмаев О.К. Моделирование жесткости оригинального станка с параллельной кинематикой // О.К. Акмаев, Б.А. Еникеев, А.И. Негматуллин / Станки инструмент. М.: СТИН. 2015. С. 8-12.
6. Башаров Р.Р. Учёт жёсткости многоцелевого станка при изготовлении точных деталей / Р.Р. Башаров, Р.Г. Кудояров // Сб. трудов «Наука – производству» под общей редакцией В.Л. Юрьева. – Уфа. – 2011. – С. 12-17.
7. Переверзев П.П. Моделирование ограничений по точности обработки при проектировании оптимальных циклов внутреннего шлифования / П.П. Переверзев, А.В. Акинцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, №2. – С. 61-71.
8. Матрохин М.В. Статический способ определения жесткости станков / М.В. Матрохин // Известия Тульского Государственного Университета. – Тула: Издательство ТулГУ. – 2012. – С. 8-14.
9. Пини Б.Е. Моделирование жесткости инструментальных систем станков для определения их влияния на точность обработки деталей / Б.Е. Пини,

Д.А. Зиновьев // Известия московского государственного технического университета МАМИ. М.: Издательство МАМИ. 2008. С. 129-135.

10. Пирогова Н.С. Расчетно-экспериментальный анализ собственных и критических частот и форм высокооборотного ротора микрогазотурбинной установки / Н.С. Пирогова, П.А. Тараненко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 37–47.
11. Guzeev V.I. Rigidity of Numerically Controlled Machine Tools in Grinding / V.I. Guzeev, A.Kh. Nurkenov, A.V. Ignatova // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. №1. – P. 69-72.
12. Guzeev V.I. Designing the plunge-grinding cycle on the basis of the rigidity of the technological system / V.I. Guzeev, A.Kh. Nurkenov // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, №2. – P. 150-153.
13. Kazarin D.V. The research of rotation frequency influence and technical state condition upon the level of vibration spectrum components of rolling bearings / D.V. Kazarin, V.V. Bazakin, A.V. Zaytsev, A.O. Teterin, I.S. Kudryavtseva // Procedia Engineering. – 2015. – №113. – P. 332–336.
14. Kozochkin M.P. Vibroacoustic diagnostics of spindles / M.P. Kozochkin, F.S. Sabirov // Engineering Research. – 2009. – №29. P. 827–830.
15. Sabirov F.S. Vibroacoustic diagnostics of bidirectional end milling / F.S. Sabirov, L.G. Vainer, A.V. Rivkin // Russian Engineering Research. – 2015. – №6. – P. 458-461.
16. Silaev B.M. Research of possibility of an assessment of the technical conditions of rolling bearings of aircraft engines through vibrodiagnostic criteria / B.M. Silaev, I.S. Barmanov, P.A. Danilenko // Procedia Engineering. – 2015. – №106. – P. 253-259.
17. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2016618192 Российская Федерация. Определение декремента затухания собственных колебаний станины станка по амплитудной резонансной кривой / Л.В. Шипулин, А.А. Дьяконов., А.Х. Нуркенов – Заявка № 2016615771; заявл. 03.06.2016; зарегистр. 22.07.2016.

References

1. Kudinov V.A. Dinamika Stankov. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 300 p.
2. Push A.V. Shpindel'nye Uzly. Kachestvo i Nadezhnost'. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 288 p.
3. Sinopal'nikov V.A., Grigor'ev S.N. Nadezhnost' i diagnostika tekhnologicheskikh sistem, Moscow.: ITS MGTU «Stankin», 2003, 331 p.
4. Iavlenskii K.N., Iavlenskii A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovaniye kachestva mekhanicheskikh sistem, Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1983, 239 p.
5. Akmaev O.K., Enikeev B.A., Negmatullin A.I. Static Stiffness Modeling of Parallel Kinematics Machine Tool Joints. Moscow: STIN, 2015, pp. 8-12.
6. Basharov R.R. Kudoiarov R.G. Accounting for the Rigidity of the Multipurpose Machine for The Manufacture of Precision Parts. *Sbornik trudov Nauka-proizvodstvu pod obshchei redaktsiei V.L. Iur'eva* [Proc. of the «Science-producing» under the general editorship V.L. Iur'eva]. Ufa. 2011. pp. 12-17.
7. Pereverzev P.P., Akintseva A.V. Modeling the Processing Accuracy Restrictions During the Developing of the Optimal Cycles of the Internal Grinding. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical engineering industry»*, 2016. Vol. 16, №2. pp. 61-71.
8. Matrokhin M.V. Method for Determining the Static Stiffness of Machines. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tula: Izdatel'stvo TulGU* [News of the Tula state university. Technical sciences. Tula: Publishing house of Tula State University.]. 2012. pp. 8-14.
9. Pini B.E., Zinov'ev D.A. Simulation of Tooling System Rigidity for Estimation Their Influence on Working Accuracy. "Izvestiya MGTU "MAMI". 2008. pp. 129-135.
10. Пирогова Н.С., Тараненко П.А. Calculated-Experimental Analysis of the Natural and Critical Frequencies and Mode Shapes High-Speed of Rotors Micro Gas Turbine Unit. *Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical engineering industry»*, 2015. Vol. 15, № 3. pp. 37–47.
11. Guzeev V.I., Nurkenov A.Kh., Ignatova A.V. Rigidity of Numerically Controlled Machine Tools in Grinding. Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. №1. P. 69-72.
12. Guzeev V.I. Designing the plunge-grinding cycle on the basis of the rigidity of the technological system / V.I. Guzeev, A.Kh. Nurkenov // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, №2. P. 150-153.
13. Kazarin D.V., Bazakin V.V., Zaytsev A.V., Teterin A.O., Kudryavtseva I.S. The research of rotation frequency influence and technical state condition upon the level of vibration spectrum components of rolling bearings. *Procedia Engineering*. 2015. №113. pp. 332–336.
14. Kozochkin M.P., Sabirov F.S. Vibroacoustic diagnostics of spindles. *Engineering Research*. 2009. №29. pp. 827–830.
15. Sabirov F.S., Vainer L.G., Rivkin A.V. Vibroacoustic diagnostics of bidirectional end milling. *Russian Engineering Research*. 2015. №6. pp. 458-461.
16. Silaev B.M., Barmanov I.S., Danilenko P.A. Research of possibility of an assessment of the technical conditions of rolling bearings of aircraft engines through vibrodiagnostic criteria. *Procedia Engineering*. 2015. №106. pp. 253-259.
17. Shipulin L.V., D'iakonov A.A., Nurkenov A.Kh. *Opreделение dekrementa zatukhaniia sobstvennykh kolebaniy staniny stanka po amplitudnoi re-zonansnoi krivoi*. [Determination of the Damping Decrement of the Natural Oscillations of the Machine Bed by the Amplitude Resonance Curve]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programm dlia EVM*. Patent no. 2016618192 РФ, 2016.

УДК 621.771.23.09

КОЭРЦИТИМЕТРИЯ В МОНИТОРИНГЕ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Б. Максимов¹, А.В. Гадеев¹, И.С. Ерохина¹¹ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Керчь, Российская федерация

Аннотация

В работе на основании литературных данных рассмотрено влияние процесса усталости металла на изменение коэрцитивной силы. Следствием испытания на знакопеременное напряжение является возрастание плотности дефектов структуры: точечные – вакансии, линейные – дислокации и объемные – микротрещины. В качестве критерия безаварийной работы стальной конструкции выбрана область обратимой повреждаемости. В соответствии с линейной теорией накопления повреждаемости (Ψ_i) выбрана величина равная отношению числа циклов деформации (n_i) к общему количеству циклов деформации при данной амплитуде деформации или нагрузки (N_p). Предложено считать, что в области обратимой повреждаемости, должно выполняться условие $\Psi_i \leq (0,15 - 0,30)\delta_p$, где δ_p – равномерная деформация данной марки стали. Рассмотрены приборы для определения коэрцитивной силы и государственные стандарты, позволяющие определять механические свойства стали по коэрцитивной силе.

Ключевые слова: коэрцитиметрия, деформация, металл, коэрцитивная сила, конструкционная сталь, напряжения.

COARTICULATORY IN MONITORING QUALITY OF STEEL STRUCTURES

A.B. Maksimov¹, A.V. Gadeev¹, I.S. Erokhina¹¹ Of the "Kerch state Maritime technological University", Kerch, Russian Federation

Abstract

On the basis of literature data, the influence of the process of metal fatigue on the change of the coercive force. The result of the test at alternating stress is the increase of density of structural defects: point – vacancies, line – of deployment and volume of cracks. As a criterion of safe operation of steel construction selected area of reversible damage. In accordance with the linear theory of accumulation of damage (Ψ_i) selected is the ratio of the number of cycles of deformation (n_i) to the total number of cycles of deformation at a given amplitude of deformation or load (N_p). Asked to assume that in the area of reversible damage, the following condition must fulfill $\Psi_i \leq (0,15 - 0,30)\delta_p$ where δ_p – uniform deformation of the steel grade. Reviewed the instruments to determine the coercive force and the state standards to determine mechanical properties of steel coercive force.

Keywords: cartipate, deformation, metal, coercive force, structural steel, tension.

Целью настоящей работы является обоснование необходимости и возможности определения механических свойств и остаточного ресурса металла в процессе эксплуатации с помощью коэрцитивной силы.

В процессе эксплуатации любая конструкция испытывает кроме постоянных нагрузок и знакопеременные. Знакопеременные нагрузки с течением времени приводят к усталости металла и в конечном итоге к его разрушению. Усталость металла состоит в накоплении дефектов структурного со-

стояния в процессе знакопеременных нагрузок. Величина и интенсивность знакопеременных нагрузок, зачастую, являются случайными и непрогнозируемыми характеристиками. Поэтому оценить влияние случайных характеристик на изменение микроструктуры стали конструкции можно только очень приблизительно. Изменение приводит к ее разрушению. Характерно, что усталостное разрушение происходит внезапно, без видимых следов предварительной пластической деформации. Прочностные свойства

конструкционных сталей в процессе усталостного испытания вначале немного повышаются, затем достигая некоторого максимального значения резко снижаются и происходит разрушение. Дислокационная структура стали при усталости изменяется также как при статическом растяжении. Вначале происходит увеличение плотности отдельных дислокаций. Затем, достигая определенной плотности, отдельные дислокации перестраиваются в стенки, образуя ячеистую структуру. При дальнейшем деформировании ячеистая дислокационная структура перестраивается в полосовую. Считается [1], что образование полосовой структуры является началом развития необратимой повреждаемости. В работах [2, 5] показано, что граница между обратимой и необратимой повреждаемостью стали можно оценивать при деформации растяжением составляющей 0,15 – 0,20 от равномерной деформации.

Металл конструкции может безопасно работать в области обратимой повреждаемости. Допустимая эксплуатация металла может быть до определенной степени развития необратимой повреждаемости, после чего дальнейшая эксплуатация может привести к внезапному непрогнозируемому разрушению.

Определение границы обратимой и необратимой повреждаемости и допустимой достигается исследованием микроструктуры и механических свойств образцов, вырезанных из определенных мест конструкции. Обычно это места конструкции, где действуют наибольшие напряжения.

Воздействия на конструкцию в процессе всего времени эксплуатации в общем случае носит стохастический характер. Однако, условия эксплуатации какой-либо конкретной конструкции можно с большой степенью вероятности рассматривать распределенными по нормальному закону, то есть как детерминированную систему. Вследствие этого, накопление повреждаемости металла, по-видимому, достаточно описывать линейной моделью Пальмгрена - Майнера [6]:

$$\sum \frac{n_i}{N_p} = 1, \quad (1)$$

где n_i – количество циклов, N_p – количество циклов до разрушения при постоянной амплитуде деформации или напряжения.

Действительно, если амплитуда деформации или напряжения существенно различны (в несколько раз), то уравнение (1) не выполняется. В зависимости от последовательности величин амплитуд напряжений или деформаций выражение в левой части уравнения (1) может быть больше или меньше единицы [7]. Согласно теории Новожилова, для расчета повреждаемости при нестационарном нагружении, если амплитуда деформации или напряжения изменяется незначительно, то достаточно использовать линейное правило суммирования.

Таким образом, величину ψ_i , определяемую по формуле можно считать количественной характеристикой повреждаемости, соответствующей при n_i количествах циклов:

$$\psi_i = \frac{n_i}{N_p}. \quad (2)$$

Согласно работы [2] обратимая повреждаемость соответствует величина равной (0,2–0,3) δ_p , где δ_p - относительное удлинение при равномерной деформации. Тогда наибольшая величина обратимой повреждаемости с учетом выражения (2) имеет вид:

$$\psi_{max.o} = (0,2 - 0,3) \delta_p. \quad (3)$$

На рис.1 представлено изменение коэрцитивной силы от величины повреждаемости для стали 09Г2 при растяжении до разрушения.

В этой связи применение неразрушающих методов исследования структуры и свойства сталей имеет практическое значение. Коэрцитивная сила металла является наиболее чувствительной характеристикой к изменению микроструктуры. Так, например, при деформации растяжением конструкционной стали на (4–5) % коэрцитивная сила увеличивается на (50 – 80) %, при этом акустические свойства (скорость упругих волн), электросопротивление возрастают на (2 – 5) % [8 – 10].

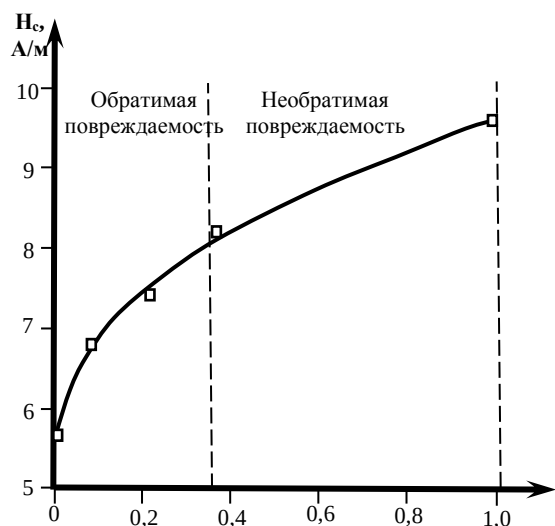


Рис.1. Определение области повреждаемости стали по значению коэрцитивной силы

Применение коэрцитивной силы стали для определения микроструктурных параметров и механических свойств разрешено рядом нормативных документов: ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом, ОСТ 14-1-184-65, ТУ-14-1016-74 и др.

В настоящее время приборная база приборов для измерения коэрцитивной силы – коэрцитиметров представлено довольно разнообразно. Основная часть коэрцитиметров имеет накладной датчик с размерами сечения полюсов 12×28 мм. Это соответствует промагничиванию металла на глубину до 5 мм. Коэрцитиметр КИФМ-1Н имеет размер сечения полюсов 20×40 мм, что соответствует глубине промагничивания на глубину не менее 10 мм.

Большинство коэрцитиметров имеют автономный режим работы (от сети и от встроенных аккумуляторов). Масса приборов не превышает двух килограммов. Это позволяет применять их не только в лабораторных условиях, но и в полевых.

Коэрцитивная сила линейно связана с пределом текучести и временным сопротивлением разрыву [11, 12]:

$$\sigma_T = AH_c \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести стали, МПа.

$$\sigma_B = BH_c, \quad (5)$$

где σ_B – временное сопротивление разрыву, МПа; H_c – коэрцитивная сила, А/м; A и B – коэффициенты, определяемые эмпирически, зависящие от химического состава стали.

С величиной зерна коэрцитивная сила связана соотношением [13 – 15]:

$$H_c = H_{co} + \frac{C}{d}, \quad (6)$$

где d – величина зерна; H_{co} – коэрцитивная сила монокристалла; C – коэффициент, зависящий от марки стали.

Для конструкционной стали величина соответствует диаметру ферритного зерна.

Выводы

На основании проведенных исследований и анализа литературных данных следует, что имеется достаточная теоретическая и экспериментальная база зависимости коэрцитивной силы от структуры стали. Структура стали определяет комплекс механических свойств. Поэтому измеряя коэрцитивную силу стали конструкции, позволяет проводить мониторинг прочности и остаточного ресурса неразрушающим методом.

Список литературы

1. Максимов А.Б. Оценка повреждаемости низколегированной стали при холодной пластической деформации / Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2013. № 1. С. 29 – 31.
2. Ровинский Б.М., Рыбакова Л.М. Напряжения, деформация и структурные изменения в техническом железе при циклической пластической деформации / Изв. АН СССР. Металлы. 1965. № 3 – С. 101 – 112.
3. А. С. 1433990 СССР. Способ обработки листового проката / М.С. Подгайский, А.Б. Максимов, Т.М. Наливайченко. Оpubл. 30. 10. 88. Бюл. № 40.
4. Максимов А.Б., Подгайский М.С. Изменение величины микронеровностей поверхности при пластическом циклическом изгибе / Изв. АН СССР. Металлы. 1983. № 2. С. 161 – 162.
5. Максимов А.Б., Подгайский М.С. Определение допустимых пределов изменения параметров деформационной упрочняющей обработки термически обработанного проката // Повышение качества термически обработанного проката М. Металлургия. 1986. С. 87 – 88.

6. Потапова Л.Б., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. М. Машиностроение. 2005. – С. 244.
7. Максимов А.Б. Влияние степени разовой деформации при бинарной деформационной обработке на долговечность стали / Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2009. № 2. С. 83 – 86.
8. Нехотящий В.А., Юхимец П.С., Безлюдько Г.Я. Использование коэрцитивной силы для оценки технического состояния конструкций, работающих под давлением / Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010. № 1. С. 49 – 53.
9. Матюк В.Ф., Кулагин В.Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методов коэрцитиметрии / Неразрушающий контроль и диагностика. 2010. № 3. С. 4 – 14.
10. Бидя В.Г., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. Дефектоскопия. 2000. № 10. – С. 3 – 27.
11. Максимов А.Б. Определение марки стали стальных прутков с помощью коэрцитиметра «СИЛА» / Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2013. № 2. С. 47 – 49.
12. Максимов А.Б. Связь параметров уравнения Петча – Холла с величиной коэрцитивной силы в стали // Материалы 21 Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Гурзуф. 7 – 10 октября 2013. С. 147.
13. Бидя Г.В. Размер зерна и корреляция прочностных, пластических и вязких свойств с коэрцитивной силой феррито-перлитных сталей / Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010. № 4. С. 40 – 45.
14. Безлюдько Г.Я., Мужичкий В.Ф., Попов Б. Е. Оценка текущего состояния и остаточного ресурса прокатных валков на основе магнитного (по коэрцитивной силе) метода неразрушающего контроля / Дефектоскопия. 2002. № 4. С. 3 – 9.
15. Вакуленко К.В., Казак М.Б., Безлюдько Г.Я., Ярещенко В.Г., Елкина Е. И. Изменения коэрцитивной силы при усталостных испытаниях образцов из стали 40Х / Проблемы машиностроения. 2015. Т. 18. № 2. С. 66 – 71.
3. A.S. 1433990 SSSR. Sposob obrabotki listovogo prokata / M.S. Podgajskij, A.B. Maksimov, T.M. Nalivajchenko. Opubl. 30. 10. 88. Bjul. No. 40.
4. Maksimov A.B., Podgajskij M.S. Izmenenie velichiny mikronerovnostej poverhnosti pri plasticheskom ciklicheskom izgibe / Izv. AN SSSR. Metally. 1983, No.2, pp. 161 – 162.
5. Maksimov A.B., Podgajskij M.S. Opredelenie dopustimyh predelov izmenenija parametrov deformacionnoj uprochnjajushhej obrabotki termoobrabotannogo prokata // Povyshenie kachestva termicheski obrabotannogo prokata M. Metallurgija. 1986. S. 87 – 88.
6. Potapova L.B., Jarcev V.P. Mehanika materialov pri slozhnom naprjazhenom sostojanii. M. Mashinostroenie, 2005, 244p.
7. Maksimov A.B. Vlijanie stepeni razovoj deformacii pri binarnoj deformacionnoj obrabotke na dolgovechnost' stali / Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. 2009, No. 2, pp. 83 – 86.
8. Nehotjashhij V.A., Juhimec P.S., Bezljud'ko G. Ja. Ispol'zovanie kojercitivnoj sily dlja ocenki tehniceskogo sostojanija konstrukcij rabotajushhij pod davleniem / Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2010, No. 1, pp. 49 – 53.
9. Matjuk V.F., Kulagin V.N. Kontrol' struktury, mehanicheskijh svojstv i naprjazhennogo sostojanija ferromagnitnyh izdelij metodov kojercitimetrii / Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika. 2010, No. 3, pp. 4 – 14.
10. Bida V.G., Nichipuruk A.P. Kojercitimetrija v nerazrushajushhem kontrole/ Defektoskopija. 2000, No. 10, pp. 3 – 27.
11. Maksimov A. B. Opredelenie marki stali stal'nyh prutkov s pomoshh'ju kojercitimetra «СИЛА» / Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2013, No. 2, pp. 47 – 49.
12. Maksimov A.B. Svjaz' parametrov uravnenija Petcha – Holla s velichinoj kojercitivnoj sily v stali // Materialy 21 Mezhdunarodnoj konferencii «Sovremennye metody i sredstva nerazrushajushhego kontrolja i tehniceskoy diagnostiki». Gurzuf. 7 – 10 oktjabrja 2013, pp. 147.
13. Bida G.V. Razmer zerna i korreljacija prochnostnyh, plasticheskijh i vjazkijh svojstv s kojercitivnoj siloj ferrito-perlitnyh stalej / Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol'. 2010, No. 4, pp. 40 – 45.
14. Bezljud'ko G.Ja., Muzhickij V.F., Popov B.E. Ocenka tekushhego sostojanija i ostatocnogo resursa prokatnyh valkov na osnove magnitnogo (po kojercitivnoj sile) metoda nerazrushajushhego kontrolja / Defektoskopija. 2002, No. 4, pp. 3 – 9.
15. Vakulenko K. V., Kazak M. B., Bezljud'ko G. Ja., Jareshhenko V.G., Elkina E.I. Izmenenija kojercitivnoj sily pri ustalostnyh ispytaniyah obrazcov iz stali 40H / Problemy mashinostroenija. 2015, T. 18, No. 2, pp. 66 – 71.

References

1. Maksimov A.B. Ocenka povrezhdaemosti nizkolegированной stali pri holodnoj plasticheskoj deformacii / Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. 2013, No 1, pp. 29 – 31.
2. Rovinskij B.M., Rybakova L.M. Naprjazhenija, deformacija i strukturnye izmenenija v tehnicеском zheleze pri ciklicheskoj plasticheskoj deformacii / Izv. AN SSSR. Metally. 1965, No 3, pp. 101 – 112.

К620.1

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И.С. Нефёлов¹, Н.И. Баурова¹

¹ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва, Российская федерация

Аннотация

Показано, что при изготовлении деталей машин с использованием аддитивных технологий наибольшее распространение в машиностроении получила FDM (Fused Deposition Modeling) технология. Проведен анализ основных дефектов деталей, изготовленных методом FDM печати, причин их возникновения и способов предотвращения. Показано, что при 3D печати деталей машин наиболее часто встречаются такие дефекты, как повреждение верхнего слоя, коробление, расслоение, царапины на поверхности детали, слоистость верхнего слоя, недоэкструзия, оплавление отдельных слоев и волнистость на радиусных конструктивных элементах. Установлено, что преобладающее количество дефектов может быть предотвращено за счет использования качественного сырья, хорошей подготовки поверхности для печати и правильного выбора режимов печати.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологические дефекты, контроль качества, 3D принтеры, FDM технология.

WAY TO PREVENT TECHNOLOGICAL DEFECTS MACHINE PARTS MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGY

I.S. Nefelov¹, N.I. Baurova¹

¹Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russian Federation

Abstract

In this article it is shown that at production of details of cars with use of additive technologies the greatest distribution in mechanical engineering was gained by FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Results of the analysis of the main defects of the details made by the FDM method of the press, the reasons of their emergence and ways of prevention are given in article. It is shown that at the 3D press of details of cars the following defects most often meet: damage of the top layer, a buckling, stratification, scratches on detail surfaces, lamination of the top layer, a insufficient extrusion, an fusion of separate layers and a sinuosity on radial structural elements. It is established that the majority of defects can be prevented due to use of qualitative raw materials, good preparation of a surface for the press and a right choice of the modes of the press.

Keywords: additive technology, technological defects, quality control, 3D printers, the FDM technology.

Введение

Создание трехмерных деталей при помощи аддитивных технологий давно перестало быть фантастикой и достаточно прочно вошло в нашу жизнь. По данным статистического обзора, количество официально зарегистрированных 3D принтеров в мире, используемых в коммерческих целях, в 2008 составляло 355 единиц оборудования, а в 2013 году увеличилось до 23000 [1-2].

По тем же данным, размер мирового рынка в области 3D печати, материалов и сопутствующих услуг в 2014 году составлял 3,8 миллиона долларов, а к 2018 году, предполагается, он достигнет отметки в 16,2 миллиона долларов.

Достижения последних лет в области 3D печати позволили расширить рынок сбыта продукции, получаемой на 3D принтерах. В машиностроении наибольшее распространения получили 3D принтеры, работающие по технологии FDM (Fused deposi-

tion modeling) – послойного наплавления нити [3]. Но, несмотря на широкое практическое распространение 3D печати в машиностроении, в настоящее время отсутствует нормативная документация, регламентирующая требования к контролю качества получаемых деталей [4].

В настоящей работе проведен анализ наиболее распространенных технологических дефектов изделий, изготовленных по технологии FDM, причин их возникновения и способов предотвращения.

Результаты и обсуждение

Повреждение первого слоя. Данный дефект часто встречается и является одним из наиболее легко исправимых [5]. Он появляется при печати первого слоя из-за низкой адгезии слоя к поверхности стола и легко обнаруживается визуальным осмотром. Основными причинами, вызывающими появление данного дефекта являются некачественная подготовка поверхности стола и некорректно подобранные параметры печати. Для повышения адгезии, перед началом печати необходимо произвести предварительную обработку поверхности стола. Для этого на поверхность стола (обычно это стекло или толстый акрил) наносят специальное покрытие. В качестве данного покрытия может выступать пленка для 3D печати; лак для фиксации; малярный скотч; тонкий слой ABS пластика, размягченного в ацетоне и др. Кроме того, изменение таких параметров как скорость экструзии, температура подогрева стола, температура плавления пластиковой нити способны оказать существенное влияние на качество адгезии первого слоя изделия [6].

Коробление или расслоение. Процесс печати связан с изменением агрегатного состояния пластика (твердое – жидкое – твердое). Изменение агрегатного состояния достигается путем нагревания и последующего остывания пластика. В силу физических особенностей процесс остывания происходит неравномерно – сначала остывают наружные поверхности детали и лишь затем внутренние. Из-за этого в материале детали

возникают внутренние напряжения, которые вызывают изменение заданных геометрических форм и размеров детали (рис. 1). Основными способами борьбы с появлением данного дефекта является стабилизация температуры материала детали [7]. Необходимо обеспечить постоянную температуру в рабочей зоне 3D принтера. Для этого боковые стенки закрывают (если принтер открытой рамной конструкции). Если это не помогает, то используют более радикальные меры: при обработке модели в программе-слайсере вокруг печатаемой детали возводят термобарьер – так называемый skirt [3]. Термобарьер обеспечивает уменьшение рассеивания тепла и более равномерное остывание детали.

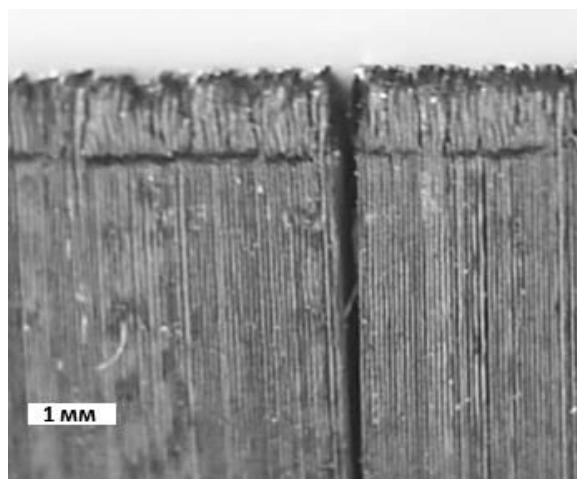


Рис. 1. Расслоение детали при увеличении 60×

Царапины. Причина появления царапин заключается в совокупности механических и программных особенностей 3D печати. При транспортировочном перемещении печатающей головки происходит вытекание некоторого количества расплавленного пластика, что приводит к появлению царапин на поверхности детали (рис. 2).

Предотвращение появления царапин решается программным способом (в некоторых программах-слайсерах предусмотрено приподнимание сопла над деталью при транспортировочных перемещениях). В некоторых случаях помогает изменение геометрической формы детали или настройка

температуры плавления пластика и скорости печати [8].

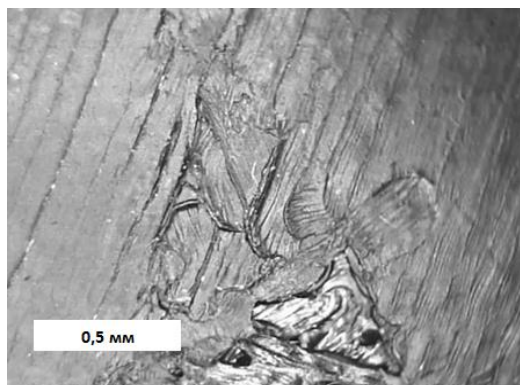


Рис. 2. Царапины на поверхности детали

Неравномерность (слоистость) первого слоя. Подобный дефект появляется по двум причинам: неверная калибровка платформы перед печатью и большая толщина первого слоя, заданная в настройках программы. При большой высоте сопла над поверхностью стола на печати видны отдельные нити пластика с четко различимыми границами (рис. 3). Если высота задана неверно – происходит расплющивание нижних слоев [9]. Для предотвращения этого дефекта в большинстве случаев достаточно провести повторную калибровку стола 3D принтера или изменить толщину первого слоя в настройках программы.

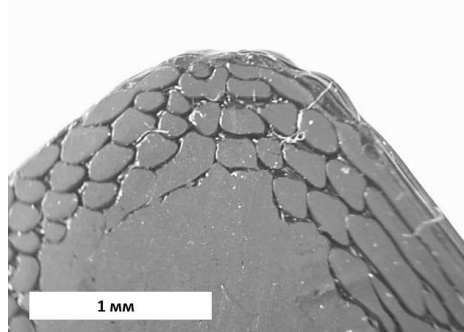


Рис. 3. Слоистость первого слоя

Недоэкструзия. Данный дефект проявляется в виде отсутствия материала в тех местах, где он должен быть по конструкции (рис. 4). На появление этого дефекта может оказать влияние огромное количество факторов, связанных с качеством сырья, особенностями принтера и программными настройками [10]. Печать на высокой ско-

рости может привести тому, что механизм экструдера не будет справляться с заданным скоростным режимом продавливания нити через сопло и произойдет прерывание наплавленной нити. Наличие загрязнений на поверхности пластиковой нити, подаваемой в механизм экструдера оказывает также негативное влияние на качество печатаемого изделия. Пыль с поверхности нити попадает на сильно нагретые поверхности стенок сопла и обгорает на них, создавая препятствия для выдавливания пластика. Некачественное сырье (в частности, отсыревший пластик) также может приводить к недоэкструзии [11-12].

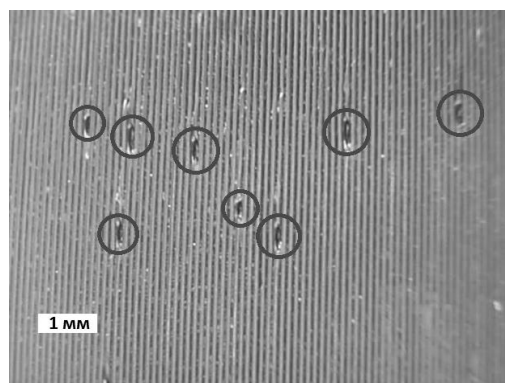


Рис. 4. Недоэкструзия детали

Оплавление нити. Задание в настройках программы температуры плавления пластика, превышающей его реальную температуру плавления приводит к появлению оплавленных слоев детали (рис. 5).



Рис. 5. Оплавление слоев детали

Волнистость. Высокие скорость печати и температура плавления пластика вызыва-

ют появление волнистости детали. Высоконагретый пластик, выдавленный из сопла на поверхность детали не сразу застывает и схватывается с основным материалом детали, а при резком изменении курса печатающей головки это приводит к тому, что незаствивший пластик тянется вслед за соплом (рис. 6).

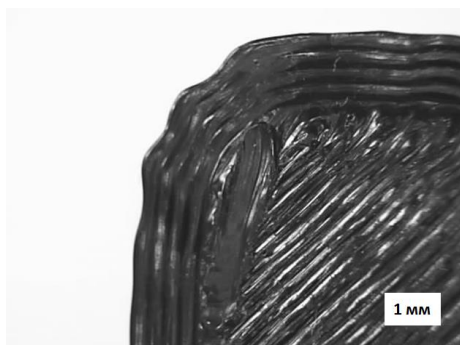


Рис. 6. Волнистость на радиусных конструктивных элементах детали

Выводы

В данной статье рассмотрена лишь небольшая часть дефектов деталей, напечатанных на 3D принтерах. Дефекты, возникающие при печати нависающих слоев (перекрытий) не рассматривались из-за сложности проявления и большого количества факторов, определяющих причины их появления [13-15].

Следует отметить, что производство деталей при помощи аддитивных технологий 3D печати с минимальным процентом устранимых дефектов, требует проведения анализа и разработки многокритериальных алгоритмов подбора параметров печати.

Список литературы

1. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). / В.А. Валетов // Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО. – 2015, – 63с.
2. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Учебное пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина // – Санкт-Петербург. СПбГУ. – 2013. – 221 с.
3. Павлов А.П. Методы обеспечения эффективности работоспособности 3D-принтеров в производственных условиях / А.П. Павлов, Е.В. По-

- лухин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2017. - №3. – С. 16-20.
4. Расторгуев Г.А. Проявление технологической наследственности при эксплуатации машин и механизмов / Г.А. Расторгуев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – №12. – С.32-40.
5. Павлов А.П. Инновационные методы контроля при механической обработке как способ повышения эффективности ремонтного производства / А.П. Павлов, И.С. Нефёлов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 4. – С. 20-23.
6. Зорин В.А. Управление рисками при проектировании, производстве и эксплуатации СДМ / В.А. Зорин // Механизация строительства. – 2016. – №10. – С. 43-46.
7. Лапина Н.В. Применение клеев и герметиков при ремонте пластиковых деталей машин / Н.В. Лапина // Энциклопедия инженера-химика. – 2015. - №3. – С. 32-35.
8. Вереина Л.И. Современное состояние отечественного станкостроения и его восстановление / Л.И. Вереина // Технология металлов. – 2016. – №10. – С. 43-48.
9. Лапина Н.В. Анализ стандартов, используемых при оценке технологичности / Н.В. Лапина // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – №10. – С. 78-81.
10. Лапина Н.В. Особенности применения клеев-расплавов при ремонте элементов системы охлаждения машин / Н.В. Лапина, Н.И. Баурова // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. – №10. – С. 33-36.
11. Малышева Г.В. Оптимизация выбора параметров, характеризующих состояния объекта, при решении задач надежности / Г.В. Малышева, И.К. Романова // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. – №6. – С.33-38.
12. Зарипова И.И. Технология подбора состава композиционного материала с прогнозируемыми свойствами / И.И. Зарипова, Д.А. Новиков // Приоритетные направления развития науки и образования. – 2016. – №3(10). – С.88-91.
13. Баурова Н.И. Учет факторов технологической наследственности методами технологической механики / Н.И. Баурова, В.А. Зорин, В.М. Приходько // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. - №6. – С. 2-8.
14. Баурова Н.И. Проявление синергетического эффекта в технологической наследственности / Н.И. Баурова, В.А. Зорин, В.М. Приходько // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. – №10. – С.3-7.
15. Кременский И.Г. Дефекты деталей и современные технологии их восстановления / И.Г. Кременский // Технология металлов. – 2015. – №2. – С. 45-48.

References

1. Valetov V.A. Additive technology (state and prospects). Textbook. SPb.: ITMO University, 2015, 63 p.
2. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additive technologies in mechanical engineering. Textbook. SPb. St. Petersburg State University, 2013, 221 p.
3. Pavlov A.P., Poluhin E.V. Methods of ensuring efficiency performance in a production environment of 3D-printers. *Repair, restoration, modernization*, 2017, №3, pp. 16-20.
4. Rastorguev G.A. The manifestation of technological heredity in the operation of machinery and mechanisms. *Repair, restoration, modernization*, 2013, №12, pp. 32-40.
5. Pavlov A.P., Nefelov I.S. Innovative methods of control during machining as a way to improve the efficiency of repair production. *Repair, restoration, modernization*, 2014, №4, pp. 20-23.
6. Zorin V.A. Risk management in the design, production and operation of SDM. *Mechanization of construction*, 2016, №10, pp. 43-46.
7. Lapina N.V. Application of adhesives and sealants in the repair of plastic machine parts. *Encyclopedia of Chemical Engineering*, 2015, №3, pp. 32-35.
8. Vereina L.I. The present state of the domestic machine tool industry and its restoration. *Metal technology*, 2016, №10, pp. 43-48.
9. Lapina N.V. Analysis of standards used in the evaluation of manufacturability. *All materials. Encyclopedic Reference*, 2016, №10, pp. 78-81.
10. Lapina N.V. Baurova N.I. Features of the application of hot melt adhesives in the repair of elements of system of cooling-machine. *Repair, restoration, modernization*, 2015, №10, pp. 33-36.
11. Malysheva G.V. Romanova I.K. Optimizing selection parameters characterizing the state of the object, in solving reliability problems. *Repair, restoration, modernization*, 2015, №6, pp. 33-38.
12. Zaripova I.I., Novikov D.A. Technology selection of the composition of the composite material with predictable properties. *Priorities for Science and Education*, 2016, №3 (10), pp. 88-91.
13. Baurova N.I., Zorin V.A., Prikhodko V.M. Accounting for technological heredity technological methods of mechanics. *All materials. Encyclopedic Reference*, 2016, №6, pp. 2-8.
14. Baurova N.I., Zorin V.A., Prikhodko V.M. Manifestation of synergies in technological heredity. *All materials. Encyclopedic Reference*, 2015, №10, pp. 3-7.
15. Kremensky I.G. Defects of parts and co-interim recovery technology. *Metal technology*, 2015, №2, pp. 45-48.

УДК 676.1

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ

А.А. Саетшин¹, В.Г. Борбузанов², З.Т. Валишина¹, Е.Л. Матухин², А.В. Косточко¹¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская федерация²ФКП «Казанский государственный казенный пороховой завод», Казань, Российская федерация

Аннотация

Одним из важнейших показателей пригодности новых типов волокнистых материалов для переработки в продукции с заданными свойствами является степень измельчения. Проведен подробный анализ влияния различных факторов на качество измельчения волокнистых материалов. Сведения необходимы для прогнозирования свойств новых видов материалов и управления технологическим процессом получения волокнистых материалов с улучшенными и регулируемыми характеристиками. Показаны преимущества современного метода анализа свойств волокна в процессе получения новых видов материалов, позволяющего оценить активную поверхность волокна и его фракционный состав.

Ключевые слова: азотнокислый эфир целлюлозы, степень измельчения, коническая мельница, дисковая мельница Кузьмина, фракционный состав, морфологическая структура.

INTENSIFICATION OF GRINDING TECHNOLOGY AND METHODS FOR STUDYING THE STRUCTURE OF FIBROUS MATERIALS IN THE PROCESS OF ITS PRODUCTION

A.A. Saetshin¹, V.G. Borbuzanov², Z.T. Valishina¹, E.L. Matuhin², A.V. Kostochko¹¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation²Kazan gunpowder plant, Kazan, Russian Federation

Abstract

One of the most important indicators of the suitability of new types of fibrous materials for processing in products with specified properties is the degree of grinding. A detailed analysis of the influence of various factors on the quality of grinding of fibrous materials was carried out. The information is necessary for predicting the properties of new types of materials and controlling the technological process for obtaining fibrous materials with improved and controlled characteristics. The advantages of a modern method for analyzing the properties of fibers in the process of obtaining new types of materials are shown, which makes it possible to evaluate the active fiber surface and its fractional composition.

Keywords: nitrate ester of cellulose, the degree of grinding, conical mill, disk mill Kuzmina, fractional composition, morphological structure.

Введение

Важную технологическую роль в процессе производства азотнокислых эфиров целлюлозы играет фаза измельчения [1-3].

Принципы управления процессом измельчения, различных видов нитратов целлюлозы (НЦ) основываются на теоретических представлениях о процессе измельчения волокнистого материала, установленных

на основе систематических исследований и выявленной зависимости, связывающей фракционный состав НЦ с технологическими параметрами процесса измельчения, и структурно-морфологическими особенностями НЦ, скоростью их пластификации и качеством нитратцеллюлозных композиций [4-6].

Целью данной операции является придание волокнам НЦ необходимых геометрических размеров, обеспечивающих быстрое

проникновение промывных жидкостей внутрь волокон и удаление из каналов закапсулированных кислот, оставшихся после проведения предыдущих этапов стабилизации. При измельчении волокон в водной среде происходит также изменение их структурных свойств, поэтому термин «измельчение» не отражает сущности технических и технологических процессов, которые происходят в установках типа ролла, конических и других мельницах.

Результаты и обсуждение

Степень измельчения, наряду с такими параметрами, как вязкость, растворимость, степень этерификации и ММР является одной из важнейших характеристик качества, определяющей технологические свойства НЦ и нитратцеллюлозных композиций (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика физико-химических и структурных свойств НЦ с аналогом

Наименование показателя	Образец НЦ №2С ^х	Новый вид НЦ	Аналог
		Образец НЦ № 1-01	
Содержание азота, %	13,21	13,2	13,17-13,3
Вязкость, мПа·с	15,7	57	45-60
$S_{уд}$, м ² /г	8,71	7,3	
Растворимость сп/эф, %	5,1	28,3	28-35
Растворимость в спирте, %	1,0	1,3	Max 3
Степень измельчения: Объем волокна, мл/10г	108	98	Max 95

Для измельчения НЦ (Образец № 2С) использована коническая мельница РК-01.

Существующие технологические процессы и их аппаратное оформление не позволяют получать волокнистые материалы, в частности, азотнокислых эфиров целлюлозы однородных по фракционному составу. В процессе стабилизации и особенно

измельчения происходит некоторое усреднение по фракционному составу [3].

Проблема повышения однородности и стабильности свойств по растворимости, молекулярной массе НЦ является актуальной в связи с расширением области применения и ужесточением требований на новые виды и типы азотнокислых эфиров целлюлозы. Повышение качественных показателей НЦ возможно путем оптимизации технологического процесса или существенной модернизации производства.

В работе представлены основные экспериментальные данные по исследованию механизма измельчения волокон НЦ в рабочих органах ножевых машин, а также характера обработки волокон в различных размалывающих агрегатах, рассмотрены также вопросы анализа морфологической структуры НЦ с помощью современного метода анализа свойств волокна.

Для измельчения НЦ в настоящее время используются конические (РК-01) и дисковые мельницы ДМК (дисковая мельница Кузьмина), различающиеся по принципу размола: при измельчении на конической мельнице волокно «размалывается» и в результате НЦ имеет «развернутую» поверхность. При измельчении же на дисковой мельнице ДМК волокно, в основном, нарезается. Характер воздействия на волокна при размоле оказывает существенное влияние на характеристики изделий [9-10].

Влияние способа измельчения на свойства получаемых НЦ было подтверждено при изучении термомеханических свойств и кинетики набухания азотнокислых эфиров целлюлозы на основе хлопковых и древесных целлюлоз (табл. 2).

Как показывают результаты исследования, представленные в табл. 2, способ измельчения оказывает существенное влияние на технические и технологические свойства НЦ, существенно влияющие на качество получаемых нитратцеллюлозных композиций.

Недостаточные знания в части механизма размола НЦ, а именно в способе воздействия рабочих органов на волокно, а также существующее аппаратное оформление фазы измельчения не позволяют подготовить

волокно таким образом, чтобы пластикация прошла в достаточной степени [7-8].

Таблица 2. Влияние способа измельчения на физико-химические и технологические характеристики нитратов целлюлозы, полученных из различного вида сырья [4]

Целлюлоза	Тип мельницы	Содержание азота, мл NO/г	Вязкость, °Э	Ситовый анализ (сито 0,16 %)	Степень набухания, ΔV
ХЦ	РК-01 ДМК	191,4	2,0	1,0	0,50
		191,8	2,5	2,3	0,35
ЦА	РК-01 ДМК	189,4	2,2	3,1	0,38
		190,2	2,0	2,7	0,40

При измельчении НЦ с высокой степенью замещения на ДМК фракционный состав его зависит от способа подачи и отвода нитратцеллюлозной водной взвеси из аппарата. При измельчении НЦ по схеме "под давлением" средняя длина волокна составляет примерно - 0,168 мм, насыпная масса - 108 кг/м³. При измельчении по схеме "самотек" средняя длина волокна составляет примерно - 0,131 мм, насыпная масса - 128 кг/м³. При измельчении на конической мельнице РК-01, вследствие многократного прохождения через измельчительные ножи, средняя длина волокна составляет около - 0,207 мм, а насыпная масса примерно - 108 кг/м³.

При измельчении на ДМК по схеме «под давлением», при повышении концентрации суспензии от 4 до 8% объемных содержание фракции с размером волокна 0,16 мм возрастает от 0 до 27%. Объясняется это тем, что увеличение концентрации суспензии нитропродукта приводит к увеличению времени пребывания НЦ в аппарате, за счет снижения скорости течения массы, поэтому вероятность проскока волокна между режущими кромками ножей снижается. При этом, фракционный состав НЦ находится в прямой зависимости от концентрации суспензии, чем выше концентрация, тем больше степень измельчения НЦ.

Установлен фракционный состав НЦ №1 и №2 (табл. 3) измельченных на ДМК (рис.

1) [11] в зависимости от времени обработки и интенсивности нагрузки.

Таблица 3. Физико-химические характеристики изученных нитратов целлюлозы

Наименование показателя	НЦ	
	№1	№2
Исходное сырье	Хлопковая целлюлоза	
Содержание азота, %	13,1	11,8-12,5
Степень измельчения: Остаток на сите 016, %	Не более 7	Не более 9

Из графика (рис. 1) видно, что при увеличении времени измельчения и увеличении нагрузки на двигатель ДМК происходит значительное уменьшение фракции с длиной волокна более 0,5 мм. Также наблюдаем при измельчении НЦ на ДМК заметное увеличение содержания данной фракции наблюдается лишь при нагрузках на вал двигателя более 180 А.

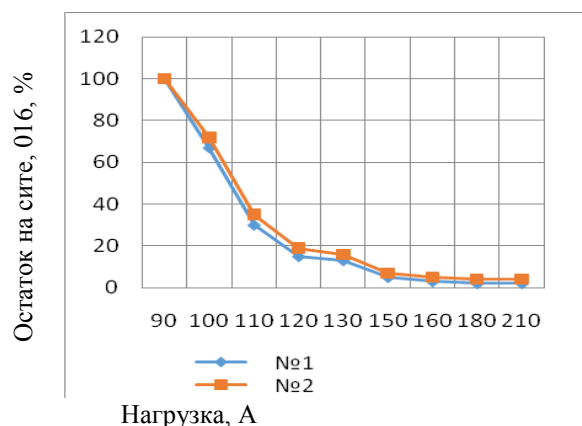


Рис.1. Качество измельчения нитратов целлюлозы ситовым методом по остатку на сите 0,16 при измельчении на ДМК

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что необходимо использование такого оборудования на фазе измельчения НЦ, которое осуществляло бы не только резку волокон, но и его фибриллирование для получения требуемых параметров по степени измельчения [12].

На сегодняшний день степень измельчения НЦ нуждается в корректной оценке. До последнего времени не было разработано достаточно надежного метода оценки качества измельчения НЦ, а существующие методы (объемный метод, «артиллерийская

проба», ситовый метод), не дают полную информацию о качестве измельчения и не позволяют выявить основных факторов, влияющих на процесс формирования свойств НЦ с улучшенными характеристиками. В настоящее время используется новый метод [13-16].

Применение нового современного метода анализа морфологической структуры НЦ очевидна и необходима для установления взаимосвязи между размерами частиц, структурой и свойствами целлюлозосодержащих материалов.

Метод позволяет анализировать образцы с предоставлением данных о размерах волокна (длина, ширина), о характеристиках мелочи, грубости, скручивании волокна и других многочисленных параметрах морфологической структуры волокна и частиц.

Принцип измерения заключается в следующем: камера высокого разрешения захватывает полутоновые изображения, из которых анализатор вычисляет различные свойства волокна с помощью анализа изображений. Изображение волокон образца формируется в измерительной ячейке с глубиной резкости 0,5 мм согласно стандарту ISO 16505-2. Длина волокна измеряется вдоль оси симметрии волокна; за счёт этого также обеспечивается точность измерений изогнутых и перекрученных волокон. Кроме того, для расчёта деформаций измеряется проекционная длина волокон (линейное расстояние между точками волокна, находящимися на самом дальнем расстоянии одна от другой).

Результаты анализов представлены в виде таблиц (табл. 4-8) и рисунков (рис. 2-5).

Таблица 4. Распределение фракций по длине, ширине и массе для НЦ № 1-01 на основе современного метода анализа

Фракционный состав, мм	Длина, %	Масса, %	Ширина, %
1: 0-0,2	27,8	25,1	16,1
2: 0,2-0,6	54,7	56,3	17,4
3: 0,6-1,2	16,3	17,3	17,8
4: 1,2-2,0	1,2	1,3	17,6
5: 2,0-3,2	0,1	0,1	19,0

Таблица 5. Результаты обработки образца НЦ №1-01

Грубость, мг/м	0,098
Скрученность, %	22,94
Хлопьевидная мелочь А, %	35,22
Пластинчатая мелочь В, %	5,79
Мелочь в процентах от Средневзвешенного, %	67,05
Ширина волокна, мкм	17,5

Таблица 6. Средняя длина волокна для образца НЦ №1-01

Средняя длина волокна	Значение
Lc(n) Среднее арифметическое длины волокна, мм	0,179
Lc(l) Средневзвешенная по длине длина волокна, мм	0,381
Lc(w) Средневзвешенная по весу длина волокна, мм	0,574

Таблица 7. Распределение фракций по длине, ширине и массе для НЦ № 2С на основе современного метода анализа

Фракционный состав, мм	Длина, %	Масса, %	Ширина, %
1: 0-0,2	45,8	41,4	16,9
2: 0,2-0,6	48,3	52,7	18,7
3: 0,6-1,2	5,6	5,7	18,3
4: 1,2-2,0	0,3	0,2	16,3

Таблица 8. Результаты обработки образца НЦ №2С

Грубость, мг/м	0,110
Скрученность, %	21,39
Хлопьевидная мелочь А, %	52,17
Пластинчатая мелочь В, %	4,23
Мелочь в процентах от Средневзвешенного, %	78,61
Ширина волокна, мкм	16,8

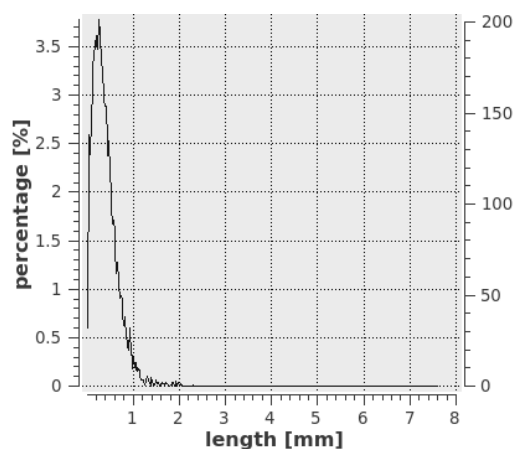


Рис. 2. Средневзвешенное распределение по длине частиц образца № 1-01

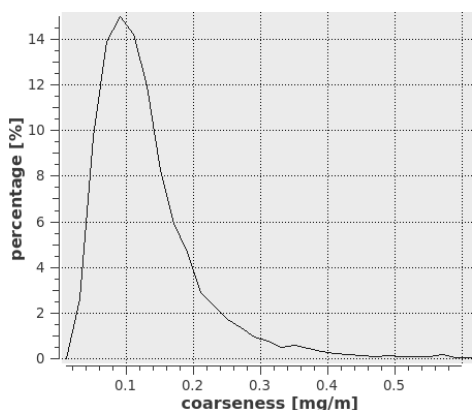


Рис. 3. Распределение по грубости для образца НЦ № 1-01

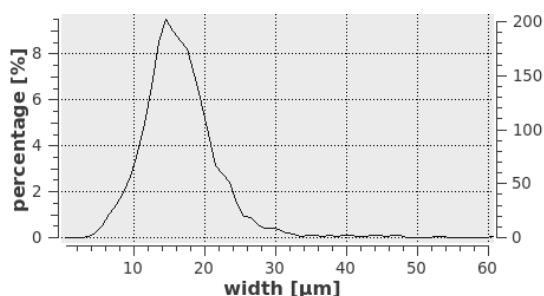


Рис.4. Распределение по ширине волокна для образца НЦ №2С

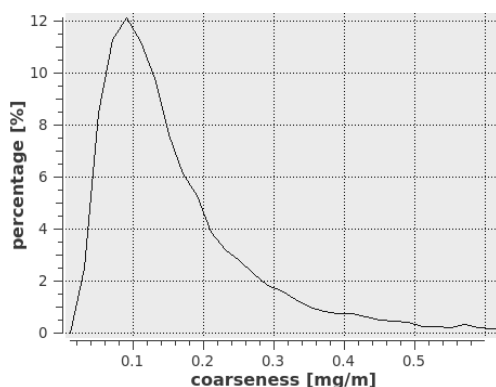


Рис. 5. Распределение по грубости для образца НЦ № 2С

Выводы

Таким образом, использование соответствующего размалывающего оборудования и подбора оптимального режима его работы позволит получать нитраты целлюлозы с однородными свойствами по гравиметрической плотности, структуре, активной поверхности, фракционному составу, степени полимеризации, скорости абсорбции пластификаторов и нитратцеллюлозных композиций, с улучшенными механическими характеристиками.

Современный метод анализа свойств частиц целлюлозных материалов и их азотно-кислых эфиров целлюлозы характеризуется большой точностью, информативностью и имеется возможность использовать как экспресс метод.

Список литературы

1. Гиндич В.И. Производство нитратов целлюлозы. Технология и оборудование. / В.И.Гиндич, Л.В.Забелин, Г.Н.Марченко – М.: ЦНИИНТИ, 1984. – С. 360.
2. Михайлов Ю.М., Косточко А.В., Валишина З.Т. Современные представления о строении и структуре азотнокислых эфиров целлюлозы// Боеприпасы и спецхимия-2011. -№2.-С.62-77.
3. Валишина З.Т., Саетшин А.А., Борбузанов В.Г., Гиниятов Н.Х., Матухин Е.Л., Косточко А.В. Боеприпасы//Научно-технический сборник ГНЦ ФГУП «ЦНИИХМ им. Д.И. Менделеева», Структура и свойства нового вида нитрата целлюлозы с улучшенными характеристиками, 2016, -№2, - С.31-41.
4. Марченко Г.М. Производство нитратов целлюлозы. Физико-химические основы производства и переработки нитратов целлюлозы. /Г.Н.Марченко, Л.В.Забелин. М.: ЦНИИНТИ и ТЭН, 1988. - С. 166.
5. Коваленко В.И. Нитрат целлюлозы: молекулярно-структурная неоднородность: монография / В.И. Коваленко, О.В. Михайлов, Г.М. Храпковский. – Казань: Фан, 2003. – С. 152.
6. В.М. Лебедева, А.С. Семочкин, Д.М. Каганов. Интенсификация процесса обезвоживания нитратов целлюлозы на центрифугах периодического действия. //Успехи в специальной химии и химической технологии. Труды Всероссийск. Конф. РХТУ им. Д.И. Менделеева / Москва, РХТУ, 2010. -С.452-454.
7. Косточко А.В., Валишина З.Т., Шипина О.Т. Математическая модель процесса совместимости в системе нитрат целлюлозы – растворитель// Вестник Казанского технол. ун-та. – 2013.–Т.16.– № 14.–С.55-58.
8. Валишина З.Т., Саетшин А.А., Борбузанов В.Г., Матухин Е.Л., Косточко А.В. Структура и свойства высококачественных дисперсных нитратов целлюлозы. // Материалы VIII Всероссийской конф. «Энергетические конденсированные системы». -Черноголовка, 2016. - С. 157.
9. Саетшин А.А., Валишина З.Т., Матухин Е.Л., Малов И.И., Галиуллина Г.Н., Косточко А.В. Метод исследования морфологической структуры порошковых целлюлоз// Вестник Казанского технологического университета, 2016. -Т.19.- №18, - С. 103-106.

10. Саетшин А.А., Низамиев А.Ю., Юсупов Ф.Т., Борбузанов В.Г., Матухин Е.Л., Валишина З.Т., Косточко А.В. Технологии и оборудования измельчения целлюлозосодержащих материалов // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016», – Казань, - 2016, Ч. 1, - С. 154-158.
11. Юсупов Ф.Т., Саетшин А.А., Борбузанов В.Г., Матухин Е.Л., Валишина З.Т., Косточко А.В. Совершенствование технологии и оборудования для модификации целлюлозных материалов (разволокнение, агрегирование, кондиционирование) // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016», – Казань, - 2016, Ч. 1, - С. 234-237.
12. Саетшин А.А., Валишина З.Т., Матухин Е.Л., Косточко А.В. Современный метод анализа свойств целлюлозосодержащих материалов // Экологические проблемы субъектов экономики: сборник материалов VI международной научно-практической конференции – Пенза: Изд-во Пензенского государственного технологического университета», 2016, – С. 77-80.
13. Низамиев А.Ю., Саетшин А.А., Юсупов Ф.Т., Борбузанов В.Г., Матухин Е.Л., Косточко А.В. Оптимизация производства на основе математического и компьютерного моделирования технологических процессов // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2016», – Казань, - 2016, Ч. 1, - С. 134-137.
14. Саетшин А.А., Валишина З.Т., Матухин Е.Л., Косточко А.В. Современный метод исследования свойств высококачественный дисперсных целлюлоз и азотнокислых эфиров целлюлозы // Сборник тезисов докладов «Современные проблемы специальной технической химии», Казан.гостехнол. ун-т.–Казань, 2016, -С. 30.
15. Саетшин А.А., Валишина З.Т., Матухин Е.Л., Галиуллина Г.Н., Малов И.И., Косточко А.В. Исследование структуры и свойства порошковых целлюлоз. // Материалы XX Международной научно-практической конф. «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса». -Суздаль, - 2016.-С. 106.
16. Валишина З.Т., Косточко А.В Шипина О.Т., Гатина Р.Ф., Михайлов Ю.М. Структура и свойства новых типов азотнокислых эфиров // Вестник Казанского технол.ун-та. - 2010.- № 9.- С.281-290.

References

1. Gindich V.I. Production of cellulose nitrates. Technology and equipment. / V.I. Gindich, L.V. Zabelin, G.N. Marchenko - M.: TSNIINTI, 1984. - pp. 360.
2. Mikhailov Yu.M., Kostochko A.V., Valishina Z.T. Modern ideas about the structure and structure of nitrate esters of cellulose // Ammunition and special chemistry-2011.-No.2-pp.62-77.
3. Valishina Z.T., Saetshin A.A., Borbuzanov V.G., Giniyatov N.Kh., Matukhin E.L., Kostochko A.V. Ammunition // Scientific and technical collection of the State Scientific Center of the Federal State Unitary Enterprise "TsNIIKhM im. DI. Mendeleev ", Structure and properties of a new type of cellulose nitrate with improved characteristics, 2016, -№2, - pp.31-41.
4. Marchenko G.M. Production of nitrates of cellulose. Physical and chemical foundations of production and processing of cellulose nitrates. / G.N. Marchenko, L.V.Zabelin. M.: TsNIINTI and TAN, 1988.- pp. 166.
5. Kovalenko V.I. Cellulose nitrate: molecular-structural heterogeneity: monograph / V.I. Kovalenko, O.V. Mikhailov, G.M. Khrapkovsky. - Kazan: Fan, 2003, - pp. 152.
6. V.M. Lebedeva, A.S. Semochkin, D.M. Kaganov. Intensification of the process of dehydration of cellulose nitrates on centrifuges of periodic action. // Successes in special chemistry and chemical technology. Proceedings All-Russian. Conf. RCTU them. DI. Mendeleev / Moscow, RCHTU, 2010,- pp.452-454.
7. Marchenko G.N. Physico-chemical basis and hardware design of the technology for the production of pyroxylin powders. Volume 1. Nitrates of cellulose-vine, ed. GN Marchenko. - Kazan: FEN, 2000, - pp. 554.
8. Valishina Z.T., Saetshin A.A., Borbuzanov V.G., Matukhin E.L., Kostochko A.V. Structure and properties of high-quality dispersed cellulose nitrates. // Materials of the V111 All-Russian Conf. "Energy condensed systems." - Chernogolovka, 2016,- pp. 157.
9. Saetshin A.A., Valishina Z.T., Matukhin E.L., Malov I.I., Galiullina G.N., Kostochko A.V. A Method for Investigating the Morphological Structure of Powder Celluloses // Bulletin of the Kazan Technological University, 2016.-T.19.-No. 18, - pp. 103-106.
10. Saetshin A.A., Nizami A.Yu., Yusupov F.T., Borbuzanov V.G., Matukhin E.L., Valishina Z.T., Kostochko A.V. Technologies and equipment for pulverizing of cellulose-containing materials // Materials of the International Scientific and Technical Conference "Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials - 2016", Kazan, - 2016, Ch. 1, - pp. 154-158.
11. Yusupov F.T., Saetshin A.A., Borbuzanov V.G., Matukhin E.L., Valishina Z.T., Kostochko A.V. Im-

- provement of technology and equipment for the modification of cellulosic materials (separation, aggregation, conditioning) // Materials of the International Scientific and Technical Conference "Innovative machine-building technologies, equipment and materials - 2016", - Ка-зань, - 2016 , Part 1, - pp. 234-237.
12. Saetshin A.A., Valishina Z.T., Matukhin E.L., Kostochko A.V. A modern method for analyzing the properties of cellulose-containing materials. // Ecological problems of economic subjects: a collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference - Penza: Publishing House of the Penza State Technological University ", 2016, - pp. 77-80.
13. Nizami A.Yu., Saetshin A.A., Yusupov F.T., Borbuzanov V.G., Matukhin E.L., Kostochko A.V. Optimization of production on the basis of mathematical and computer modeling of technological processes // Proceedings of the International scientific and technical conference "Innovative machine-building technologies, equipment and materials - 2016", Kazan, - 2016, Ch. 1, - pp. 134-137.
14. Saetshin A.A., Valishina Z.T., Matukhin E.L., Kostochko A.V. A modern method for investigating the properties of high-quality dispersed celluloses and nitrate esters of cellulose // Collection of abstracts of reports "Modern problems of special technical chemistry", Kazan.Gostekhnol. Un-t.-Kazan, 2016, -pp. 30.
15. Saetshin A.A., Valishina Z.T., Matukhin E.L., Galullina G.N., Malov I.I., Kostochko A.V. Investigation of the structure and properties of powdered celluloses.// Materials of the XX International Scientific and Practical Conf. "Reagents and materials for construction, operation and repair of oil, gas and gas condensate wells: production, properties and experience of application. Ecological aspects of the oil and gas complex. "- Suzdal, - 2016.- pp. 106.
16. Valishina Z.T., Kostochko A.V., Shipin O.T., Gatina R.F., Mikhailov Yu.M. Structure and properties of new types of nitrate esters // Vestnik Kazanskogo tekhnol.un-ta.- 2010.- № 9.- pp.281-290.

УДК 621.373.826.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ИЗ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Т.В. Тарасова¹, Р.Р. Аблеева¹¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская федерация

Аннотация

Исследованы процессы селективного лазерного плавления порошков высокопрочных алюминиевых сплавов. Проведен гранулометрический анализ исходных порошков. Для оптимизации параметров были проведены эксперименты на установке селективного лазерного плавления Phenix по изготовлению отдельных треков. Установлены оптимальные режимы селективного лазерного плавления для изготовления деталей из порошков высокопрочных алюминиевых сплавов. По оптимальным параметрам изготовлены образцы и проведены исследования физико-механических свойств. Для улучшения свойств материала, в данном случае микротвердости, была использована термическая обработка в вакуумной печи. Были проведены исследования микроструктуры образцов до и после термической обработки.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, алюминиевые сплавы.

FABRICATION OF PARTS BY SELECTIVE LASER MELTING USING ALUMINUM ALLOYS

T.V. Tarasova¹, R.R. Ableyeva¹¹ Stankin Moscow State Technological University (Stankin MSTU), Moscow, Russian Federation

Abstract

The Selective Laser Melting process of high-strength aluminum alloys powders was investigated. A granulometric analysis of the initial powders was carried out. For process optimization, the experiments of making single tracks were made in the Phenix machine. Using the optimal parameters, the specimens were made and the physical and mechanical properties of the parts were defined. For improving the materials properties, in this case the microhardness, the heat treatment in a vacuum furnace was used. The microstructure investigation of the specimens before and after heat treatment was investigated.

Keywords: selective laser melting, aluminum alloys.

Введение

Лидирующей технологией аддитивного производства на сегодняшний день является технология селективного лазерного плавления (СЛП). [1] В настоящее время технологии СЛП широко используются в различных областях – авиационной и аэрокосмической, атомной индустрии, медицине и приборостроении. [2, 3].

Одним из важных направлений в развитии аэрокосмической промышленности является снижение массы конструкции при одновременном сохранении высокого уровня эксплуатационных свойств (износостойкости, термостабильности, прочности, коррозионной стойкости и др.). Для этих целей

всё большее применение находит селективное лазерное плавление. С помощью СЛП изготавливают детали реактивных и газотурбинных двигателей, лопатки, лопасти, диски и т.д. [4, 5].

Сплавы алюминия являются перспективными материалами в авиастроении, обладающие низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Изделия, полученные СЛП из порошкового материала на основе алюминиевых сплавов, обладают большим потенциалом для применения в аэрокосмической промышленности, т.к. позволяют изготовить легкие детали со сложной геометрией. [6, 7, 8].

Наибольшее распространение среди алюминиевых сплавов, используемых в

СЛП, получили сплавы AlSi12 и AlSi10Mg. Однако прочностные характеристики указанных сплавов не удовлетворяют требованиям аэрокосмической отрасли. [9, 10, 11, 12].

Целью настоящей работы является определение возможности использования высокопрочного Al сплава для изготовления изделий методом СЛП.

Методы исследования

Изготовление образцов проводилось на машине селективного лазерного плавления (СЛП) Phenix Systems PM100 (в лаборатории «Диагностики и инженерии промышленных процессов» (DIPI) Национальной Инженерной Школы Сент-Этьенна, Франция). Источником лазерного излучения является иттербиевый волоконный лазер с непрерывным излучением на длине волны 1075 нм и максимальной мощностью излучения $P = 200$ Вт. Размер лазерного пятна на поверхности порошкового слоя составлял ≈ 70 мкм. СЛП осуществлялось в закрытой камере, заполненной аргоном, для предотвращения окисления.

При изготовлении опытных образцов применялись различные стратегии сканирования (однозонная, двузонная, кросс-штриховка).

В качестве материала для изготовления опытных образцов были выбраны порошки сплавов AlSi12 и Al 7075.

Гранулометрический анализ частиц проводился с помощью оптического гранулометрического анализатора Alpa500 NANO (OcchioSA, Бельгия), со встроенным программным обеспечением Callisto для статистической обработки данных. Химический анализ, морфологию частиц и распределение элементов порошков алюминиевых сплавов определяли на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN изготовителя TESCAN (Чехия) методом сканирующей электронной микроскопии.

Для оптимизации параметров были проведены эксперименты на машине Phenix по изготовлению отдельных треков, критерием качества являлись отсутствие микротрещин и пористости, равномерные по длине и толщине треки. Качество сформированных треков, а также микроструктура опытных

образцов анализировались при помощи оптического микроскопа ZEISS AxioScope A1.

Плотность образцов рассчитывалась при помощи программы Adobe Photoshop CS5. Поперечные сечения образцов исследовались на наличие пор при помощи оптического микроскопа ZEISS AxioScope A1 с пятикратным увеличением. Для каждого образца фотографии преобразовывались в черно-белый цвет, отношение количества черных пикселей к белым соответствует значению пористости.

Измерение микротвердости опытных образцов проводили на твердомере BUEHLER Omnimet MHT 5104.S. Для измерения микротвердости на образец прикладывалась нагрузка равная 100 грамм в течение приблизительно 10 секунд.

Для улучшения свойств материала, в данном случае микротвердости, была использована термическая обработка в вакуумной печи.

Результаты и обсуждение

В результате анализа порошкового материала установлено, что средний диаметр частиц порошка Al7075 немного превышает средний диаметр частиц AlSi12. Форма частиц порошка алюминия 7 серии более сферичная по сравнению с AlSi12.

Были изготовлены образцы кубической формы, размером 7x7x7 мм, с использованием порошка AlSi12.

Рабочая температура в камере соответствовала 70° С. В данной серии образцов была использована однозонная стратегия сканирования, при следующих параметрах: мощность лазера 150 Вт, толщина слоя 50 мкм, шаг сканирования 50 мкм, скорость сканирования изменялась от 400 до 1200 мм/сек с шагом 100 мм/сек. В результате первого набора экспериментов были получены образцы с низким значением плотности, максимальное значение составляло 95%.

В следующей серии опытов использовался метод двух зон, при следующих параметрах: мощность лазера 150 Вт, толщина слоя 30 мкм, шаг сканирования варьировался от 30 до 160 мкм, скорость сканирования изменялась от 400-400 до 1200 мм/сек. Было изготовлено 5 образцов. Образец с наилучшим значением плотности 99,93%, был по-

лучен при следующих параметрах: $P=150$ Вт, $V=400$ мм/сек, плотность энергии равна $0,75$ Дж/мм.

Из порошка Al7075 также было изготовлено 3 серии образцов. В первой серии использованы параметры мощности и скорости сканирования, которые обеспечивали наивысшую плотность образцов сплава AlSi12. Рабочая температура в камере соответствовала 100°C . Было решено использовать более высокую температуру в камере, чем при экспериментах с AlSi12, из-за склонности данного сплава к трещинообразованию. Максимальное значение плотности образцов соответствовало $98,90\%$. Было обнаружено множество трещин, в основном в направлении сканирования.

Вторая серия экспериментов проводилась с рабочей температурой 200°C . Все образцы показали очень высокий уровень пористости. Третья серия проводилась без подогрева рабочей камеры, с использованием стратегии "кросс-штриховки".

Таким образом, были выбраны следующие оптимальные режимы для СЛП: $P=150$ Вт, $V=400$ мм/сек, $S=90$ мкм, $h=30$ мкм, угол равен 30° , без подогрева. Плотность энергии данного образца составляет $0,75$ Дж/мм, а плотность образца равна $99,91\%$.

По оптимальным параметрам были изготовлены образцы и проведен ряд исследований, в частности определение микротвердости. Максимальное значение микротвердости составило 131 HV .

Для улучшения свойств материала, в нашем случае микротвердости, была использована термическая обработка. [13, 14, 15] Закалка и старение проводились на трех образцах. Образцы нагревались до 490°C в печи в течение 30 минут с охлаждением в воде.

Старение проводили при температуре 121°C в течение 55 минут с охлаждением в воде. Второй этап старения проводили при температуре 177°C в течение 55 минут.

После термообработки проводились замеры микротвердости. Результаты показали, что после термической обработки не наблюдается значительного упрочнения сплава Al7075. Среднее значение микротвердости образцов после термической обработкой составляет 101 HV , что выше на 11% , по сравнению с образцами без термической обработки, твердость которых составляла 91 HV .

Химический состав образцов после СЛП отличается от химического состава до СЛП. В табл. 1 показано, что процентное содержа-

ние Аллюминия, Магния и Меди увеличилось, а содержание Цинка уменьшилось. Одной из причин может быть испарение цинка в процессе СЛП. Температура испарения цинка составляет 907°C , что значительно ниже чем температура испарения алюминия, которая равна 2470°C .

Таблица 1. Химический состав элементов сплава Al7075

Элемент	До СЛП, %	После СЛП, %
Магний	2,4	2,41
Алюминий	89,2	91,42
Медь	1,5	2,09
Цинк	5,9	4,15

По фотографиям микроструктуры, полученным до термической обработки и после, сделан вывод, что после термической обработки отсутствуют дендриты и видны выделения вторичной фазы. По карте распределения элементов выявлены включения интерметаллидных фаз по границам зерен.

Выводы

1. Проведен расчет оптимальных параметров для сплава Al7075 на машине Phenix Systems PM100. С целью получения оптимальных параметров СЛП, обеспечивающих наибольшую плотность образцов, первоначально использовался в качестве модельного материала сплав AlSi12. Далее – порошок Al7075.

2. Проведенные исследования показали возможность получения трехмерных объектов из сплава Al7075 с помощью СЛП. Установлены оптимальные параметры режимов СЛП.

3. Термическая обработка позволила увеличить среднее значение микротвердости по сравнению с образцами без термической обработки.

Список литературы

1. Григорьев С.Н. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом / С.Н. Григорьев, И.Ю. Смуров // Инновации, 2013. - № 10(180). - С. 76–82.
2. Синопальников В.А. Надежность и диагностика технологических систем: учеб. / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев // М.: МГТУ «Станкин»: Янус-К, 2003. – С. 331.
3. Григорьев С.Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента:

учеб.пособие / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова. // М.: МГТУ «Станкин»: Янус-К, 2007. – С. 342.

4. Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения / С.Н. Григорьев, А.С. Метель // М.: МГТУ «Станкин». «Янус-К», 2005. - С. 296 .
5. Yadroitsev I. Use of track/layer morphology to develop functional parts by selective laser melting/ I. Yadroitsev, P. Bertrand, G. Antonenkova, et al. // Journal of Laser Applications, 2013. - Vol. 25- P.1-7.
6. Grigoriev S.N. Use of track/layer morphology to develop functional parts by selective laser melting / S.N. Grigoriev, T.V. Tarasova, St. Nowotny// Journal of Laser Applications, 2013. - Vol. 25. - P.1-7.
7. Grigoriev S.N. Solidification behavior during laser microcladding of Al-Si-alloys / Grigoriev, T.V. Tarasova, G.O. Gvozdeva, St. Nowotny // Journal of Mechanical Engineering, 2014. - Vol.6. - P.389-394.
8. Тарасова Т.В. Структурообразование в заэвтектических сплавах системы Al-Si при лазерной обработке поверхностей / Т.В. Тарасова, Г.О. Гвоздева // Упрочняющие технологии и покрытия, 2012. - №12. - С.35-40.
9. Wang X.J. The effect of atmosphere on the structure and properties of as elective laser melted Al-12Si alloy / X.J. Wang, L.C. Zhang, M.H. Fang, T.B. Sercombe // Materials Science & Engineering, 2014. - Vol.597. - P.370-375.
10. Olakanmi E.O. Densification mechanism and microstructural evolution in selective laser sintering of Al-12Si powders / E.O. Olakanmi, R.F. Cochrane, K.W. Dalgarno // Journal of Materials Processing Technology, 2011. - Vol.211. - P. 113-121.
11. Louvis E. Selective laser melting of aluminium components / E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe // Journal of Materials Processing Technology, 2011. - Vol.211. - P. 275-284.
12. Kang N. Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting / N. Kang P. Coddet, H. Liao, T. Baur, C. Coddet // Applied Surface Science, 2016. -Vol.378. - P. 142-149.
13. Emani S. V. Double aging and thermomechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions /S.V. Emani, J. Benedyk, P. Nash, D. Chen // Journal of Materials Science, 2009. - Vol.44. - P. 6384-6391.
14. Григорьев С.Н. Модификация структуры и свойств быстрорежущей стали путем комбинированной вакуумно-плазменной обработки / С.Н. Григорьев, А.С. Метель, С.В. Федоров // Металловедение и термическая обработка металлов, 2012. - № 1. - С. 20-27.
15. Соболев О.В. Вакуумно-дуговые многослойные наноструктурные TiN/Ti покрытия: структура, напряженное состояние, свойства / О.В. Соболев, А.А. Андреев, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова. // Металловедение и термическая обработка металлов, 2012. - № 1. - С. 28-33.

References

1. Grigor'ev S.N., Smurov I.Y. Prospects for the Development of Innovative Additive Manufacturing in Russia and Abroad. Innovatsii, 2013, № 10(180), pp. 76-82.
2. Sinopal'nikov V.A., Grigor'ev S.N. Nanesenie pokrytii i poverkhnostnaia modifikatsiia instrumenta: ucheb.posobie. M.: MGTU «Stankin»: Ianus-K, 2007, pp. 342.
3. Grigor'ev S.N., Volosova M.A. Nanesenie pokrytii i poverkhnostnaia modifikatsiia instrumenta: ucheb.posobie. M.: MGTU «Stankin». «Ianus-K», 2007, pp. 342.
4. Grigor'ev S.N., Metel' A.S. Tleiushchii razriad s elektrostatcheskim uderzhanie elektronov: fizika, tekhnika, primeneniia. M.: MGTU «Stankin». «Ianus-K», 2005, pp. 296.
5. Yadroitsev I., Bertrand P., Antonenkova G., et al. Use of track/layer morphology to develop functional parts by selective laser melting. Journal of Laser Applications, 2013, Vol. 25, pp. 1-7.
6. Grigoriev S.N., Tarasova T.V., Nowotny St. Structure formation of hypereutectic Al-Si-alloys produced by laser surface treatment. Journal of Mechanical Engineering, 2014, Vol.6, pp. 389-394.
7. Grigoriev S.N., Tarasova T.V., Gvozdeva G.O., Nowotny St. Solidification behavior during laser microcladding of Al-Si-alloys. Surface and Coatings Technology, 2015, Vol.268, pp. 303-309.
8. Tarasova T.V., Gvozdeva G.O. Structure formation of Al-Si-alloys produced by laser surface treatment. Uprochniaushchie tekhnologii i pokrytiia, 2012, №12, pp. 35-40.
9. Wang X.J., Zhang L.C., Fang M.H., Sercombe T.B. The effect of atmosphere on the structure and properties of as elective laser melted Al-12Si alloy. Materials Science & Engineering, 2014, Vol.597, pp.370-375.
10. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. Densification mechanism and microstructural evolution in selective laser sintering of Al-12Si powders. Journal of Materials Processing Technology, 2011, Vol.211, pp. 113-121.
11. Louvis E., Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology, 2011, Vol.211, pp. 275-284.
12. Kang N., Coddet P., Liao H., Baur T., Coddet C. Wear behavior and microstructure of hypereutectic Al-Si alloys prepared by selective laser melting. Applied Surface Science, 2016, Vol.378, pp. 142-149.
13. Emani S. V., Benedyk J., Nash P., Chen D. Double aging and thermomechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions. Journal of Materials Science, 2009, Vol.44, pp. 6384-6391.
14. Sobol' O.V., Andreev A.A., Grigor'ev S.N., Volosova M.A. Vacuum-arc multilayer nanostructured TiN/Ti coatings: structure, stress state, properties. Metal Science and Heat Treatment, 2012, № 1, pp. 28-33.
15. Grigor'ev S.N., Metel' A.S., Fedorov S.V. Modification of the structure and properties of high-speed steel by combined vacuum-plasma treatment. Metal Science and Heat Treatment, 2012, № 1, pp. 20 -27.

УДК 621.833

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АРОЧНЫХ ПЕРЕДАЧ СМЕШАННОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ ИСХОДНОГО КОНТУРА ПО ГЕОМЕТРОКИНЕМАТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Е.Ю. Чалая¹¹Луганский государственный университет им. В. Даля, Луганск, Украина

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы, связанные с созданием арочных цилиндрических зубчатых передач смешанного зацепления с улучшенными показателями качества. Изложена методика синтеза геометрии исходного контура цилиндрической зубчатой передачи смешанного зацепления с круговой продольной линией зуба по заданной относительной приведенной кривизне. Исследовано влияние приведенной кривизны на геометрокинематические показатели работоспособности арочных передач и критерии нагрузочной способности. Путем синтеза, с учетом необходимых технологических ограничений, в пределах поля зацепления реек получены профили исходных контуров резцов резцовых головок для нарезания арочных передач.

Ключевые слова: арочная цилиндрическая зубчатая передача, смешанное зацепление, синтез, исходный контур, приведенная кривизна, геометрокинематические критерии работоспособности.

IMPROVEMENT OF ARCH CYLINDRICAL GEAR MIXED GEARING BY SYNTHESIS OF THE ORIGINAL CIRCUIT GEOMETRODYNAMICS CRITERIA

E.U Chalaya¹¹V. Dahl Luhansk State University, Lugansk, Lugansk, Ukraine

Abstract

The article considers the issues related to the creation of arch cylindrical gear mixed gearing with improved quality. Given the method of synthesis of the geometry of the original contour of the cylindrical gear of mixed engagement with a circular longitudinal line of the tooth at the given relative given curvature. Given the influence of the curvature on g geometric and kinematic health indicators arched gear and the criteria for load capacity. By synthesis without neglecting technological limitations, within the field of gear racks of the obtained profiles of the original contours of the cutters cutting heads for cutting arched gear.

Keywords: arch cylindrical gear mixed gearing, synthesis, the original contour, the curvature, geometric and kinematic health criteria.

Введение

Решающим фактором повышения нагрузочной способности зубчатых передач является синтез рациональной геометрии зацепления. Целью синтеза является обеспечение повышенных эксплуатационных показателей передачи (передаваемого крутящего момента, КПД, термической мощности), уровень которых зависит от многих факторов, в том числе, от геометрии зацепления.

Вопросам синтеза посвящено большое количество исследований в области зацеп-

лений [1-4], в том числе и для цилиндрических передач с арочной формой зубьев [6, 8, 9, 10]. В результате получено большое количество новых исходных контуров (ИК), реализующих новые виды зацепления [3]. Несмотря на их разнообразие, ни один из видов зацепления не приобрел широкого распространения, так как все они кроме неоспоримых преимуществ имеют и ряд недостатков.

Ввиду того, что традиционная система зацепления исчерпала возможности усовершенствования, весьма перспективным становится смешанное зацепление. Разумное

комбинирование кривых на головке и ножке зуба дает возможность получения новых исходных контуров, что в сочетании с арочной формой зуба ведет к усовершенствованию зубчатого зацепления в целом. Смешанное зацепление [11] более технологично и менее чувствительно к погрешностям изготовления и монтажа. Оно дает возможность дальнейшего улучшения показателей передачи.

Оценка качества передач зацеплением традиционно проводится по показателям нагрузочной способности, улучшение которых является основной задачей при проектировании геометрии рабочих поверхностей зацепляющихся пар. Аналитические зависимости для их определения получены для всех видов зацеплений [2, 4, 6, 9]. Однако в указанных работах арочные передачи смешанного зацепления не рассматриваются.

Результаты и обсуждение

Целью данного исследования является создание (путем синтеза по геометрокинематическим критериям) цилиндрических передач с арочными зубьями смешанного зацепления с улучшенными показателями качества. Задачи, решаемые в данной статье, являются актуальными и отвечают требованиям современного машиностроения.

Будем рассматривать цилиндрическую передачу смешанного зацепления с круговой продольной линией арочного зуба радиуса R_u (номинальный радиус резцовой головки). При этом функция f моделирует головку зуба, функция Φ – его ножку. В случае несимметричного исходного контура (ИК) функции f и Φ должны быть различными (рис. 1).

Работоспособность зубчатых передач оценивается группой геометрокинематических критериев, которые характеризуют локально-кинематические и гидродинамические явления в зоне контакта зубьев, нагрузочную способность передач.

К этим критериям относятся (индекс f – для головки зуба, Φ – для его ножки соответственно): V_{ckf} , $V_{ck\Phi}$ – относительная скорость скольжения рабочих поверхностей

зубьев; V_{if} , $V_{i\Phi}$ – скорости движения точки контакта по поверхности зубьев шестерни ($i=1$) и колеса ($i=2$); $V_{\Sigma f}$, $V_{\Sigma\Phi}$ – суммарная скорость качения рабочих поверхностей зубьев; χ_{npf} , $\chi_{np\Phi}$ – приведенная кривизна активных поверхностей зубьев; η_{if} , $\eta_{i\Phi}$ – удельные скольжения шестерни и колеса; ν – угол между вектором относительной скорости и направлением контактной линии.

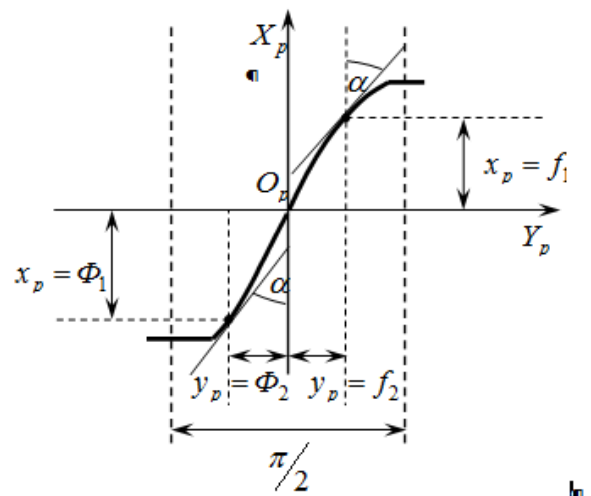


Рис. 1. Обобщенный исходный контур

Качество зацепления зубчатых передач оценивается комплексными критериями работоспособности [12-15], к которым относят: критерий контактной прочности Θ , критерий износа $h_{изi}$ рабочих поверхностей зубьев шестерни ($i=1$) и колеса ($i=2$), температурный критерий задания K_3 , критерий толщины масляного слоя $h_{мс}$, критерий удельной работы сил трения dA_{mpi} , критерий потерь на трении в зацеплении ψ_3 . Геометрокинематические показатели оказывают различное влияние на значения комплексных критериев работоспособности. Однако, для синтеза геометрии ИК критерий должен быть обоснованно выбран. Известно [8], что приведенная кривизна рабочих поверхностей зубьев оказывает существенное влияние на все комплексные критерии (кроме критерия изгибной прочности).

Приведенная кривизна (соответственно для головки и ножки) определяется следующим образом [8]:

$$\chi_{npf} = \frac{f_2' \tau_f^2}{n_f^3} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{\left(R_2 - \frac{f_1 \Delta_f}{f_2'}\right) \left(R_1 + \frac{f_1 \Delta_f}{f_2'}\right)},$$

$$\chi_{np\phi} = \frac{\Phi_2' \tau_\phi^2}{n_\phi^3} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{\left(R_2 - \frac{\Phi_1 \Delta_\phi}{\Phi_2'}\right) \left(R_1 + \frac{\Phi_1 \Delta_\phi}{\Phi_2'}\right)}. \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения: R_1, R_2 – радиусы начальных цилиндров шестерни и колеса, а также:

$$\tau_f = \sqrt{n_f^2 \sin^2 \mu (1 + \Omega_{1f} K_{nf})^2 + (\Omega_{2f}')^2 \cos^2 \mu},$$

$$\tau_\phi = \sqrt{n_\phi^2 \sin^2 \mu (1 + \Omega_{1\phi} K_{n\phi})^2 + (\Omega_{2\phi}')^2 \cos^2 \mu}, \quad (2)$$

$$\Delta_f = \Omega_{2f}' \cos^2 \mu + f_2' (1 + \Omega_{1f} K_{nf}) \sin^2 \mu,$$

$$\Delta_\phi = \Omega_{2\phi}' \cos^2 \mu + \Phi_2' (1 + \Omega_{1\phi} K_{n\phi}) \sin^2 \mu.$$

Кроме того, вспомогательные обозначения:

$$n_f = \sqrt{(f_1')^2 + (f_2')^2}, \quad n_\phi = \sqrt{(\Phi_1')^2 + (\Phi_2')^2},$$

$$\Omega_{1f} = \frac{f_1 f_1'}{f_2'}, \quad \Omega_{1\phi} = \frac{\Phi_1 \Phi_1'}{\Phi_2'},$$

$$\Omega_{2f}' = \Omega_{1f} + f_2, \quad \Omega_{2\phi}' = \Omega_{1\phi} + \Phi_2.$$

Через μ обозначен текущий угол наклона зубьев рейки. Из формул (1) видно, что на величину кривизны оказывают влияние геометрические размеры передачи и зуборезной головки, а также функции f_1, f_2, Φ_1, Φ_2 , определяющие исходный контур производящей поверхности.

Проанализируем влияние приведенной кривизны на геометрокинематические показатели, выразив их через критерий χ_{np} . Полагаем, что имеет место условие [7, 88] (для головки и ножки зуба соответственно):

$$R_i \gg \frac{f_1}{f_2'} \left[\Omega_{2f}' \cos^2 \mu + f_2' \left(1 - \frac{\Omega_{1f}}{R_u - f_2} \right) \right],$$

$$R_i \gg \frac{\Phi_1}{\Phi_2'} \left[\Omega_{2\phi}' \cos^2 \mu + \Phi_2' \left(1 - \frac{\Omega_{1\phi}}{R_u - \Phi_2} \right) \right]. \quad (3)$$

Используя аналитические зависимости для геометрокинематических критериев [7, 8], а также условие (3), получаем для головки и ножки соответственно:

– скорости качения сопряженных поверхностей зубьев:

$$V_{1f} = \frac{f_2' (R_1 + R_2)}{\chi_{npf} n_f^2 R_2}, \quad V_{1\phi} = \frac{\Phi_2' (R_1 + R_2)}{\chi_{np\phi} n_\phi^2 R_2},$$

$$V_{2f} = \frac{f_2' (R_1 + R_2)}{\chi_{npf} n_f^2 R_1}, \quad V_{2\phi} = \frac{\Phi_2' (R_1 + R_2)}{\chi_{np\phi} n_\phi^2 R_1};$$

– суммарную скорость качения рабочих поверхностей зубьев:

$$V_{\Sigma f} = \frac{2 f_2' (R_1 + R_2)}{\chi_{npf} n_f^2 R_2}, \quad V_{\Sigma \phi} = \frac{2 \Phi_2' (R_1 + R_2)}{\chi_{np\phi} n_\phi^2 R_2};$$

– удельные скольжения шестерни ($i=1$) и колеса ($i=2$):

$$\eta_{if} = \pm \frac{u}{u+1} \cdot \frac{f_1 \cos \mu}{R_i f_2'} \cdot \sqrt{\frac{\chi_{npf} R_1 R_2 n_f^3}{(R_1 + R_2) f_2'}},$$

$$\eta_{i\phi} = \pm \frac{u}{u+1} \cdot \frac{\Phi_1 \cos \mu}{R_i \Phi_2'} \cdot \sqrt{\frac{\chi_{np\phi} R_1 R_2 n_\phi^3}{(R_1 + R_2) \Phi_2'}}.$$

Из последних соотношений видно, что при уменьшении приведенной кривизны скорости качения и суммарная скорость увеличиваются при прочих равных условиях, что благоприятно сказывается на всех комплексных критериях работоспособности передач. Удельные скольжения при уменьшении χ_{np} также уменьшаются, что уменьшает износ зубьев и удельную работу сил трения.

Оценка контактной прочности зубчатых цилиндрических передач производится по формуле Герца [12], откуда допускаемая нагрузка равна:

$$[q_n] = \left(\frac{\sigma_H}{0,418} \right)^2 \cdot \frac{1}{E_{np} \chi_{np}}.$$

Таким образом, допускаемая контактная нагрузка обратно пропорциональна приведенной кривизне. Чем меньше ее значение, тем более высокой нагрузочной способностью обладают зубчатые передачи.

Из проведенного исследования вытекает, что уменьшение приведенной кривизны положительно влияет на значение всех кри-

териев работоспособности переда с круговыми зубьями. Поэтому, в основу синтеза геометрии арочных зубьев усовершенствованных передач следует положить ее синтез по заданной приведенной кривизне, обеспечивая наименьшее ее значение в пределах поля зацепления с учетом требований к коэффициенту профильного перекрытия и заострения зубьев. При этом целесообразно перейти к относительной приведенной кривизне:

$$\bar{\chi}_{np} = \frac{\chi_{np} R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Для эвольвентных колес в полюсе зацепления, т.е. при $\mu=0$, $f_1=0$ равенства (1) дают значение относительной приведенной кривизны:

$$\bar{\chi}_{np} = 1/\sin \alpha_n \cong 3,$$

где α_n – профильный угол инструмента. Это значение не зависит от исходного режущего контура. Отсюда следует, что для обеспечения более высокой по сравнению с эвольвентными нагрузочной способности по контактным напряжениям передач с арочными зубьями при их синтезе по относительной кривизне следует задавать ее значения $\bar{\chi}_{np} < 3$ в пределах всего поля зацепления.

Будем учитывать ограничения для независимых переменных, функций и их производных (для головки и ножки соответственно):

$$\begin{aligned} -1 \leq \Phi_1 < 0, \quad 0 \leq f_1 \leq 1, \\ f_2 = f_1 \operatorname{tg} \alpha, \quad \Phi_2 = \Phi_1 \operatorname{tg} \alpha, \\ f_2'(f_1) = \operatorname{tg} \alpha, \quad \Phi_2'(\Phi_1) = \operatorname{tg} \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

После введения в формулах (1) специальной замены $f_2'(f_1) = \operatorname{tg} \alpha$, $f_1' = 1$, $f_1'' = 0$ для головки зуба, а также соответственно $\Phi_2'(\Phi_1) = \operatorname{tg} \alpha$, $\Phi_1' = 1$, $\Phi_1'' = 0$ для его ножки, и используя обозначение $\xi = \sin \alpha$, после преобразований получаем, что соотношения (1) превращаются в дифференциальные уравнения относительно ξ' , которые позволяют определить функции $f_2(f_1)$ и $\Phi_2(\Phi_1)$ по заданной приведенной кривизне:

$$A_{\chi f} (\xi')^2 + B_{\chi f} \xi' + C_{\chi f} = 0, \quad (5)$$

$$A_{\chi \Phi} (\xi')^2 + B_{\chi \Phi} \xi' + C_{\chi \Phi} = 0.$$

Здесь ξ' – это производная функции ξ по f_1 (для головки зуба) или по Φ_1 (для ножки зуба). Если принять вспомогательные обозначения (для головки и ножки соответственно):

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\chi f} = f_1^2 \xi^3, \quad \bar{B}_{\chi f} = f_1 \xi^4, \quad \bar{C}_{\chi f} = f_1^2 \xi^2, \\ \bar{A}_{\chi \Phi} = \Phi_1^2 \xi^3, \quad \bar{B}_{\chi \Phi} = \Phi_1 \xi^4, \quad \bar{C}_{\chi \Phi} = \Phi_1^2 \xi^2, \\ b_1 = \frac{u-1}{uR_1}, \quad b_2 = \frac{1}{uR_1^2} \end{aligned} \quad (6)$$

тогда коэффициенты дифференциальных уравнений (5) будут иметь вид (для головки и ножки соответственно):

$$\begin{aligned} A_{\chi f} &= \bar{A}_{\chi f} + \bar{\chi}_{np f} b_2 f_1^4, \\ B_{\chi f} &= -2\bar{B}_{\chi f} - \bar{\chi}_{np f} (2 f_1^3 \xi b_2 - \bar{A}_{\chi f} b_1), \\ C_{\chi f} &= \xi^5 - \bar{\chi}_{np f} (\xi^6 + \bar{B}_{\chi f} b_1 - \bar{C}_{\chi f} b_2), \\ A_{\chi \Phi} &= \bar{A}_{\chi \Phi} + \bar{\chi}_{np \Phi} b_2 \Phi_1^4, \\ B_{\chi \Phi} &= -2\bar{B}_{\chi \Phi} - \bar{\chi}_{np \Phi} (2 \Phi_1^3 \xi b_2 - \bar{A}_{\chi \Phi} b_1), \\ C_{\chi \Phi} &= \xi^5 - \bar{\chi}_{np \Phi} (\xi^6 + \bar{B}_{\chi \Phi} b_1 - \bar{C}_{\chi \Phi} b_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Решение дифференциальных уравнений (5) можно представлять в виде степенных рядов (для головки и ножки зуба соответственно):

$$\xi_f = a_0 + a_1 (f_1 - f_0) + \frac{a_2}{2} (f_1 - f_0)^2 + \dots, \quad (8)$$

$$\xi_\Phi = a_0 + a_1 (\Phi_1 - \Phi_0) + \frac{a_2}{2} (\Phi_1 - \Phi_0)^2 + \dots$$

Функция ξ_f соответствует головке зуба, а ξ_Φ – его ножке. В равенствах (8) f_0 – это значение переменной f_1 в точке, в окрестности которой функция ξ_f раскладывается в ряд; Φ_0 – это значение переменной Φ_1 в точке, в окрестности которой функция ξ_Φ раскладывается в ряд. Коэффициенты рядов (8) представляют собой значения функций ξ_f и ξ_Φ , а также первых трех производных в точке f_0 (для головки), Φ_0 (для ножки) соответственно. Они определяются следующим образом:

$$a_0 = \sin \alpha_0 = \xi_0, \quad a_1 = \xi'_0, \quad a_2 = \xi''_0, \quad a_3 = \xi'''_0.$$

Здесь α_0 – угол профиля нормального сечения зубьев режущего инструмента (исходного контура). Значения f_0 и ξ_0 нужно задать. В результате последовательного дифференцирования левой части уравнений (5) коэффициенты степенных рядов (8) будут равны:

1) для головки зуба:

$$a_0 = \xi_0 = \sin \alpha_0,$$

$$a_1 = \xi'_0 = \frac{-B_{\chi f} \pm \sqrt{B_{\chi f}^2 - 4A_{\chi f}C_{\chi f}}}{2A_{\chi f}},$$

$$a_2 = \xi''_0 = -\frac{A'_{\chi f} a_1^2 + B'_{\chi f} a_1 + C'_{\chi f}}{2A_{\chi f} a_1 + B_{\chi f}};$$

2) для ножки зуба:

$$a_0 = \xi_0 = \sin \alpha_0,$$

$$a_1 = \xi'_0 = \frac{-B_{\chi \phi} \pm \sqrt{B_{\chi \phi}^2 - 4A_{\chi \phi}C_{\chi \phi}}}{2A_{\chi \phi}},$$

$$a_2 = \xi''_0 = -\frac{A'_{\chi \phi} a_1^2 + B'_{\chi \phi} a_1 + C'_{\chi \phi}}{2A_{\chi \phi} a_1 + B_{\chi \phi}}.$$

При построении этих формул использовались производные вспомогательных коэффициентов (6) по f_1 (для головки зуба) или по Φ_1 (для ножки зуба), а также производные коэффициентов дифференциальных уравнений (5). При синтезе исходного контура по относительной приведенной кривизне $\bar{\chi}_{np f} = \text{const}$ и $\bar{\chi}_{np \phi} = \text{const}$, поэтому $\bar{\chi}'_{np f} = 0$ и $\bar{\chi}'_{np \phi} = 0$.

Таким образом, решения ξ_f и ξ_ϕ уравнений (5) представлены в виде степенных рядов (8). Тогда функции $f_2(f_1)$ и $\Phi_2(\Phi_1)$, определяющие решения дифференциальных уравнений соответственно для головки и ножки зуба:

$$f'_2 = \frac{\xi_f}{\sqrt{1 - \xi_f^2}}, \quad \Phi'_2 = \frac{\xi_\phi}{\sqrt{1 - \xi_\phi^2}} \quad (9)$$

Решения уравнений (9) также представим в виде степенных рядов (для головки и ножки соответственно):

$$f_2 = f_{20} + f'_{20}(f_1 - f_0) + \frac{f''_{20}}{2}(f_1 - f_0)^2 + \dots, \quad (10)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{20} + \Phi'_{20}(\Phi_1 - \Phi_0) + \frac{\Phi''_{20}}{2}(\Phi_1 - \Phi_0)^2 \dots$$

Здесь имеют место обозначения для головки зуба: $f_{20}, f'_{20}, f''_{20}$ – значение функции f_2 и ее первых двух производных при $f_1 = f_0$, причем начальное значение f_{20} функции f_2 должно быть задано. Аналогично – для ножки зуба.

Тогда, используя равенства (10), получим формулы для нахождения этих производных (для головки и ножки соответственно):

$$f'_{20} = \frac{a_0}{\sqrt{1 - a_0^2}}, \quad f''_{20} = \frac{a_1}{\left(\sqrt{1 - a_0^2}\right)^3}, \dots \quad (11)$$

$$\Phi'_{20} = \frac{a_0}{\sqrt{1 - a_0^2}}, \quad \Phi''_{20} = \frac{a_1}{\left(\sqrt{1 - a_0^2}\right)^3}, \dots$$

где a_0, a_1, a_2 – значения коэффициентов степенных рядов (8), взятые соответственно для головки и ножки зуба.

Таким образом, будут определены функции, описывающие профиль исходного контура. При этом их комбинация должна отвечать всем технологическим требованиям. В частности, необходимо обеспечить профильный коэффициент перекрытия передачи $\varepsilon_\mu \geq 1,2$ и толщину вершин зубьев $S_a \geq 0,35 \dots 0,4$ [5, 7].

По изложенной методике при $\bar{\chi}_{np} = \text{const}$ в пределах поля зацепления реек были синтезированы профили исходных контуров резцов резцовых головок для нарезания арочных зубьев. Были приняты исходные данные (табл. 1), необходимые для обеспечения улучшенных показателей работоспособности синтезированных передач по сравнению с эвольвентными передачами.

Таблица 1. Исходные данные для синтеза

Радиусы начальных цилиндров шестерни и колеса	$R_1 = R_2 = 5$
Модуль в среднем нормальном сечении	$m_n = 1 \text{ мм}$
Количество зубьев шестерни и колеса	$z_1 = z_2 = 10$
Угол, соответствующий среднему сечению арки	$\mu = 0$
Приведенная кривизна	$\bar{\chi}_{np} = 0,7; 1,5; 2,9$
Границы для независимых переменных	$-1 \leq \Phi_1 < 0,$ $0 \leq f_1 \leq 1$
Коэффициент профильного перекрытия при $\mu = 0$	$\varepsilon \geq 1,2$
Толщина вершин зубьев рейки	$S_{a0} \geq 0,6$

На рис. 2 приведены кривые, полученные при решении дифференциальных уравнений (5) с использованием разложений в степенные ряды (10), учитывая ограничения (4).

Полученные кривые могут быть использованы в качестве исходных контуров резцов при нарезании арочных зубьев.

Для проведения сравнительного анализа комплексных критериев работоспособности рассматривались передачи с арочной формой зуба: 1) квазиэвольвентные (в качестве традиционных), зубья которых нарезаны резцами с прямолинейными режущими кромками с профильным углом $\alpha = 20^\circ$; 2) синтезированные, зубья которых нарезаны резцами, спрофилированными исходным контуром №1 (рис. 2). Геометрические параметры, материал, термическая обработка всех анализируемых передач одинаковые.

Результаты сравнительного анализа в относительных величинах приведены в табл. 2. Значения критерии работоспособности синтезированных передач отмечены индексом «с», эвольвентных – «э».

Примечание. В графе h_{mc} указано отношение значений критериев синтезированной передачи к значениям критериев квазиэвольвентной передачи.

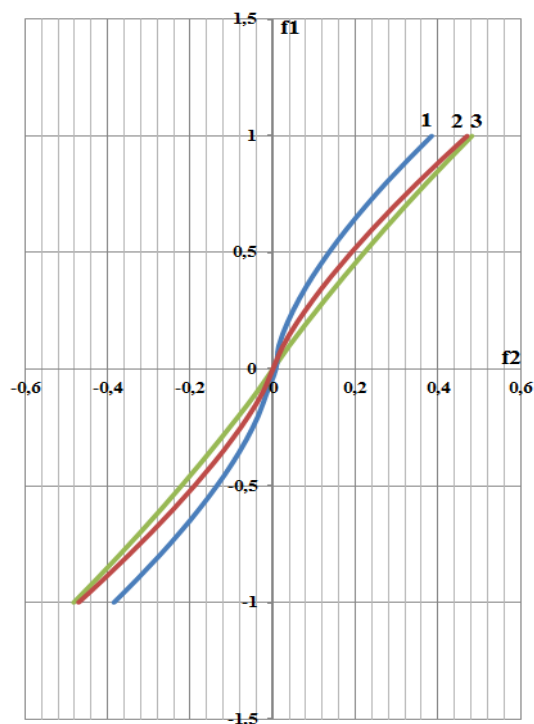


Рис. 2. Профили синтезированных ИК в зависимости от значений приведенной кривизны: 1 – для $\bar{\chi}_{np} = 0,7$; 2 – для $\bar{\chi}_{np} = 1,5$; 3 – для $\bar{\chi}_{np} = 2,9$

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа

Отношения значений критериев	Область поля зацепления		
	Вершина зуба шестерни	Околополюсная зона ($f_1 = \pm 0,05$)	Вершина зуба колеса
$\frac{K_{3э}}{K_{3с}}$	2,1	1	3,7
$\frac{h_{u31э}}{h_{u31с}}$	4,5	1	6,4
$\frac{h_{u32э}}{h_{u32с}}$	8,4	1	12,2
$\frac{h_{mcс}}{h_{mcэ}}$	2,7	1	6,1
$\frac{\Psi_{3э}}{\Psi_{3с}}$	2,3	1	3,3
$\frac{dA_{mp1э}}{dA_{mp1с}}$	3,1	1	15,6
$\frac{dA_{mp2э}}{dA_{mp2с}}$	7,1	1	8,3

Анализируя полученные результаты (табл. 2), можно сделать вывод о том, что критерии работоспособности синтезирован-

ных передач существенно выше критериев эвольвентных передач. При приближении к полюсной линии значения критериев работоспособности всех передач отличаются друг от друга в меньшей мере, а на полюсной линии они равны между собой. Таким образом, синтезированная передача имеет значительные преимущества по нагрузочной способности в сравнении с квазиэвольвентными передачами в пределах поля зацепления.

Выводы

1. Исследовано влияние относительной приведенной кривизны рабочих поверхностей зубьев на основные критерии работоспособности цилиндрических арочных передач смешанного зацепления, в результате чего получено обоснование целесообразности синтеза по приведенной кривизне.

2. Изложен алгоритм синтеза цилиндрических зубчатых передач смешанного зацепления с круговой продольной линией зуба.

3. На основании разработанных рекомендаций синтезированы симметричные исходные инструментальные контуры, которые могут быть использованы при проектировании новых арочных зубчатых передач смешанного зацепления, нарезаемых круговыми резцовыми головками, а также при анализе показателей работоспособности арочных передач смешанного зацепления с круговыми зубьями.

4. Основываясь на результатах проведенного сравнительного анализа, делаем вывод о том, что синтезированные передачи обладают повышенной нагрузочной способностью по сравнению с традиционными передачами.

Список литературы

1. Кіндрацький Б., Сулим І. Сучасний стан і проблеми багатокритеріального синтезу машинобудівних конструкцій (огляд) // *Машинознавство* – Львів, 2002. – №10(64). – С.26-40.
2. Вулгаков Э.В. Зубчатые передачи с улучшенными свойствами. – М.: Машиностроение. 1974. – 264 с.
3. Сидоренко А.К. Новые виды зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1990. – 128с.

4. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1958. – 186 с.
5. Шишов В.П. Теория, математическое обеспечение и реализация синтеза высоконагруженных передач зацеплением для промышленного транспорта: дис. ... докт. техн. наук. – Луганск, 1994. – 525с.
6. Шишов В.П., Филь П.В., Ревякина О.А., Муховатый А.А. Геометрокинематические показатели цилиндрических зубчатых передач с арочными зубьями // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. Сб. научн. работ. – Луганск, Изд. ВНУ, 2001. – с. 193-200.
7. Шишов В.П., Носко П.Л., Ткач П.Н., Филь П.В. Високонавантажені циліндричні передачі з двоопукло-ввігнутими зубцями. СНУ ім. В.Даля, Луганськ, 2005.
8. Шишов В.П., Носко П.Л., Ревякина О.А. Цилиндрические передачи с арочными зубьями (теория, анализ, синтез): Монография. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2004. – 336с.
9. Малый Д.В. Повышение технического уровня арочных цилиндрических передач с зацеплением Новикова многокритериальным геометрокинематическим синтезом: дис. ... канд. техн. наук. – Луганск, 2004. – 180 с.
10. Плахтин В.Д., Паршин А.Н. Синтез зацепления цилиндрических зубчатых колес с арочными бочкообразными зубьями // *Технология машиностроения*. – 2007. - №2. – с.46-53.
11. Журавлев Г.А. Зубчатая передача точечного или смешанного зацепления // Патент РФ № 1075041, 5F 16H 55/08, 26.12.1980, Б.И. №7, 1984.
12. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
13. Трение, изнашивание, смазка. Справочник в 2-х кн. // Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Аликина. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн.1 – 400с., 1979. – Кн.2 – 338с.
14. Кудрявцев В.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1980. – 464с.
15. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.

References

1. Kindrats'kii B., Sulim I. Suchasni stan i problemi bagatokriterial'nogo sintezu mashinobudivnikh konstruktsii (oglyad) // *Mashinoznnavstvo* – L'viv, 2002. – №10(64). – p.26-40.
2. Vulgakov E.V. Zubchatye peredachi s uluchshennymi svoistvami. – M.: Mashinostroenie. 1974. – 264 p.
3. Sidorenko A.K. Novye vidy zubchatykh peredach. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 128 p.
4. Novikov M.L. Zubchatye peredachi s novym zatsepleniem. – M.: VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1958. – 186 p.

5. Shishov V.P. Teoriia, matematicheskoe obespechenie i realizatsiia sinteza vysokonagruzhennykh peredach zatsepleniem dlia promyshlennogo transporta: dis. ... dokt. tekhn. nauk. – Lugansk, 1994. – 525 p.
6. Shishov V.P., Fil' P.V., Reviakina O.A., Mukhovaty A.A. Geometrokinematicheskie pokazateli tsilindricheskikh zubchatykh peredach s arochnymi zub'iami // Resursoberegaiushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii. Sb. nauchn. rabot. – Lugansk, Izd. VNU, 2001. – p. 193-200.
7. Shishov V.P., Nosko P.L., Tkach P.N., Fil' P.V. Visokonavantazheni tsilindrichni peredachi z dvoopuklo-vvignutimi zubtsiami. SNU im. V.Dalia, Lugansk, 2005.
8. Shishov V.P., Nosko P.L., Reviakina O.A. Tsilindricheskie peredachi s arochnymi zub'iami (teoriia, analiz, sintez): Monografiia. – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalia, 2004. – 336p.
9. Malyi D.V. Povyshenie tekhnicheskogo urovnia arochnykh tsilindricheskikh peredach s zatsepleniem Novikova mnogokriterial'nym geometrokinematicheskim sintezom: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Lugansk, 2004. – 180 p.
10. Plakhtin V.D., Parshin A.N. Sintez zatsepleniia tsilindricheskikh zubchatykh koles s arochnymi bochkobraznymi zub'iami // Tekhnologiia mashinostroeniia. – 2007. - №2. – p.46-53.
11. Zhuravlev G.A. Zubchataia peredacha tochechnogo ili smeshannogo zatsepleniia // Patent RF № 1075041, 5F 16N 55/08, 26.12.1980, B.I. №7, 1984.
12. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriia uprugosti. – M.: Nauka, 1979. – 560 p.
13. Trenie, iznashivanie, smazka. Spravochnik v 2-kh kn. // Pod red. I.V. Kragel'skogo i V.V. Alisina. – M.: Mashinostroenie, 1978. – Kn.1 – 400 p., 1979. – Kn.2 – 338 p.
14. Kudriavtsev V.N. Detali mashin. M.: Mashinostroenie, 1980. – 464 p.
15. Kodnir D.S. Kontaktnaia gidrodinamika smazki detalei mashin. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 304 p.

УДК 669.71-408-048.35

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

А.Р. Шамиева¹, Ю.Ф. Иванов^{1,2}, И.В. Лопатин²¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Российская федерация²ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская федерация

Аннотация

Осуществлена комбинированная обработка технически чистого алюминия марки А7, заключающаяся в азотировании в плазме газового разряда низкого давления системы пленка (сплав 12Х18Н10Т, 0,5 мкм)/(А7) подложка, подвергнутой предварительному облучению интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Представлены результаты, полученные при исследовании фазового и элементного состава, дефектной субструктуры поверхности технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей напыление металлической пленки, электронно-пучковое перемешивание системы пленка/подложка и последующее азотирование в плазме газового разряда низкого давления. Выполнен анализ закономерностей, выявлены режимы воздействия, позволяющиекратно повышать микротвердость и износостойкость материала.

Ключевые слова: модифицирование, азотирование, электронный пучок, износостойкость, твердость.

DEVELOPMENT OF THE COMBINED METHOD MODIFICATION OF SURFACE OF TECHNICALLY PURE ALUMINIUM

A.R. Shamieva¹, Yu.F. Ivanov^{1,2}, I.V. Lopatin²¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation²Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

Abstract

Performed the combined processing of technically pure aluminum of the А7 consisting in nitriding in plasma of the gas category of low pressure of system film (alloy 12Х18Н10Т, 0,5 μm) / (А7) substrate, subjected to preliminary radiation by an intensive pulse electron beam of sub millisecond duration of influence. The results are presented, received at research of phase and elemental composition, defective substructure of surface technically pure aluminium of the А7, subjected to the combined processing combining spraying metal film, electron-beam mixing of system film / substrate and subsequent nitriding in plasma of the gas discharge of low pressure. The analysis of regularities is made, revealed the modes of influence allowing multiple to raise a microhardness and wear resistance of material.

Keywords: modification, nitriding, electron beam, wear resistance, hardness.

Для повышения долговечности, надежности и стойкости деталей машин и механизмов в агрессивных средах, при трении скольжения под большими давлениями в присутствии абразивных частиц оказывается целесообразным и достаточным упрочнять лишь поверхностные слои, а не всю деталь в целом [1-3].

Алюминий и его сплавы широко используются в промышленности благодаря

достаточно большой удельной прочности, удовлетворительной коррозионной стойкости и хорошей обрабатываемости механическими методами [4]. Однако наряду с этими преимуществами алюминий обладает малой твердостью и невысокой износостойкостью. Диффузное насыщение поверхности алюминия ионами азота позволяет в той или иной мере минимизировать эти недостатки [5].

Комбинированные технологии модифицирования поверхности металлов и сплавов

получили широкое развитие в последние десятилетия. К наиболее перспективным из них следует отнести электронно-ионно-плазменные технологии, сочетающие воздействие различных видов концентрированных потоков энергии (потоки плазмы, электронные и ионные пучки, и т.д.) [6-7].

Для реализации процесса азотирования алюминия необходимо решить ряд специфических проблем. Во-первых, сократить длительность процесса азотирования, так как высокотемпературное азотирование сопровождается существенным понижением твердости диффузионного слоя и детали в целом. Во-вторых, необходима эффективная очистка поверхности в процессе азотирования, так как на поверхности алюминия и его сплавов присутствует оксидная пленка, препятствующая поступлению азота на обрабатываемую поверхность. В-третьих, необходимо формирование на поверхности образца пленки нитрида алюминия, которая препятствует поступлению азота вглубь образца и не позволяет сформировать протяженные упрочненные слои [8].

Одним из направлений решения указанных проблем является разработка методов азотирования в плазме газового (дугового) разряда низкого давления [9]. В этом подходе налетающий поток плазмы позволяет распылять тонкий поверхностный слой, интенсифицируя процесс проникновения азота в объем образца. Проблема, затрудняющая развитие данного подхода, – нитрид алюминия, являясь диэлектриком, осложняет подачу потенциала на обрабатываемое изделие в процессе ионного азотирования. Наличие диэлектрической пленки на азотируемой поверхности приводит к тому, что заряд ионов не может стекать во внешнюю цепь и накапливается на поверхности, что приводит к электрическому пробое пленки нитрида алюминия и ее разрушению с образованием катодного пятна на обрабатываемой поверхности. Для преодоления указанной проблемы в настоящей работе на поверхность образцов алюминия перед азотированием напыляли тонкий слой сплава 12Х18Н10Т. После напыления часть образцов (система пленка/подложка) облучалась интенсивным

электронным пучком для сплавления пленки в подложку.

Целью настоящей работы является разработка комбинированного метода модифицирования поверхности технически чистого алюминия, заключающегося в облучении электронным пучком системы «пленка (сталь 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» и последующем азотировании в плазме газового разряда низкого давления.

В качестве модифицируемого материала использовали технически чистый алюминий марки А7 (0,16 Fe, 0,15 Si, 0,04 Zn, 0,01 Cu, 0,01 Ti, остальное Al, вес. %) [10]. Комбинированная обработка алюминия заключалась в следующем. На первом этапе на поверхность алюминия напыляли пленку сплава 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мкм. Формирование пленки проводили на модернизированной установке ионно-плазменного напыления «Квинта» [11-14]. На втором этапе сформированную таким образом систему «пленка (сплав 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» облучали интенсивным импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [15]. На заключительном этапе осуществляли азотирование модифицированной поверхности алюминия на установке ННВ-6.6-И1, дооснащенной плазмогенератором ПИНК. На образцы подавалось импульсное отрицательное смещение с частотой 50 кГц и регулируемой амплитудой и коэффициентом заполнения импульса. Температура азотирования (540 °С) измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары, укрепленной на держателе образцов. В качестве плазмообразующего газа использовался азот. Длительность азотирования – 8 час.

Механические испытания модифицированной поверхности осуществляли, определяя микротвердость (прибор ПМТ-3, метод Виккерса), нанотвердость и модуль Юнга (ультрамикротвердомер Shimadzu DUN-211S). Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре «CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142», CSEM Instruments, Швейцария; скорость износа оценивали по площади поперечного сечения трека износа, используя 3D-профилометр MICRO

MEASURE 3D station французской фирмы STIL. Дефектную структуру материала изучали методами оптической (микроскоп «Микровизор металлографический μ Vizo - MET-221»), сканирующей (сканирующий электронный микроскоп "SEM-515 Philips") и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F JEOL) электронной микроскопии. Элементный состав поверхностного слоя определяли методами микрорентгено-спектрального анализа (микроанализатор EDAX ECON IV, являющийся приставкой к электронному сканирующему микроскопу SEM-515 «Philips»). Анализ фазового состава, состояния кристаллической решетки, величины микронапряжений, размера областей когерентного рассеяния поверхностного слоя выполняли методами дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония).

Выполнены исследования структуры поверхности образцов технически чистого алюминия, подвергнутых комбинированной обработке. Выявлено формирование островковой структуры с размерами островков до 5 мкм (рис. 1, а). Размеры субструктуры островков изменяются в пределах от 100 нм до 500 нм (рис. 1, б). Основной причиной формирования островковой структуры при азотировании в плазме газового разряда низкого давления является бомбардировка поверхности материала ионами плазмы, что сопровождается растравливанием поверхностного слоя образца.

Исследования фазового состава модифицированного слоя алюминия, выполненные методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, позволили выявить в поверхностном слое многофазное состояние, основными фазами которого являются нитрид алюминия AlN (≈ 75 мас.%) и алюминий. Показано, что в слое, прилегающем к поверхности модифицирования, размеры частиц второй фазы 100-250 нм. При удалении от поверхности модифицирования на расстояние 5-10 мкм выявляются области, содержащие частицы нитрида алюминия, размеры которых 2-5 нм.

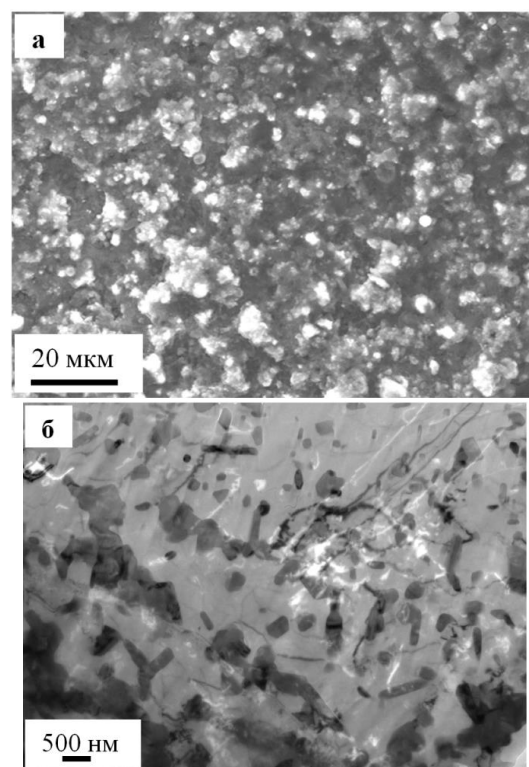


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности (а) и приповерхностного слоя (б) технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комбинированной обработке; а – сканирующая электронная микроскопия; б – просвечивающая дифракционная электронная микроскопия

После проведения механических испытаний, видно, что твердость модифицированных образцов максимальна на поверхности (в слое толщиной ≈ 5 мкм) и монотонно убывает по мере удаления от поверхности обработки. Твердость модифицированного слоя существенным образом зависит от режима облучения системы пленка/подложка интенсивным импульсным электронным пучком. Облучение электронным пучком с параметрами 16 кэВ, 30 Дж/см², 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 10 имп. позволило повысить твердость образцов технически чистого алюминия марки А7 в 7 раз (рис. 2, кривая 1).

Анализ результатов трибологических испытаний, показывает, что износостойкость модифицированного слоя существенным образом зависит от режима модифицирования материала.

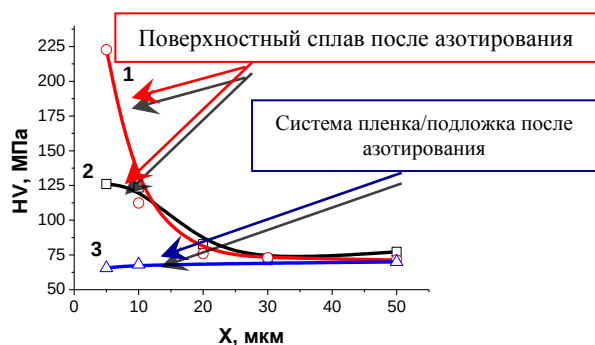


Рис. 2. Зависимость нанотвердости от расстояния до поверхности азотирования технически чистого алюминия А7; кривая 1 – напыление пленки 0,5 мкм стали 12Х18Н10Т + облучение электронным пучком (16 кэВ, 30 Дж/см², 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 10 имп.) + азотирование в плазме газового разряда; кривая 2 – напыление пленки 0,5 мкм стали 12Х18Н10Т + облучение электронным пучком (16 кэВ, 30 Дж/см², 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 20 имп.) + азотирование; кривая 3 – напыление пленки 0,5 мкм стали 12Х18Н10Т + азотирование в плазме газового разряда

Выявлен режим модифицирования (напыление пленки нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 0,5 мкм, облучение системы «пленка (сталь 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, азотирование сформированного поверхностного сплава в плазме газового разряда – режим облучения № 3 (табл. 1)), позволяющий повысить износостойкость образцов технически чистого алюминия А7 в ≈ 9 раз; при этом коэффициент трения снижается в $\approx 1,3$ раза.

Таблица 1. Результаты трибологических испытаний технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комплексному модифицированию

Состояние материала*	μ	$V, 10^{-3}, \text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$
Исходный А7	0,59	9,0
1	0,56	9,0
2	0,45	1,9
3	0,47	1,0

* 1 – система «пленка (сталь 12Х18Н10Т) / (А7) подложка»;

2 – система «пленка (сталь 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» после азотирования (температура 540 °С, ток 120 А, напряжение 250 В, давление газа 0,9 Па);

3 – система «пленка (сталь 12Х18Н10Т) / (А7) подложка» после облучения электронным пучком (16 кэВ, 30 Дж/см², 200 мкс, 0,3 с⁻¹, 20 имп.) и азотирования (температура 540 °С (8 час.), ток 120 А, напряжение 250 В, давление газа 0,9 Па).

Выполненные, методами рентгеноструктурного анализа, исследования фазового состава модифицированного слоя, выявили формирование многофазного состояния, представленного алюминием, нитридом алюминия AlN и α -Fe (Cr, Al) (рис. 3).

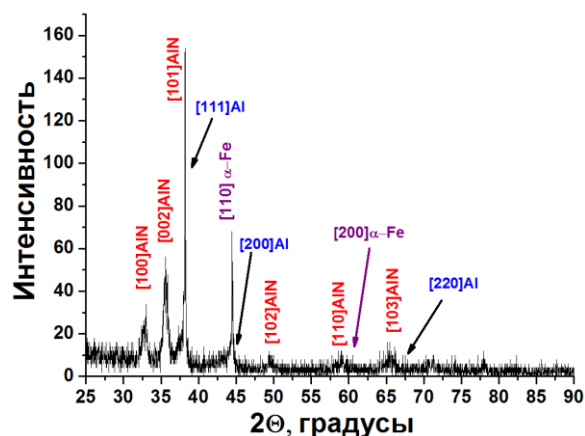


Рис. 3. Участок рентгенограммы, полученной с поверхностного слоя образцов технически чистого алюминия А7, подвергнутого комбинированной обработке

Таким образом, в результате выполненных исследований продемонстрирована возможность многократного увеличения трибологических и прочностных характеристик технически чистого алюминия марки А7, подвергнутого комплексному легированию поверхностного слоя путем облучения системы «пленка (сплав 12Х18Н10Т, 0,5 мкм) / (А7) подложка» интенсивным электронным пучком и последующему азотированию в плазме газового разряда низкого давления.

Список литературы

1. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, В.Н. Арзамасов – М.: Металлургия, 1984. – 256 с.
2. Грибков В.А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов / В.А. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
3. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов: Монография / К.К. Кадыржанов, Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, В.С. Русаков, Т.Э. Туркебаев. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.
4. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов / Н.А. Белов – М.: Изд-во МИСиС, 2010. – 510 с.

5. Будилов В.В. Интегрированные методы обработки конструкционных и инструментальных материалов с использованием тлеющих и вакуумно-дуговых разрядов / В.В. Будилов, Н.Н. Коваль, Р.М. Киреев, К.Н. Рамазанов – М.: Машиностроение, 2013. – 320 с.
6. Поут Дж.М., Джекобсон Д. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
7. Гришунин В.А. Электронно-пучковая модификация структуры и свойств стали / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Денисова – Новокузнецк: Изд-во «Полиграфист», 2012. – 308 с.
8. Берлин Е.Б. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман – М.: Техносфера, 2012. – 464 с.
9. Ivanov Yu.F. Structure and properties of commercially pure titanium nitrided in the plasma of a low-pressure gas discharge produced by a PINK plasma generator / Yu.H. Akhmadeev, I.V. Lopatin, E.A. Petrikova, O.V. Krysina, N.N. Koval // Journal of Physics: Conference Series 652 (2015) 012013.
10. Квасов Ф.И. Промышленные алюминиевые сплавы. – Справочное издание. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1984. – 528 с.
11. Shugurov V.V. Automated vacuum ion-plasma installation / A.A. Kalushevich, N.N. Koval, V.V. Denisov, V.V. Yakovlev // Известия ВУЗов. Физика. – 2012. – № 12/3. – С. 118-122.
12. Koval N.N. Arc plasma-assisted deposition of nanocrystalline coatings / Yu.F. Ivanov, O.V. Krysina, V.V. Shugurov // Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Tomsk, Russia, September 2 – 7, 2012, Vol. 2, pp. 537-540.
13. Борисов Д.П. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом / П.М. Щанин, Н.Н. Коваль // Изв. ВУЗов. Физика. – Т. 37. – №3. – 1994. – С.115-121.
14. Винтизенко Л.Г. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц / С.В. Григорьев, Н.Н. Коваль, О.С. Толкачев, И.В. Лопатин, П.М. Щанин // Известия ВУЗов. Физика. – 2001. – Т. 44. – №9. – С. 28-35.
15. Коваль Н.Н. Эмиссионная электроника / Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
- Grigoriev, B.A. Kalin, V.L. Yakushin - M.: All year round, 2001. - 528 p.
3. Ion-beam and ion-plasma modification of materials: Monograph / K.K. Kadyrzhanov, F.F. Komarov, A.D. Pogrebnyak, V.S. Rusakov, T.E. Turkebaev. - Moscow: MGU, 2005. - 640 p.
4. Belov N.A. Phase composition of industrial and perspective aluminum alloys / N.A. Belov - M.: MISiS, 2010. - 510 p.
5. Budilov V.V. Integrated methods for processing structural and instrumental materials using glow and vacuum arc discharges. Budilov, N.N. Koval, R.M. Kireev, K.N. Ramazanov - M.: Mechanical Engineering, 2013. - 320 p.
6. Pote J.M., Jacobson D. Modification and doping of the surface by laser, ion and electron beams. - Moscow: Mechanical Engineering, 1987. - 424p.
7. Grishunin V.A. Electron-beam modification of the structure and properties of steel / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, Yu.A. Denisova - Novokuznetsk: Publishing house "Polygraphist", 2012. - 308 p.
8. Berlin E.B. Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts / N.N. Koval, L.A. Seidman - M.: Technosphere, 2012. - 464 p.
9. Ivanov Yu.F. Structure and properties of commercially pure titanium nitrided in the plasma of a low-pressure gas produced by a PINK plasma generator / Yu.H. Akhmadeev, I.V. Lopatin, E.A. Petrikova, O.V. Krysina, N.N. Koval // Journal of Physics: Conference Series 652 (2015) 012013.
10. Kvasov F.I. Industrial aluminum alloys. - Reference edition. 2 nd ed., Revised. And additional. - Moscow: Metallurgy, 1984. - 528 p.
11. Shugurov V.V. Automated vacuum ion-plasma installation / A.A. Kalushevich, N.N. Koval, V.V. Denisov, V.V. Yakovlev // Proceedings of universities. Physics. - 2012. - No. 12/3. - P. 118-122.
12. Koval N.N. Arc plasma-assisted deposition of nanocrystalline coatings / Yu.F. Ivanov, O.V. Krysina, V.V. Shugurov // Proceedings of the 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Tomsk, Russia, September 2-7, 2012, Vol. 2, pp. 537-540.
13. Borisov, D.P. Generation of a bulk plasma by an arc discharge with a heated cathode / P.M. Shchanin, N.N. Koval // News of Higher Educational Institutions. Physics. - T. 37. - № 3. - 1994. - P.115-121.
14. Vintzenko L.G. Low-pressure arc discharges with a hollow cathode and their application in plasma generators and sources of charged particles. Grigoriev, N.N. Koval, O.S. Tolkahev, I.V. Lopatin, P.M. Shchanin // News of Higher Educational Institutions. Physics. - 2001. - P. 44. - № 9. - P. 28-35.
15. Koval N.N. Emission Electronics / E.M. Oks, Yu.S. Protasov, N.N. Semashko - M.: Publishing House of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman, 2009. - 596 p.

References

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №5 2017

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Машиностроение и машиноведение (05.02.00)
- Информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00)
- Транспорт (05.22.00)
- Безопасность деятельности человека (05.26.00)
- Технология продовольственных продуктов (05.18.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.
