

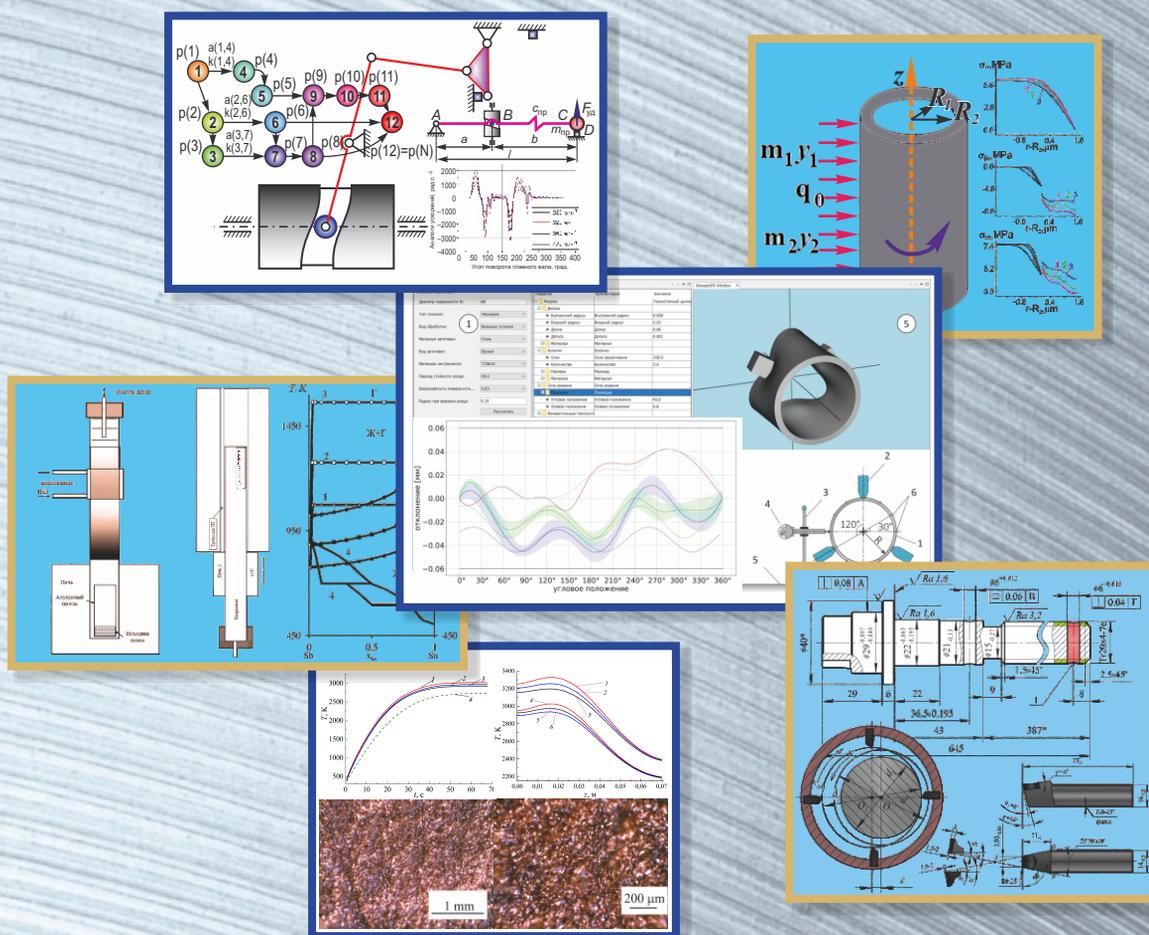
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Том 20 №1 ЯНВАРЬ-МАРТ 2018 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



НОВОСИБИРСК

ОБРАБОТКА

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

О МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI) базы Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.

EBSCO

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing) на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.



Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г.

Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X

Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 20 № 1 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Пустовой Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, президент НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

Члены совета

Федеративная Республика Бразилия: **Альберто Морейра Хорхе**, профессор, доктор технических наук, Федеральный университет, г. Сан Карлос

Федеративная Республика Германия: **Монико Грайф**, профессор, доктор технических наук, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, **Томас Хассел**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, **Флориан Нюрнбергер**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Украина: **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген.директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Буров В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Лобанов Д.В.**, доктор техн. наук, доцент, ЧГУ, г. Чебоксары, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, с.н.с., ИФМ УРО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары

В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI)* базы *Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» теперь можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing) на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.

СОУЧРЕДИТЕЛИ

ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром»
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Батаев Анатолий Андреевич – профессор,
доктор технических наук,
ректор НГТУ

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук.

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

Ложкина Елена Алексеевна – редактор перевода текста
на английский язык,
кандидат технических наук

*Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при
обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка
на журнал при перепечатке обязательна.*

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137ВЦ, Скиба В.Ю.

Тел. +7 (383) 346-17-75

Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

E-mail: metal_working@mail.ru

Цена свободная

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

- Королев А.А., Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л., Лобанов В.Г.** Переработка сурьмянисто-оловянных концентратов вакуумной дистилляцией..... 6
- Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С.** Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей..... 22

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

- Кудряшов Е.А., Каменева Т.Е.** Повышение работоспособности охватывающей фрезы с режущими элементами из композита при нарезании трапецеидальной резьбы с элементами разрыва..... 33
- Подгорный Ю.И., Максимчук О.В., Кириллов А.В., Скиба В.Ю.** Особенности циклограммирования машины с учетом взаимодействия звеньев механизмов с упорами..... 44

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Дутова О.С., Шишкин А.В., Чередниченко В.С.** Моделирование теплового и структурного состояния полого катода вакуумного плазмотрона..... 55
- Шанин С.А., Ефременков Е.А.** Модель формирования состава многослойного покрытия при осаждении из плазмы..... 69

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

- Рекомендации по написанию научной статьи 80
- Подготовка аннотации 83
- Правила для авторов 85

Корректор *Л.Н. Ветчакова*
 Художник-дизайнер *А.В. Ладыжская*
 Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

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

Подписано в печать 05.03.2018. Выход в свет 15.03.2018. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
 Усл. печ.л. 11,5. Уч.-изд. л. 21,39. Изд. № 59. Заказ 415. Тираж 300 экз.

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

BRABOTKA METALLOV METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 20 No.1 2018 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

Anatoliy A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Vadim Y. Skeeba, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Editor of the English translation:

Elena A. Lozhkina, Ph.D. (Engineering),
Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year



Data on the journal are published in
«Ulrich's Periodical Directory»

Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”) has been Indexed in Clarivate Analytics Services.



We sincerely happy to announce that Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”), ISSN 1994-6309 / E-ISSN 2541-819X is selected for coverage in Clarivate Analytics (formerly Thomson Reuters) products and services started from July 10, 2017. Beginning with No. 1 (74) 2017, this publication will be indexed and abstracted in: Emerging Sources Citation Index.



Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working & Material Science”) has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the EBSCOhost™ databases.

📍 Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia

☎ Tel.: +7 (383) 346-17-75

🌐 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

✉ E-mail: metal_working@mail.ru

**EDITORIAL COUNCIL
CHAIRMAN:**

Nikolai V. Pustovoy, D.Sc. (Engineering), Professor,
President, Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

Alberto Moreira Jorge Junior, Dr.-Ing., Full Professor;
Federal University of São Carlos, *São Carlos*

The Federal Republic of Germany:

Moniko Greif, Dr.-Ing., Professor,
Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, *Russelsheim*

Florian Nürnberger, Dr.-Ing.,
Chief Engineer and Head of the Department “Technology of Materials”,
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*;

Thomas Hassel, Dr.-Ing.,
Head of Underwater Technology Center Hanover,
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*

The Republic of Belarus:

Fyodor I. Panteleenko, D.Sc. (Engineering), Professor,
First Vice-Rector, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus,
Belarusian National Technical University, *Minsk*

The Ukraine:

Sergiy V. Kovalevskyy, D.Sc. (Engineering), Professor,
Vice Rector for Research and Academic Affairs,
Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

The Russian Federation:

Gennadiy E. Anisimenko, Director,
Scientific and Production company “Sigma-instrument”, *Novosibirsk*;

Vladimir G. Atapin, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Victor P. Balkov, Deputy general director,
Research and Development Tooling Institute “VNIINSTRUMENT”, *Moscow*;

Vladimir A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Vladimir G. Burov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Aleksandr N. Gerasenko, Director,
Scientific and Production company “Mashservispribor”, *Novosibirsk*;

Sergey V. Kirsanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
National Research Tomsk Polytechnic University, *Tomsk*;

Aleksandr N. Korotkov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Kuzbass State Technical University, *Kemerovo*;

Evgeniy A. Kudryashov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Southwest State University, *Kursk*;

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*;

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher,
Head of division, Head of laboratory (Laboratory of Mechanical Properties)
M.N. Miheev Institute of Metal Physics,
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*;

Aleksandr G. Ovcharenko, D.Sc. (Engineering), Professor,
Biysk Technological Institute, *Biysk*;

Kharis M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Yuriy N. Saraev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Institute of Strength Physics and Materials Science,
Russian Academy of Sciences (Siberian Branch), *Tomsk*;

Alexander S. Yanyushkin, D.Sc. (Engineering), Professor,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*

CONTENTS

TECHNOLOGY

- Korolev A.A., Maltsev G.I., Timofeev K.L., Lobanov V.G.** Processing of Antimony-tin Concentrates by Vacuum Distillation..... 6
- Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S.** Empirical Evaluation of Technological Deformations for “Soft” Cutting Modes During Thin-Walled Parts Turning..... 22

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

- Kudryashov E.A., Kameneva T.E.** Increase of Efficiency of the Internally Cutting Mill with Composite Cutters when Cutting Trapezoidal Thread with Interrupted Elements..... 33
- Podgornyj Yu.I., Maksimchuk O.V., Kirillov A.V., Skeebe V.Yu.** Features of Machine Cyclogram Optimization with the Account of Interaction of Mechanism Links with Stops..... 44

MATERIAL SCIENCE

- Dutova O.S., Shishkin A.V., Cherednichenko V.S.** Modeling of the Thermal and Structural States of Hollow Cathode of Vacuum Plasmatron..... 55
- Shanin S.A., Efremkov E.A.** Model of the Formation of the Multilayer Coating Composition During Plasma-assisted Deposition..... 69

EDITORIAL MATERIALS

- Guidelines for Writing a Scientific Paper 80
- Abstract requirements 83
- Rules for authors 85



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Переработка сурьмянисто-оловянных концентратов вакуумной дистилляцией

Алексей Королев^{1, a}, Геннадий Мальцев^{1, b, *}, Константин Тимофеев^{1, c},
 Владимир Лобанов^{2, d}

¹ Акционерное общество «Уралэлектромедь», пр. Успенский, 1, г. Верхняя Пышма, 624091, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0002-0338-9774>, gennadymaltsev@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-0750-0070>, mgi@elem.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-9525-6476>, K.Timofeev@elem.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0001-6450-8434>, lobanov-vl@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.6.8..471: 669.053: 66.048.1–982

История статьи:

Поступила: 22 декабря 2017

Рецензирование: 20 января 2018

Принята к печати: 08 февраля 2018

Доступно онлайн: 15 марта 2018

Ключевые слова:

Диаграмма
 Модель
 Вакуум
 Сплав
 Дистилляция
 Олово
 Сурьма
 Разделение
 Концентрат

АННОТАЦИЯ

Объект исследования: статья посвящена вопросу создания экологически безопасной, технологически эффективной и экономически выгодной высокопроизводительной комплексной схемы по переработке свинецсодержащих промпродуктов и отходов, в частности, концентрата сурьмянисто-оловянного (КСО), образующегося при контрольной фильтрации в химико-металлургическом цехе, с получением товарных моноэлементных продуктов сурьмы и олова. Для анализа поведения поликомпонентного сплава при переработке, обоснования величин давления и температуры процесса, прогнозирования состава продуктов и степени разделения металлов при высокотемпературной возгонке рассчитывают равновесные фазовые диаграммы *VLE* (*vapor liquid equilibrium*), в частности, температура–состав «*T–x*». **Цель работы:** исследование влияния температуры и давления в системе на полноту извлечения и степень разделения сурьмы и олова из состава КСО. **Используемые методы и подходы:** при построении равновесных фазовых диаграмм *VLE* расчет коэффициентов активности компонентов Sb–Sn сплава выполнен с помощью объемной модели молекулярного взаимодействия *molecular interaction volume model* (*MIVM*). **Новизна:** получена новая информация о влиянии температуры и глубины вакуума на степень возгонки и разделения металлов из Sb–Sn композиций различного состава. **Основные результаты:** в интервале температур 823...1073 К рассчитаны давления насыщенного пара (Па) для Sn $(0.00332...81.193) \cdot 10^{-6}$ и Sb $(3.954...273.664)$. Высокие значения $p_{Sb}^* / p_{Sn}^* = (118.976...0.337) \cdot 10^7$ и коэффициента разделения $\log \beta_{Sb} = 6.262...9.435$ предполагают теоретическую возможность для разделения указанных металлов вакуумной дистилляцией, при этом сурьма концентрируется в составе возгонов ($\beta_{Sb} > 1$), а олово – в кубовом остатке. Содержание олова в газовой фазе, молярная доля (м.д.): $y_{Sn} = (0.002...9498.3) \cdot 10^{-4}$, возрастает в интервале температуры 921...1878 К, давления 1,33...133 Па и количества металла (м.д.) в сплаве $x_{Sn} = 0.9...0.9999$. Согласно *MIVM* определены значения $\gamma_{Sb} = 0.439...0.992$ и $\gamma_{Sn} = 0.433...0.992$ для Sb–Sn сплава состава 0.1...0.9 в исследованном температурном диапазоне. Практическая значимость: равновесные диаграммы *VLE* используют на предварительных этапах проектирования оптимальных технологических режимов промышленных установок для вакуумной дистилляции, а также для обоснованного выбора температуры и давления возгонки с целью получения Sn- и Sb-содержащих продуктов заданного состава. Предложена принципиальная схема переработки КСО вакуумной дистилляцией.

Для цитирования: Переработка сурьмянисто-оловянных концентратов вакуумной дистилляцией / А.А. Королев, Г.И. Мальцев, К.Л. Тимофеев, В.Г. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 6–21. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-6-21.

Введение

При комплексной переработке концентратов сурьмянисто-оловянных (КСО) от рафинирования черного свинца, содержащих соединения Sb–Sn (*i–j*), опробована вакуумная дистилляция, являющаяся высокопроизводительным и природосберегающим методом для выделения

*Адрес для переписки

Мальцев Геннадий Иванович, д.т.н., с.н.с.
 Акционерное общество «Уралэлектромедь»
 пр. Успенский, 1,
 624091, г. Верхняя Пышма, Россия
 Тел.: 8 (922) 144-60-65, e-mail: mgi@elem.ru

индивидуальных компонентов из состава полиметаллических сплавов [1]. По сравнению с используемыми пирометаллургическими и электрохимическими технологиями она выгодно отличается низкой энергоемкостью, хорошей кинетикой, высокой экономичностью и безотходностью [2]. Теоретические возможности для разделения различных по природе компонентов сплавов методом возгонки можно прогнозировать путем выявления различия в давлении насыщенных паров чистых металлов (P^*) при одинаковой температуре, а также в величине коэффициентов разделения (β) для компонентов сплавов при их распределении между газовой и жидкой фазами [3]. Для расчета β предварительно требуется определить коэффициенты активности компонентов (γ_i, γ_j) в зависимости от температуры и состава сплава [4].

Агрегатное состояние компонентов бинарного металлического сплава $i-j$ при вакуумной перегонке в зависимости от его состава (x), температуры (T) и давления (P) в исследуемой системе можно прогнозировать с помощью равновесных фазовых диаграмм «жидкость–газ» (*vapor liquid equilibrium – VLE*) « $T-x$ » и « $P-x$ », рассчитанных для бинарного сплава $i-j$, в частности Sb–Sn, с использованием *MIVM* (*molecular interaction volume model*) – молекулярной модели объемного взаимодействия [5]. При этом задействованы координационные числа (Z), молярные объемы (V_m) и потенциальные энергии парного взаимодействия (B) компонентов сплава [6].

Достоверные диаграммы *VLE* позволяют предварительно обосновать температуру и давление процесса возгонки, прогнозировать степень разделения металлов из состава исходного сплава [7]. Обычно фактическое определение количества и состава продуктов дистилляции из опытных образцов достаточно трудоемко и дорого. Поэтому теоретическое прогнозирование служит альтернативным и экономичным методом получения оперативных сведений о предполагаемом количественном и качественном составе получаемых продуктов при вакуумной перегонке многокомпонентных систем в составе возгонов (конденсатов) и кубовых остатков [8].

Цель работы – исследование влияния температуры и давления в системе на полноту извлечения и степень разделения сурьмы и олова из состава КСО, а также прогнозирование каче-

ственного и количественного состава фаз вакуумной возгонки Sb–Sn сплава посредством расчета равновесных диаграмм «жидкость–газ», учитывающих зависимость состава образующихся продуктов возгона от температуры ($T-x$), с применением *MIVM*.

Методика исследований

Объектом исследования служил концентрат сурьмяно-оловянный, мас. %: 51.45 Sb; 37.55 Sn; 2.16 S; 0.914 Ni; 0.21 As; 0.168 Fe; 0.033 Pb; 0.044 Bi; 438 г/т Ag; 6.3 г/т Au; 1.33 H₂O. С учетом наличия влаги в исходных образцах проведена предварительная сушка КСО с ловушкой для воды, охлаждаемой жидким азотом, при давлении 133...1333 Па и температуре 553...773 К в течение 3...8 ч. В опытах по дистилляции № 1–5, 11–18, 20, 21 использованы предварительно подготовленные образцы КСО; в № 6–9, 19 исходным материалом служили кубовые остатки № 5–8 и 18 соответственно; в № 10 исследования проводили с фракциями возгона-1 № 2–4; в № 22 исходный КСО перед возгонкой спекали при 1473 К для снижения механического пылеуноса с отходящими газами.

При исследованиях отгонки сурьмы из состава концентрата использовали две установки (рис. 1) с кварцевой пробиркой, алундовым тиглем или графитовой лодочкой ($S = 75 \text{ см}^2$). Масса загрузки составляла 125...250 г. Кварцевая пробирка позволяет визуально наблюдать процесс отгонки сурьмы и олова. Эксперимент проводили согласно следующим операциям:

- тигель (лодочку) с разгоняемым сплавом помещали в кварцевую пробирку и проводили вакуумирование;

- в случае создания среды инертного газа запускали аргон и затем производили вакуумирование до нужного давления ($P = 1.1 \times 10^5 \text{ Па}$);

- температура процесса определялась началом заметной конденсации испарившейся сурьмы, а продолжительность – по отгонке определенного количества олова;

- после определения убыли количества сплава корректировали последующую продолжительность возгонки;

- по окончании опыта проводили анализ возгонов 1–5 и кубового остатка (рис. 2) на атомно-абсорбционном аппарате «*GBC 933AB Plus*».

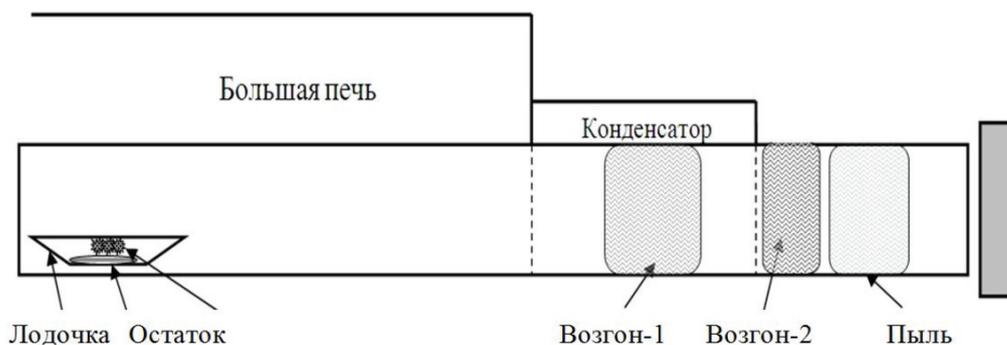


Рис. 2. Схема распределения продуктов перегонки КСО в установке
 Fig. 2. The distribution scheme of the products of the concentrate antimony-tin distillation

Результаты и их обсуждение

Параметры для расчета сплава Sn–Sb приведены в табл. 1.

Сурьма обладает высоким давлением насыщенных паров и легко возгоняется, у олова этот показатель низкий, в результате чего оно концентрируется в кубовом остатке, что позволяет количественно разделить эти металлы методом вакуумной дистилляции (табл. 2).

Чтобы оценить разделение элементов *i* и *j* бинарного сплава *i–j* возгонкой используем рассчитанные коэффициенты активности (табл. 3) и коэффициент разделения β_{*i*} (табл. 4, рис. 1):

$$\beta_{Sb} = \frac{p_{Sb}^* \gamma_{Sb}}{p_{Sn}^* \gamma_{Sn}} \quad (1)$$

Значения β_{Sb} > 1, поскольку содержание Sb в газовой фазе больше, чем в жидкой (y_{Sb} >> x_{Sb}); Sb концентрируется в газовой фазе, а Sn –

в кубовом остатке (x_{Sn} >> y_{Sn}), что разделяет исходный сплав на сурьму и олово.

Коэффициент разделения сурьмы и олова возрастает (logβ_{Sb} = 6.262...9.435) по мере снижения температуры процесса (1073...823 К) и доли олова (x_{Sn} = 0.9...0.1) в составе бинарного Sn–Sb сплава. Для Sn–Sb сплава содержание компонентов в возгонах определяется формулами [15–18]

$$\begin{aligned} y_{Sn} &= \left[1 + \frac{p_{Sb}^* \gamma_{Sb} x_{Sb}}{p_{Sn}^* \gamma_{Sn} x_{Sn}} \right]^{-1}, \\ y_{Sb} &= \left[1 + \frac{p_{Sn}^* \gamma_{Sn} x_{Sn}}{p_{Sb}^* \gamma_{Sb} x_{Sb}} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

При расчете «*T–x*» диаграммы бинарной системы *i–j* применили известную методику [19–21], подбирая для различных значений x_{*i*} определенную температуру, при которой сумма парциальных давлений компонентов сплава

Таблица 1
Table 1

Значения параметров γ_{*i*}[∞], γ_{*j*}[∞], B_{*ij*}, B_{*ji*}, Z_{*i*}, Z_{*j*}, p_{*i*}^{*}, p_{*j*}^{*}, V_{*m*}(*i,j*) сплава Sn–Sb

Values of the parameters γ_{*i*}[∞], γ_{*j*}[∞], B_{*ij*}, B_{*ji*}, Z_{*i*}, Z_{*j*}, p_{*i*}^{*}, p_{*j*}^{*}, V_{*m*}(*i,j*) Sn–Sb alloy

<i>i–j</i> сплав <i>i–j</i> alloy	<i>T</i> , К	γ _{Sn} [∞]	γ _{Sb} [∞]	B _{Sn–Sb}	B _{Sb–Sn}	Z _{Sn}	Z _{Sb}
Sn–Sb	905	0.411	0.411	1.1095	1.0937	6.5512	6.9698
Компонент Component	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	V _{<i>m</i>} = <i>f</i> (<i>T</i>), см ³ /моль		
Sn	–15 500	0	0	10.355	17.0[1 + 0.87 · 10 ^{–4} (<i>T</i> –505)]		
Sb	–6500	0	0	8.495	18.8[1 + 1.3 · 10 ^{–4} (<i>T</i> –904)]		

Таблица 2

Table 2

Рассчитанные давление и соотношение давления паров Sn и Sb
The calculated pressure and the ratio of the vapor pressure of Sn and Sb

T, K	p_{Sb}^*, Pa	p_{Sn}^*, Pa	p_{Sb}^*/p_{Sn}^*
823	3.954	$3.32 \cdot 10^{-9}$	$1.19 \cdot 10^9$
873	11.205	$3.98 \cdot 10^{-8}$	$2.81 \cdot 10^8$
923	28.363	$3.65 \cdot 10^{-7}$	$7.678 \cdot 10^7$
973	65.257	$2.66 \cdot 10^{-6}$	$2.45 \cdot 10^7$
1023	138.401	$1.60 \cdot 10^{-5}$	$8.66 \cdot 10^6$
1073	273.664	$8.12 \cdot 10^{-5}$	$3.37 \cdot 10^6$

Таблица 3

Table 3

Рассчитанные значения коэффициентов активности Sn и Sb в расплаве
The calculated values of the activity coefficients of Sn and Sb in the melt

T, K	γ	x_{Sn}								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
823	γ_{Sn}	0.433	0.517	0.604	0.691	0.774	0.849	0.912	0.960	0.990
	γ_{Sb}	0.990	0.960	0.913	0.850	0.776	0.694	0.609	0.523	0.439
873	γ_{Sn}	0.456	0.539	0.623	0.707	0.786	0.857	0.917	0.962	0.990
	γ_{Sb}	0.990	0.963	0.918	0.859	0.788	0.710	0.627	0.544	0.462
923	γ_{Sn}	0.478	0.559	0.641	0.721	0.797	0.865	0.921	0.964	0.991
	γ_{Sb}	0.991	0.965	0.922	0.866	0.799	0.724	0.645	0.563	0.483
973	γ_{Sn}	0.498	0.577	0.657	0.734	0.807	0.872	0.926	0.966	0.991
	γ_{Sb}	0.992	0.967	0.927	0.873	0.809	0.737	0.660	0.581	0.502
1023	γ_{Sn}	0.517	0.594	0.671	0.746	0.816	0.878	0.929	0.968	0.992
	γ_{Sb}	0.992	0.968	0.930	0.880	0.818	0.749	0.675	0.598	0.521
1073	γ_{Sn}	0.534	0.610	0.685	0.757	0.824	0.883	0.933	0.969	0.992
	γ_{Sb}	0.992	0.970	0.934	0.885	0.826	0.760	0.688	0.613	0.538

Таблица 4

Table 4

Рассчитанные значения коэффициента разделения Sn и Sb ($\log\beta_{Sb}$)
The calculated values of the separation coefficient of Sn and Sb ($\log\beta_{Sb}$)

x_{Sn}	823 K	873 K	923 K	973 K	1023 K	1073 K
0,1	9.435	8.786	8.207	7.689	7.221	6.797
0,2	9.344	8.701	8.128	7.614	7.150	6.729
0,3	9.255	8.618	8.049	7.539	7.079	6.662
0,4	9.166	8.534	7.970	7.465	7.009	6.596
0,5	9.077	8.450	7.892	7.391	6.939	6.529
0,6	8.988	8.368	7.814	7.317	6.869	6.463
0,7	8.900	8.284	7.736	7.243	6.799	6.395
0,8	8.812	8.202	7.657	7.169	6.728	6.329
0,9	8.722	8.118	7.579	7.094	6.658	6.262



становится равной внешнему давлению. При этом соответствующие величины γ_{Sn} , γ_{Sb} , P , P_{Sn}^* и P_{Sb}^* при исследованных температурах (табл. 3) подставляли в уравнения (3), (5), (6), приведенные в работе [18]. В результате получена « T - x » фазовая диаграмма для системы Sn–Sb (рис. 3 и табл. 5) [22–24], из которой следует, что при снижении давления разность температур кубового остатка и возгонов уменьшается и позволяет эффективно разделять Sn и Sb. Расчетом установлено, что с ростом остаточного содержания олова в составе полиметаллического сплава КСО ($x_{Sn} = 0,9...0,9999$), давления (1,33...133 Па) и температуры процесса (921...1878 К) количество трудновозгоняемого металла, переходящего в газовую фазу, увеличивается ($y_{Sn} = 2 \cdot 10^{-7}...0,95$). Отсюда при давлении ~ 1 Па и температуре не выше 1276 К в равновесной системе с макрокомпонентами сурьмой и оловом возможно получение дистилляцией Sb-конденсата, содержащего в качестве примеси не более $\sim 1,2$ мольный % Sn при содержании олова в остатке не более 99,9 мольный %. Для получения более чистого конденсата необходимо повысить содержание сурьмы в остатке (свыше 0,1 мольный %) или увеличить глубину вакуума ($P < 1$ Па) и соответственно снизить температуру возгонки ($T < 276$ К).

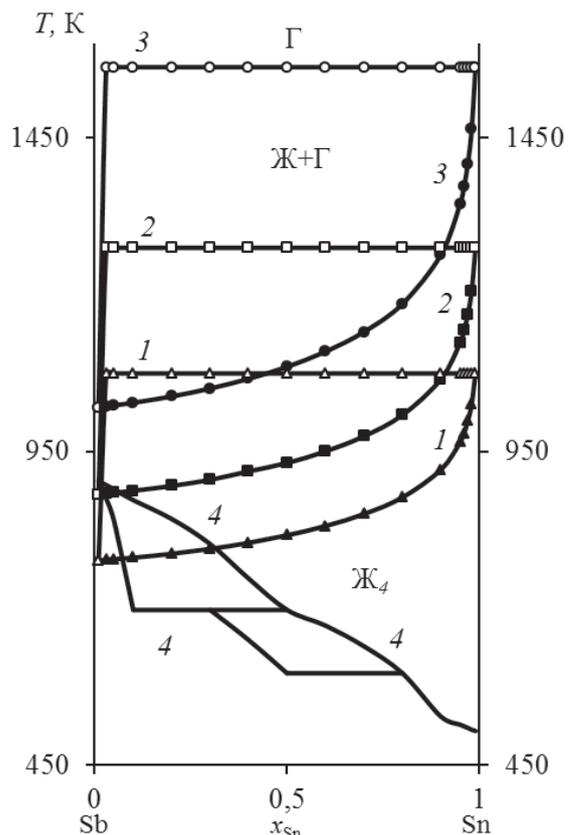


Рис. 3. Фазовые диаграммы « T - x » при P , Па: 1.33 (1); 13.33 (2); 133.3 (3); 98 000 (4) [25]
 Fig. 3. Phase diagram « T - x » for P , Pa: 1.33 (1); is 13.3 (2); 133 (3); 98000 (4) [25]

Таблица 5
 Table 5

Рассчитанные значения γ_{Sn} , γ_{Sb} , T_{liq} , y_{Sn} Sn–Sb сплава для « T - x » диаграмм
 The calculated values of γ_{Sn} , γ_{Sb} , T_{liq} , y_{Sn} Sn–Sb alloy to « P - x » charts

P , Па	x_{Sn}	0.90	0.95	0.96	0.97	0.99	0.995	0.999	0.9999
1,33	T_{liq} , К	921.4	965.3	979.6	999.2	1075.3	1130	1276	1472
	γ_{Sn}	0.991	0.998	0.999	0.999	1.0	1.0	1.0	1.0
	γ_{Sb}	0.483	0.461	0.460	0.454	0.472	0.484	0.525	0.574
	$y_{Sn} \cdot 10^{-4}$	0.002	0.014	0.025	0.051	0.65	3.25	121.2	5025.9
13,3	T_{liq} , К	1065.6	1123.9	1143.2	1168,9	1275.3	1352	1542	1664
	γ_{Sn}	0.992	0.998	0.999	0.999	1.0	1.0	1.0	1.0
	γ_{Sb}	0.536	0.517	0.516	0.516	0.531	0.550	0.596	0.613
	$y_{Sn} \cdot 10^{-4}$	0.04	0.26	0.45	0.91	11.82	58.14	1509.5	8245.2
133	T_{liq} , К	1263.8	1345.2	1372.6	1409	1563	1667	1830	1878
	γ_{Sn}	0.993	0,998	0.999	0.999	1.0	1.0	1.0	1.0
	γ_{Sb}	0.592	0.578	0.578	0.581	0.601	0.617	0.650	0.648
	$y_{Sn} \cdot 10^{-4}$	0.83	4.85	8.33	16.47	204.2	852.8	5764.6	9498.3

В опытах № 1–9, 11–20 (табл. 6 и 7) прослеживается влияние температуры ($T = 973 \dots 1373$ К) и продолжительности процесса ($\tau = 1 \dots 24$ ч) на степень извлечения металлов из состава КСО, %: 51,45 Sb; 37,55 Sn при постоянном давлении (13,3...133 Па). При $P = 133$ Па в интервале температур 973...1373 К возрастает переход в газовую фазу компонентов Sb/Sn в пределах, %: 1,25...83,6/2,04...22,5. При увеличении про-

должительности возгонки на 3 ч из кубовых остатков № 5–8 состава, %: 49,84...57,96 Sb; 38,5...46,97 Sn, дополнительно испаряются Sb/Sn, %: 9,8...41,3/4,93...12,0. Для исходного КСО в интервале $\tau = 1 \dots 8$ ч возрастает возгонка Sb/Sn, %: 31,8...83,6/10,5...41,8. Усредненный состав полученных продуктов дистилляции, Sb/Sn %: 87...92/5...10 – возгоны; 27...37/58...69 – остаток.

Таблица 6

Table 6

Параметры процессов разделения компонентов КСО
The parameters of the processes of the concentrate Sn-Sb components separation

№ п/п	Сырье, Среда / Raw materials, Medium	m , г	Продукт / Product	m , г / %	T , К	P , Па	τ , ч	Извлечено из материала, % / Extracted from material, %
1	КСО	150	Возгоны Остаток	28.5/19.0 121.5/81.0	1373	133	1	31.8 Sb; 10.5 Sn
2	КСО	120.39	Возгоны Остаток	43.8/36.4 76.59/63.6	1273	133	6	43.3 Sb; 14.4 Sn
3	КСО	108	Возгоны Остаток	51.77/47.9 56.23/52.1	1373	133	4	67.6 Sb; 22.5 Sn
4	КСО	115.72	Возгоны Остаток	36.73/31,7 78.99/68,3	1273	133	10	44.6 Sb; 10 Sn
5	КСО	125.4	Возгоны Остаток	4.13/3.3 121.27/96.7	973	133	2	1.25 Sb; 2.04 Sn
6	Остаток-5	119.66	Возгоны Остаток	12.53/10.5 107.13/89.5	1073	133	3	9.8 Sb; 4.93 Sn
7	Остаток-6	106.19	Возгоны Остаток	16.01/15.1 90.18/84.9	1173	133	3	16.8 Sb; 12.0 Sn
8	Остаток-7	88.39	Возгоны Остаток	9.28/10.5 79.11/89.5	1273	133	3	21.5 Sb; 0.3 Sn
9	Остаток-8	78.11	Возгоны Остаток	19.27/24.7 58.84/75.3	1373	133	3	41.3 Sb; 5.8 Sn
10	Возгон-1 № 2–4	95	Возгоны Остаток	90.74/95.52 4.26/4.48	1273	13.3	8	99.45 Sb; 62.9 Sn
11	КСО	121.68	Возгоны Остаток	83.34/68.49 38.34/31.51	1373	133	8	83.6 Sb; 41.8 Sn
12	КСО	112.71	Возгоны Остаток	69.13/61.33 43.58/38.67	1373	13.3	8	90.7 Sb; 13.6 Sn
13	КСО	116.65	Возгоны Остаток	61.15/61.33 55.5/47.58	1273	13.3	8	70.2 Sb; 18.7 Sn
14	КСО	121.98	Возгоны Остаток	72.01/59.03 49.97/40.97	1373	13.3	6	86.3 Sb; 13.5 Sn
15	КСО	114.59	Возгоны Остаток	57.92/50.55 56.67/49.45	1273	13.3	6	65.97 Sb; 16.63 Sn

Окончание табл. 6

Concluded table 6

№ п/п	Сырье, Среда / Raw materials, Medium	<i>m</i> , г	Продукт / Product	<i>m</i> , г / %	<i>T</i> , К	<i>P</i> , Па	τ , ч	Извлечено из материала, % / Extracted from material, %
16	КСО	117.87	Возгоны Остаток	68.67/58.26 49.20/41.74	1273	13.3	16	84.56 Sb; 13.64 Sn
17	КСО	123.55	Возгоны Остаток	41.73/33.78 81.82/66.22	1173	13.3	8	36.2 Sb; 14.01 Sn
18	КСО	118.02	Возгоны Остаток	38.53/32.65 79.49/67.35	1173	13.3	6	37.8 Sb; 12.0 Sn
19	Остаток-17	81.04	Возгоны Остаток	3.79/4.68 77.25/95.32	1173	13.3	8	35.44 Sb; 1.17 Sn
20	КСО	118.86	Возгоны Остаток	76.10/64.02 42.76/35.98	1373	13.3	24	96.35 Sb; 12.73 Sn
21	КСО	125.81	Возгоны Остаток	80.47/63.96 45.34/36.04	1373	1.33	8	92.08 Sb; 19.41 Sn
22	КСО (1473 К)	200.05	Возгоны Остаток	120.75/60.36 79.3/39.64	1373	1.33	8	93.26 Sb; 8.66 Sn

Таблица 7

Table 7

Состав продуктов (мас.%) разделения компонентов КСО

Composition of products (wt. %) of the concentrate Sn–Sb components separation

№ п/п	Продукт / Product	Sb	Sn	Ni	As	Fe
1	КСО	51.45	37.55	0.914	0.21	0.168
	Возгон-1	61.34	28.54	< 0.006	< 0.1	< 0.002
	Возгон-2	87.56	5.03	< 0.006	0.85	< 0.002
	Пыль	50.69	11.44	0.011	13.43	0.087
	Остаток	37.5	58.1	1.4	< 0.1	0.307
2	Возгон-1	86.83	9.70	< 0.006	0.21	0.002
	Возгон-2	90.47	5.42	< 0.006	1.30	0.012
	Пыль	50.99	21.62	0.046	17.44	0.234
	Остаток	45.8	50.6	1.6	0.11	0.38
3	Возгон-1	86.71	10.12	0.006	0.14	0.002
	Возгон-2	85.35	3.06	0.006	2.85	0.003
	Пыль	51.44	15.5	0.011	23.24	0.084
	Остаток	34.76	60.73	1.98	0.01	0.52
4	Возгон-1	82.42	13.03	0.009	0.17	0.002
	Возгон-2	90.29	4.99	0.011	0.46	0.002
	Пыль	42.12	4.53	0.011	45.52	0.024
	Остаток	41.79	54.95	1.67	0.12	0.39

Продолжение табл. 7
 Continued table 6

№ п/п	Продукт / Product	Sb	Sn	Ni	As	Fe
5	Возгон-1	28.07	55.99	0.006	0.11	0.006
	Возгон-2	78.91	14.74	0.022	1.89	0.011
	Остаток	57.53	40.84	0.913	0.15	0.244
6	Остаток № 5	57.53	40.84	0.913	0.15	0.244
	Возгон-1	25.64	58.13	0.006	0.10	0.002
	Возгон-2	8,5	11.77	0.006	0.10	0.008
	Остаток	5.96	38.5	0.941	0.10	0.19
7	Остаток № 6	5.96	38.5	0.941	0.10	0.19
	Возгон-1	37.73	48.97	0.005	0.23	0.001
	Возгон-2	90.26	3.49	0.005	2.56	0.001
	Остаток	56.72	40.8	1.13	0.20	0.31
8	Остаток № 7	56.72	40.8	1.13	0.20	0.31
	Возгон-1	98.16	0.43	0.005	0.43	0.001
	Возгон-2	95.35	1.41	0.005	2.84	0.001
	Остаток	49.84	46.97	1.39	0.05	0.27
9	Остаток № 8	49.84	46.97	1.39	0.05	0.27
	Возгон-1	99.35	0.01	0.005	0.43	0.001
	Возгон-2	95.48	0.22	0.005	4.07	0.019
	Остаток	38.87	58.72	1.46	0.05	0.467
10	Возгон-1 № 2-4	85.5	10.9	< 0.006	0.17	0.002
	Возгон-1	82.47	13.60	< 0.006	< 0.1	< 0.002
	Возгон-2	87.21	3.84	< 0.006	0.3	< 0.002
	Пыль	17.37	60.92	0.007	2.37	0.022
	Остаток	10.49	89.33	0.032	0.1	0.011
11	КСО	51.45	37.55	0.914	0.21	0.168
	Возгон-1	65.80	24.09	0.005	0.19	0.032
	Возгон-2	91.94	4.73	0.005	0.83	0.001
	Пыль	28.78	4.86	0.079	20.54	0.138
	Остаток	26.72	69.32	2.693	0.05	0.371
12	Возгон-1	85.94	8.63	0.023	0.105	< 0.006
	Возгон-2	77.56	2.26	< 0.03	< 0.03	< 0.006
	Пыль	29.03	1.71	< 0.03	0.12	0.048
	Остаток	12.41	83.94	< 0.03	< 0.03	2.275
13	Возгон-1	92.14	5.71	< 0.006	< 0.1	< 0.002
	Возгон-2	77.56	2.26	< 0.006	1.4	0.008
	Пыль	39.97	0.66	< 0.006	52.9	0.024
	Остаток	32.25	64.16	2.492	< 0.1	0.536
14	Возгон-1	88.82	9.33	< 0.006	< 0.1	0.001
	Возгон-2	80.58	0.98	< 0.006	3.1	0.002
	Пыль	45.09	0.49	< 0.006	43.9	0.014
	Остаток	17.26	79.30	2.522	< 0.1	0.771

№ п/п	Продукт / Product	Sb	Sn	Ni	As	Fe
15	Возгон-1	91.15	6.08	< 0.006	0.3	< 0.002
	Возгон-2	74.54	1.11	< 0.006	7.9	< 0.002
	Пыль	43.40	1.89	0.043	42.9	0.048
	Остаток	35.41	63.30	0.901	< 0.1	0.212
16	Возгон-1	89.33	8.68	< 0.006	0.29	< 0.002
	Возгон-2	77.27	2.69	< 0.006	7.4	< 0.002
	Остаток	19.03	77.69	2.235	< 0.1	0.470
17	Возгон-1	78.29	18.08	< 0.006	0.33	< 0.002
	Возгон-2	90.88	3.12	< 0.006	3.1	< 0.002
	Пыль	54.24	2.18	< 0.006	31.4	0.003
	Остаток	49.57	48.76	1.092	< 0.1	0.216
18	Возгон-1	71.76	22.98	< 0.006	0.27	< 0.002
	Возгон-2	80.66	2.37	< 0.006	8.5	< 0.002
	Пыль	56.98	3.30	< 0.006	28.3	0.014
	Остаток	47.51	49.06	1.593	0.1	0.186
19	Остаток № 17	49.57	48.76	1.092	< 0.1	0.216
	Возгон-1	99.21	0.33	< 0.006	0.3	< 0.002
	Пыль	91.34	1.30	< 0.006	5.5	0.008
	Остаток	38.98	58.69	1.769	< 0.1	0.244
20	КСО	51.45	37.55	0.914	0.21	0.168
	Возгон-1	89.96	8.33	< 0.006	0.1	< 0.002
	Возгон-2	79.92	2.85	< 0.006	4.3	< 0.002
	Пыль	51.77	2.53	< 0.006	35.6	0.015
	Остаток	5.22	91.09	2.315	< 0.1	0.574
21	Возгон-1	82.64	12.39	< 0.006	0.1	< 0.002
	Возгон-2	81.56	2.22	< 0.006	2.9	< 0.002
	Пыль	51.92	1.58	< 0.006	35.1	0.005
	Остаток	11.31	83.97	2.641	< 0.1	0.601
22	КСО (1473 К)	58.02	38.04	1.104	0.3	0.088
	Возгон-1	46.75	52.16	< 0.006	< 0.1	0.002
	Возгон-2	92.10	6.31	< 0.006	0.3	< 0.002
	Пыль	74.60	2.60	< 0.006	12.9	0.009
	Остаток	9.86	87.65	2.132	< 0.1	0.189

При давлении 13,3 Па в интервале температур 1173...1373 К за период времени 8...24 ч переход в газовую фазу компонентов сурьмяно-оловянного сплава также возрастает, но в больших количествах, чем при $P = 133$ Па, а именно Sb/Sn, %: 36,2...96,35/12,0...18,7. При увеличении продолжительности возгонки на 8 ч из

кубового остатка № 17 состава, %: 49,57 Sb; 48,76 Sn, дополнительно испаряется в основном сурьма (35,44 % Sb) и в меньшей степени олово (1,17 % Sn). Усредненный состав продуктов дистилляции Sb/Sn, %: 81...92/6...23 – возгоны; 5...50/49...91 – остаток. Вторичная дистилляция при температуре 1273 К в течение

8 ч богатой фракции возгонов-1 № 2–4 состава Sb/Sn, %: 85,5/10,9 позволила получить конденсат Sb/Sn, %: 87/12, близкий по составу к исходному продукту, и остаток Sb/Sn, %: 10,49/89,33.

При давлении 1,33 Па, температуре 1373 К и продолжительности возгонки 8 ч в газовую фазу переходят Sb/Sn, %: 92,08...93,26/8,66...9,41. Содержание в остатке Sb/Sn, %: 10...11/84...88.

Полученные экспериментальные данные в целом соответствуют показателям равновесной фазовой диаграммы *VLE* «жидкость–газ» для бинарного сплава Sb–Sn, рассчитанной по молекулярной модели объемного взаимодействия *MIVM* (см. рис. 3 и табл. 5). Например, в опыте № 20 при температуре 1373 К и давлении 13,3 Па в равновесных условиях содержание в кубовом остатке сурьмы и олова $x_{Sb} = 0,0898$ и $x_{Sn} = 0,9102$ соответственно.

Предложен способ переработки КСО вакуумной перегонкой с содержанием макрокомпонентов (10–90 мас.% Sb, Sn) (рис. 4). Исходный сурьмяно-оловянный концентрат (51,5 мас.% Sb, 37,5 мас.% Sn) может быть дистиллирован

при температуре ~1000 К и давлении ~1 Па. В результате содержание сурьмы в чистых возгонах (Sb-концентрат) составляет не менее 99,99 мол.%, а оловосодержащий остаток (~97 мол.% Pb) подвергается двум последовательным возгонкам при 1130 и 1280 К, после чего количество рафинированного олова в кубовом остатке (Sn-концентрат) возрастает до 99,9 мол.%.

Выводы

1. Для бинарного сплава Sb–Sn в интервале температур 823...1073 К рассчитаны давления насыщенного пара (p^* , Па) для Sb/Sn $(3.954...273.664)/(0.00332...81.193) \cdot 10^{-6}$. Высокие значения соотношений $P_{Sb}^*/P_{Sn}^* = (118.976...0.337) \cdot 10^7$ и коэффициента разделения $\log \beta_{Sb} = 6.262...9.435$ создают теоретические предпосылки для селективного выделения сурьмы в составе возгонов, когда сурьма обогащается в газовой фазе ($\beta_{Sb} > 1$), а олово – в жидкой ($\beta_{Sn} < 1$).

2. На основе объемной модели молекулярного взаимодействия *MIVM* в интервале температур 823...1073 К рассчитаны коэффициенты активности с отрицательными отклонениями от идеальности ($\gamma_{Me} \leq 1$) при содержании компонентов $x_{Me} = 0,1...0,9$ в Sb–Sn сплаве: $\gamma_{Sb/Sn} = (0.439...0.992)/(0.433...0.992)$.

3. Анализ «*T*–*x*» диаграммы Sb–Sn сплава показывает, что содержание менее летучего компонента (олово) в газовой фазе $y_{Sn} = (0.002...9498.3) \cdot 10^{-4}$ возрастает при увеличении его содержания в сплаве ($x_{Sn} = 0,9...0,9999$) и росте равновесной температуры «расплав–газ» $T_{liq} = 921...1878$ К с повышением давления $P = 1,33...133$ Па в системе.

4. Полученные экспериментальные данные по возгонке КСО в целом соответствуют показателям равновесной фазовой диаграммы *VLE* «жидкость–газ» для бинарного сплава Sb–Sn, рассчитанной по молекулярной модели объемного взаимодействия *MIVM*.

5. Предложен способ переработки КСО вакуумной перегонкой, предусматривающий первичную дистилляцию Sb–Sn сплава при температуре ~1000 К и давлении ~1 Па с получением сурьмянистого концентрата (99,99 мол.% Sb) и двукратной возгонкой остатка при температуре 1130 и 1280 К с образованием оловянного концентрата (99,9 мол.% Sb).

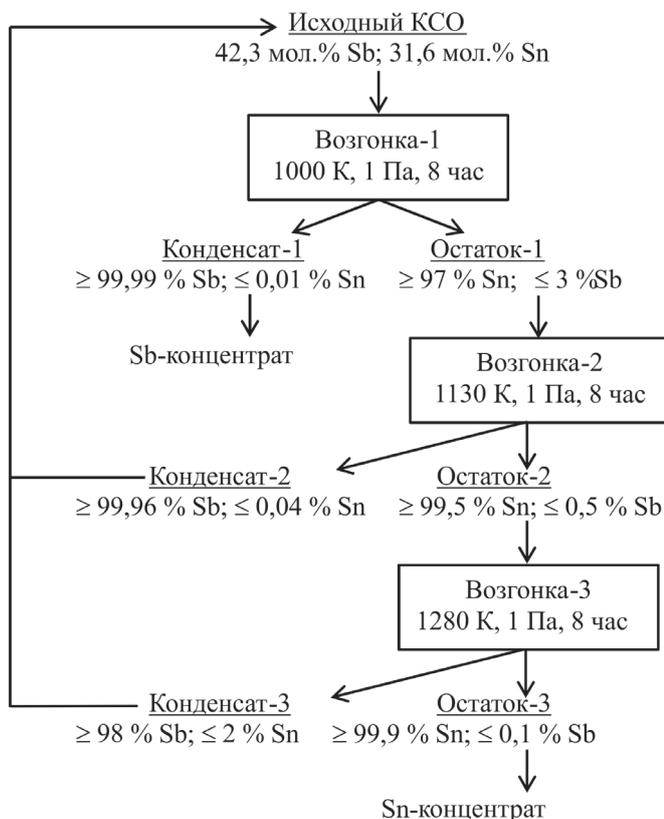


Рис. 4. Схема переработки сурьмяно-оловянных сплавов

Fig. 4. The scheme of processing of antimony-tin alloy

Список литературы

1. *Berman A.* Total pressure measurements in vacuum technology. – 1st ed. – New York: Academic Press, 1985. – 412 p. – ISBN 9781483273792.
2. *Winkler O., Bakish R.* Vacuum metallurgy. – Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 1971. – 906 p. – ISBN-10: 0444408576. – ISBN-13: 978-0444408570.
3. *Jia G.-b., Yang B., Liu D.-c.* Deeply removing lead from Pb-Sn alloy with vacuum distillation // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2013. – Vol. 23, iss. 6. – P. 1822–1831. – doi: 10.1016/S1003-6326(13)62666-7.
4. Process optimization for vacuum distillation of Sn-Sb alloy by response surface methodology / A. Wang, Y. Li, B. Yang, B. Xu, L. Kong, D. Liu // Vacuum. – 2014. – Vol. 109. – P. 127–134. – doi: 10.1016/j.vacuum.2014.07.013.
5. *Dai Y.N.* Vacuum metallurgy of nonferrous metals. – Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009. – P. 72.
6. Recycling of metals from waste Sn-based alloys by vacuum separation / B. Yang, L.-x. Kong, B.-q. Xu, D.-c. Liu, Y.-N. Dai // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2015. – Vol. 25, iss. 4. – P. 1315–1324. – doi: 10.1016/S1003-6326(15)63730-X.
7. Research on the removal of impurities from crude nickel by vacuum distillation / D.C. Liu, B. Yang, F. Wang, Q.C. Yu, L. Wang, Y.N. Dai // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 32. – P. 363–371. – doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.570.
8. *Dai Y.N., Yang B.* Non-ferrous metals and vacuum metallurgy. – Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. – P. 40.
9. *Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M.M.* Introduction to chemical engineering thermodynamics. – 6th ed. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 749 p. – ISBN-10: 0000053759. – ISBN-13: 978-0000053756.
10. *Tao D.P.* A new model of thermodynamics of liquid mixtures and its application to liquid alloys // Thermochimica Acta. – 2000. – Vol. 363, iss. 1–2. – P. 105–113. – doi: 10.1016/S0040-6031(00)00603-1.
11. Determination and modeling of the thermodynamic properties of liquid calcium–antimony alloys / S. Poizeau, H.J. Kim, J.M. Newhouse, B.L. Spatocco, D.R. Sadoway // Electrochimica Acta. – 2012. – Vol. 76. – P. 8–15. – doi: 10.1016/j.electacta.2012.04.139.
12. Thermodynamic properties of calcium–magnesium alloys determined by emf measurements / J.M. Newhouse, S. Poizeau, H. Kim, B.L. Spatocco, D.R. Sadoway // Electrochimica Acta. – 2013. – Vol. 91. – P. 293–301. – doi: 10.1016/j.electacta.2012.11.063.
13. Thermoelectric property of bulk CaMgSi intermetallic compound / N. Miyazaki, N. Adachi, Y. Todaka, H. Miyazaki, Y. Nishino // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 691. – P. 914–918. – doi: 10.1016/j.jallcom.2016.08.227.
14. Materials science and technology: a comprehensive treatment. Vol. 1. Structure of solids / ed. by V. Gerold. – Weinheim: VCH, 1993. – 621 p.
15. Selected values of the thermodynamic properties of binary alloys / R. Hultgren, P.D. Desai, D.T. Hawkins, M. Geiser, K.K. Kelley. – Metals Park, OH: American Society for Metals, 1973. – 1435 p.
16. *Dai Y., Yang B.* Vacuum metallurgy for non-ferrous metals and materials. – Beijing: Metallurgical industry Press, 2000. – 124 p. (In Chinese).
17. Application of molecular interaction volume model in vacuum distillation of Pb-based alloys / H.W. Yang, B. Yang, B.Q. Xu, D.C. Liu, D.P. Tao // Vacuum. – 2012. – Vol. 86, iss. 9. – P. 1296–1299. – doi: 10.1016/j.vacuum.2011.11.017.
18. *Королев А.А., Краюхин С.А., Мальцев Г.И.* Равновесные системы «газ–жидкость» для сплава Sb-Ag при вакуумной дистилляции // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 68–83. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-68-83.
19. Measurement and modeling of phase equilibria for Sb-Sn and Bi-Sb-Sn alloys in vacuum distillation / C.B. Nan, H. Xiong, B.-q. Xu, B. Yang, D.C. Liu, H.W. Yang // Fluid Phase Equilibria. – 2017. – Vol. 442. – P. 62–67. – doi: 10.1016/j.fluid.2017.03.016.
20. Kinetics of Pb evaporation from Pb-Sn liquid alloy in vacuum distillation / J.Y. Zhao, H.W. Yang, C.B. Nan, B. Yang, D.C. Liu, B.-q. Xu // Vacuum. – 2017. – Vol. 141. – P. 10–14. – doi: 10.1016/j.vacuum.2017.03.004.
21. Vapor–liquid phase equilibria of binary tin–antimony system in vacuum distillation: experimental investigation and calculation / L.-x. Kong, J. Xu, B.-q. Xu, S. Xu, B. Yang // Fluid Phase Equilibria. – 2016. – Vol. 415. – P. 176–183. – doi: 10.1016/j.fluid.2016.02.012.
22. Experimental and modeling vapor–liquid equilibria: separation of Bi from Sn by vacuum distillation / C.B. Nan, H.W. Yang, B. Yang, D. Liu, H. Xiong // Vacuum. – 2017. – Vol. 135. – P. 109–114. – doi: 10.1016/j.vacuum.2016.10.035.
23. Study on azeotropic point of Pb–Sb alloys by ab-initio molecular dynamic simulation and vacuum distillation / B. Song, N. Xu, W. Jiang, B. Yang, X. Chen, B. Xu, L. Kong, D. Liu, Y. Dai // Vacuum. – 2016. – Vol. 125. – P. 209–214. – doi: 10.1016/j.vacuum.2016.01.004.

24. Experimental investigation and calculation of vapor–liquid equilibria for Cu–Pb binary alloy in vacuum distillation / C. Zhang, W.L. Jiang, B. Yang, D.C. Liu, B.Q. Xu, H.W. Yang // *Fluid Phase Equilibria*. – 2015. – Vol. 405. – P. 68–72. – doi: 10.1016/j.fluid.2015.07.043.

25. Диаграммы состояния двойных металлических систем. В 3 т. Т. 1: справочник / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с. – ISBN 5-217-02688-X.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Processing of Antimony-tin Concentrates by Vacuum Distillation

Alexey Korolev^{1, a}, Gennady Maltsev^{1, b, *}, Konstantin Timofeev^{1, c}, Vladimir Lobanov^{2, d}

¹ JSC "Uralelektromed", 1 Prospect Uspensky, Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russian Federation

² Ural Federal University, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-0338-9774>,  gennadymaltsev@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-0750-0070>,  mgi@elem.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-9525-6476>,  K.Timofeev@elem.ru, ^d  <http://orcid.org/0000-0001-6450-8434>,  lobanov-vl@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22 December 2017

Revised: 20 January 2018

Accepted: 08 February 2018

Available online: 15 March 2018

Keywords:

Diagram
Model
Vacuum
Alloy
Distillation
Tin
Antimony
Separation
Concentrate

ABSTRACT

Object of research: the paper is devoted to the creation of environmentally friendly, technologically efficient and cost-effective high-performance integrated circuits for the processing of concentrate antimony-tin (CAT) generated in the control filtering in the chemical and metallurgical shop, with commercial production of single-element products of antimony and tin. To analyze the behavior of multicomponent alloy in the processing, study of values of pressure and temperature, prediction of product composition and degree of separation of the metals during the high temperature sublimation the equilibrium phase diagrams *VLE* (vapor liquid equilibrium), in particular, the temperature–composition "*T–x*" are calculated. Objective: to study the influence of temperature and pressure in the system on the completeness of extraction and the degree of separation of antimony and tin from the CAT. **Methods and approaches:** in constructing the equilibrium phase diagrams *VLE* calculation of the activity coefficients of the components of the Sb–Sn alloy was performed using three-dimensional model of molecular interaction volume model (*MIVM*). **Novelty:** provide new information on the influence of temperature and vacuum depth on the degree of sublimation and separation of metals from Sb–Sn compositions of different composition. **Main results:** in the temperature range 823...1073 K the saturated vapor pressure (Pa) Sn $(0.00332...81.193) \cdot 10^{-6}$ and Sb $(3.954...273.664)$ are calculated. High values of $P_{Sb} / P_{Sn} = (118.976...0.337) \cdot 10^7$ and the separation factor $\log \beta_{Sb} = 6.262...9.435$ assume the theoretical possibility to separate these components by vacuum distillation, while the antimony is concentrated in the composition of the sublimates ($\beta_{Sb} > 1$), and tin – the distillation residue. The tin content in the gas phase, the mole fraction (m. f.): $y_{Sn} = (0.002...9498.3) \cdot 10^{-4}$, increases in the temperature interval of 921–1878 K, pressure of 1.33...133 Pa and the amount of metal (m. f.) in the alloy $x_{Sn} = 0.9...0.9999$. According to the values of the *MIVM* $\gamma_{Sb} = 0.439...0.992$ and $\gamma_{Sn} = 0.433...0.992$ for Sb–Sn alloy composition of 0.1...0.9 in the studied temperature range. **Practical relevance:** the equilibrium diagrams *VLE* are used in the preliminary stages of designing optimal technological regimes of industrial installations for vacuum distillation and for a reasonable choice of temperature and pressure of sublimation with the goal of obtaining Sn- and Sb-containing products of a given composition. The concept of CAT refining vacuum distillation is proposed.

For citation: Korolev A.A., Maltsev G.I., Timofeev K.L., Lobanov V.G. Processing of antimony-tin concentrates by vacuum distillation. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 6–21. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-6-21. (In Russian).

* Corresponding author

Maltsev Gennady I., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
 JSC "Uralelektromed",
 1 Prospect Uspensky,
 624091, Verkhnyaya Pyshma, Russian Federation
 Tel.: 8 (922) 144-60-65, e-mail: mgi@elem.ru

References

1. Berman A. *Total pressure measurements in vacuum technology*. 1st ed. New York, Academic Press, 1985. 412 p. ISBN 9781483273792.
2. Winkler O., Bakish R. *Vacuum metallurgy*. Amsterdam, Elsevier Science Ltd., 1971. 906 p. ISBN-10: 0444408576. ISBN-13: 978-0444408570.
3. Jia G.-b., Yang B., Liu D.-c. Deeply removing lead from Pb-Sn alloy with vacuum distillation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, vol. 23, iss. 6, pp. 1822–1831. doi: 10.1016/S1003-6326(13)62666-7.
4. Wang A., Li Y., Yang B., Xu B., Kong L., Liu D. Process optimization for vacuum distillation of Sn–Sb alloy by response surface methodology. *Vacuum*, 2014, vol. 109, pp. 127–134. doi: 10.1016/j.vacuum.2014.07.013.
5. Dai Y.N. *Vacuum metallurgy of nonferrous metals*. Beijing, Metallurgical Industry Press, 2009, p 72.
6. Yang B., Kong L.-x., Xu B.-q., Liu D.-c., Dai Y.-n. Recycling of metals from waste Sn-based alloys by vacuum separation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, vol. 25, iss. 4, pp. 1315–1324. doi: 10.1016/S1003-6326(15)63730-X.
7. Liu D.C., Yang B., Wang F., Yu Q.C., Wang L., Dai Y.N. Research on the removal of impurities from crude nickel by vacuum distillation. *Physics Procedia*, 2012, vol. 32, pp. 363–371. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.570.
8. Dai Y.N., Yang B. *Non-ferrous metals and vacuum metallurgy*. Beijing, Metallurgical Industry Press, 2000, p. 40.
9. Smith J.M., Van Ness H.C., Abbott M.M. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. 6th ed. New York, McGraw-Hill, 2001. 749 p. ISBN-10: 0000053759, ISBN-13: 978-0000053756.
10. Tao D.P. A new model of thermodynamics of liquid mixtures and its application to liquid alloys. *Thermochimica Acta*, 2000, vol. 363, iss. 1–2, pp. 105–113. doi: 10.1016/S0040-6031(00)00603-1.
11. Poizeau S., Kim H.J., Newhouse J.M., Spatocco B.L., Sadoway D.R. Determination and modeling of the thermodynamic properties of liquid calcium–antimony alloys. *Electrochimica Acta*, 2012, vol. 76, pp. 8–15. doi: 10.1016/j.electacta.2012.04.139.
12. Newhouse J.M., Poizeau S., Kim H., Spatocco B.L., Sadoway D.R. Thermodynamic properties of calcium–magnesium alloys determined by emf measurements. *Electrochimica Acta*, 2013, vol. 91, pp. 293–301. doi: 10.1016/j.electacta.2012.11.063.
13. Miyazaki N., Adachi N., Todaka Y., Miyazaki H., Nishino Y. Thermoelectric property of bulk CaMgSi intermetallic compound. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 691, pp. 914–918. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.08.227.
14. Gerold V., ed. *Materials science and technology: a comprehensive treatment*. Vol. 1. *Structure of solids*. Weinheim, VCH, 1993. 621 p.
15. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., Geiser M., Kelley K.K. *Selected values of the thermodynamic properties of binary alloys*. 1st ed. Metals Park, OH, American Society for Metals, 1973. 1435 p.
16. Dai Y., Yang B. *Vacuum metallurgy for non-ferrous metals and materials*. Beijing, Metallurgical industry Press, 2000. 124 p. (In Chinese).
17. Yang H.W., Yang B., Xu B.Q., Liu D.C., Tao D.P. Application of molecular interaction volume model in vacuum distillation of Pb-based alloys. *Vacuum*, 2012, vol. 86, iss. 9, pp. 1296–1299. doi:10.1016/j.vacuum.2011.11.017.
18. Korolev A.A., Krayukhin S.A., Maltsev G.I. Ravnovesnye sistemy “gaz–zhidkost” dlya splava Sb-Ag pri vakuumnoi distillyatsii [The equilibrium of the system “gas–liquid” for alloy Sb-Ag under vacuum distillation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 4 (77), pp. 68–83. doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-68-83.
19. Nan C.B., Xiong H., Xu B.-q., Yang B., Liu D.C., Yang H.W. Measurement and modeling of phase equilibria for Sb-Sn and Bi-Sb-Sn alloys in vacuum distillation. *Fluid Phase Equilibria*, 2017, vol. 442, pp. 62–67. doi: 10.1016/j.fluid.2017.03.016.
20. Zhao J.Y., Yang H.W., Nan C.B., Yang B., Liu D.C., Xu B.-q. Kinetics of Pb evaporation from Pb-Sn liquid alloy in vacuum distillation. *Vacuum*, 2017, vol. 141, pp. 10–14. doi: 10.1016/j.vacuum.2017.03.004.
21. Kong L.-x., Xu J., Xu B.-q., Xu S., Yang B. Vapor–liquid phase equilibria of binary tin–antimony system in vacuum distillation: experimental investigation and calculation. *Fluid Phase Equilibria*, 2016, vol. 415, pp. 176–183. doi: 10.1016/j.fluid.2016.02.012.
22. Nan C.B., Yang H.W., Yang B., Liu D., Xiong H. Experimental and modeling vapor–liquid equilibria: separation of Bi from Sn by vacuum distillation. *Vacuum*, 2017, vol. 135, pp. 109–114. doi: 10.1016/j.vacuum.2016.10.035.
23. Song B., Xu N., Jiang W., Yang B., Chen X., Xu B., Kong L., Liu D., Dai Y. Study on azeotropic point of Pb–Sb alloys by ab-initio molecular dynamic simulation and vacuum distillation. *Vacuum*, 2016, vol. 125, pp. 209–214. doi: 10.1016/j.vacuum.2016.01.004.



24. Zhang C., Jiang W.L., Yang B., Liu D.C., Xu B.Q., Yang H.W. Experimental investigation and calculation of vapor–liquid equilibria for Cu–Pb binary alloy in vacuum distillation. *Fluid Phase Equilibria*, 2015, vol. 405, pp. 68–72. doi: 10.1016/j.fluid.2015.07.043.

25. Lyakishev N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem*. V 3 t. T. 1 [Phase diagrams of binary metallic systems. In 3 vol. Vol. 1]. Reference book. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. 992 p. ISBN 5-217-02688-X.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей

Пётр Еремейкин^{1, a, *}, Аягма Жаргалова^{2, b}, Сергей Гаврюшин^{1, 2, c}

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, г. Москва, 101990, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-6291-8309>, eremeykin@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmstu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-6547-1351>, gss@bmstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.941.01

История статьи:

Поступила: 15 декабря 2017

Рецензирование: 17 января 2018

Принята к печати: 15 февраля 2018

Доступно онлайн: 15 марта 2018

Ключевые слова:

Назначение режимов резания
 Токарная обработка
 Технологические деформации
 Тонкостенная деталь
 Программная система
 Эксперимент
 Режимы резания

Благодарности:

Коллектив авторов выражает благодарность к.т.н. Семисалову Виталию Ивановичу и токарю Комарову Владимиру Яковлевичу за техническую помощь.

Финансирование:

Работа выполнена в рамках гранта «Автоматизация мониторинга технических систем и технологических процессов в рамках концепции цифрового производства» № 2.7918.2017/8.9.

АННОТАЦИЯ

Введение. В авиационной, космической, энергомашиностроительной и других отраслях промышленности широко используются относительно податливые изделия в первую очередь в форме тонкостенных оболочек. Для подобных деталей актуальна задача минимизации характерных технологических деформаций, сопровождающих процесс обработки и связанных с искажением формы заготовки. С целью минимизации технологических деформаций и рисков используется специализированная дополнительная оснастка, что существенно повышает трудоёмкость изготовления изделий. В работе рассматривается альтернативный способ снижения технологических деформаций посредством использования «мягких» режимов обработки, подразумевающий выбор рациональных параметров резания и условий закрепления на основе результатов численного моделирования. Предложенный метод может быть востребован для этапа проектирования технологических процессов и отвечает современным тенденциям цифрового производства в рамках Национальной технологической инициативы. Для успешного внедрения предлагаемого подхода была разработана интегрированная система поддержки принятия решений о выборе режимов механической обработки тонкостенных деталей, которая позволяет технологам оперативно оценивать применимость выбранных режимов резания с учетом податливости заготовки. **Цель работы:** экспериментальная проверка работоспособности разработанной системы и метода «мягких» режимов обработки. **В работе рассматривается** случай черновой токарной обработки полой цилиндрической заготовки, закрепленной в трехкулачковом патроне. **Методы исследования:** эксперимент проведен на специально подготовленном стенде, в состав которого входят: токарный станок, трехкулачковый патрон, штатив и измерительная головка. Измерения отклонений проводятся в заранее определенных точках на поверхности заготовки с применением измерительной головки. **Результаты и обсуждение.** Результаты эксперимента представлены в графическом виде. На графиках отклонений показаны теоретические и экспериментальные кривые для различных сечений заготовки. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований с расчетными данными, полученными с помощью численного моделирования технологического процесса, позволяет сделать вывод о целесообразности использования «мягких» режимов при токарной обработке податливых деталей.

Для цитирования: Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 22–32. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32.

*Адрес для переписки

Еремейкин Пётр Александрович, аспирант
 Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
 Малый Харитоньевский переулок, д. 4,
 101990, г. Москва, Россия
 Тел.: 8 (916) 662-57-38, e-mail: eremeykin@gmail.com

Введение

С развитием авиационной и космической промышленности конструкционные требования к тонкостенным деталям становятся все более жесткими [1], а экономические ограничения,

продиктованные политикой импортозамещения и перехода к тенденциям цифрового производства в рамках Национальной технологической инициативы, существенно влияют на выбор применяемого метода обработки. Поэтому механообработка тонкостенных деталей – распространенный объект рассмотрения ряда современных научных и прикладных исследований. К работе по проектированию технологических процессов привлекаются специалисты, имеющие обширные знания в каждой из узких областей, связанных с формированием параметров объектов производства. Информация о свойствах, полученных при воздействии на них, содержится в численном виде во множестве таблиц и полученных на их обобщении формул, для использования которых необходимо обращаться к справочной литературе, что приводит к значительным затратам времени.

Механическая обработка тонкостенных деталей всегда представляет особые трудности для технологов: для обработки тонкостенных деталей неприменимы традиционные, хорошо освоенные методы закрепления детали, а также режимы резания, полученные с помощью типовых расчетов [2]. Деформации, вызываемые силами резания и закрепления, существенно влияют на результирующую точность размеров и могут стать решающим фактором, вследствие которого деталь будет признана браком.

Как показывает обзор литературы [3, 4, 5], для обработки тонкостенных деталей технологи применяют несколько производственных приемов, позволяющих снизить влияние упругих деформаций. Например, к таким приемам относят заполнение заготовки плавким технологическим материалом, закрепление в сырых кулачках или разжимной оправке. Указанные методы связаны с ростом затрат на изготовление детали, так как для их применения требуется дополнительная оснастка. Особенно ярко это проявляется для единичного и мелкосерийного производства.

Современные исследования в области обработки тонкостенных деталей часто затрагивают анализ технологических деформаций с помощью CAE (Computer-aided engineering) продуктов [6–10]. Например, в статье [6] продемонстрирована возможность применения системы *Abaqus* для анализа деформаций и сил, возникающих при фрезеровании тонкостенной заготовки. Применимость метода конечных элементов (МКЭ) [11,

12] для анализа технологических деформаций также подтверждена хорошим соответствием теоретического и экспериментального результата, статья [13]. Исследователи заинтересованы в поиске нового метода производства нежестких деталей: авторы статьи [14] рассматривают применимость аддитивных технологий для изготовления такого рода деталей. Тем не менее ввиду новизны и относительно слабого развития аддитивных технологий этот метод не способен обеспечить удовлетворительной шероховатости и изотропной структуры без дополнительной механической обработки даже при применении термообработки. В работе [15] затрагиваются вопросы влияния различных стратегий обработки и способов закрепления на качество обработанной детали.

В настоящее время предложен метод «мягких» режимов резания [16], на котором будет сосредоточено основное внимание настоящей статьи. В основе метода лежит рациональный выбор режимов обработки, для которого используются результаты численного моделирования деформаций, возникающих при обработке. С таким подходом предлагается отказаться от применения дополнительной оснастки, что положительно скажется на стоимости детали. Как было показано в статье [17], для успешного внедрения метода «мягких» режимов обработки требуется программная система, разработка которой описана в работе [18].

Предложенный авторами статьи [16] подход предполагается использовать для определения режимов обработки полых тонкостенных цилиндрических заготовок. В дальнейшем планируется данную методику применить для обработки вафельных конструкций.

Цель исследования состоит в экспериментальной проверке работоспособности разработанной системы и метода «мягких» режимов обработки. При этом решаются задачи определения методики проведения экспериментов, установления способа измерения деформаций, разработки устройства экспериментальной установки и интерпретации результатов.

Методика исследований

Метод расчета «мягких» режимов обработки реализован в интегрированной системе поддержки принятия решений выбора [19], которая

позволяет управлять цифровым макетом изделия: 3D-моделирование деталей, виртуального моделирования и инженерного анализа. На сегодняшний день цифровое интеллектуальное проектирование – это инструменты, которые должны помогать создавать конкурентоспособные изделия во всех отраслях машиностроения.

Для моделирования в нашей системе требуется задать следующие параметры процесса: размеры заготовки, ее материал, силу зажатия кулачков и их геометрические характеристики, а также силу резания. Эти параметры следует контролировать во время проведения испытаний, для того чтобы максимально приблизить условия эксперимента к условиям моделируемого процесса. Графический интерфейс пользователя программы представлен на рис. 1, на котором обозначены следующие окна: 1 – окно ввода исходных данных для модуля расчета режимов резания; 2 – окно результатов модуля расчета режимов резания; 3 – окно редактора параметров; 4 – окно текстового вывода; 5 – окно гра-

фического модуля. Подробнее с функционалом и устройством программы можно ознакомиться в работах [17, 18].

Для проведения эксперимента была выбрана наиболее простая форма тонкостенной заготовки типа тело вращения – полый цилиндр. Размеры заготовки показаны на рис. 2. Материал заготовки – сталь 30ХГС.

Для анализа результатов работы программы и экспериментально полученных данных требуется измерять отклонения формы заготовки, поэтому были определены контрольные точки на поверхности заготовки, положение которых также показано на рис. 2. Точки измерения отстоят друг от друга в направлении оси заготовки на 7 мм и распределены равномерно по окружности с шагом 30° (как показано на рис. 2). Кулачок захватывает деталь на 15 мм. Усилие зажима в трехкулачковом патроне рассчитывается исходя из условия неподвижности заготовки после составления уравнений равновесия. Контроль усилия зажима осуществляется при помощи динамометрического ключа.

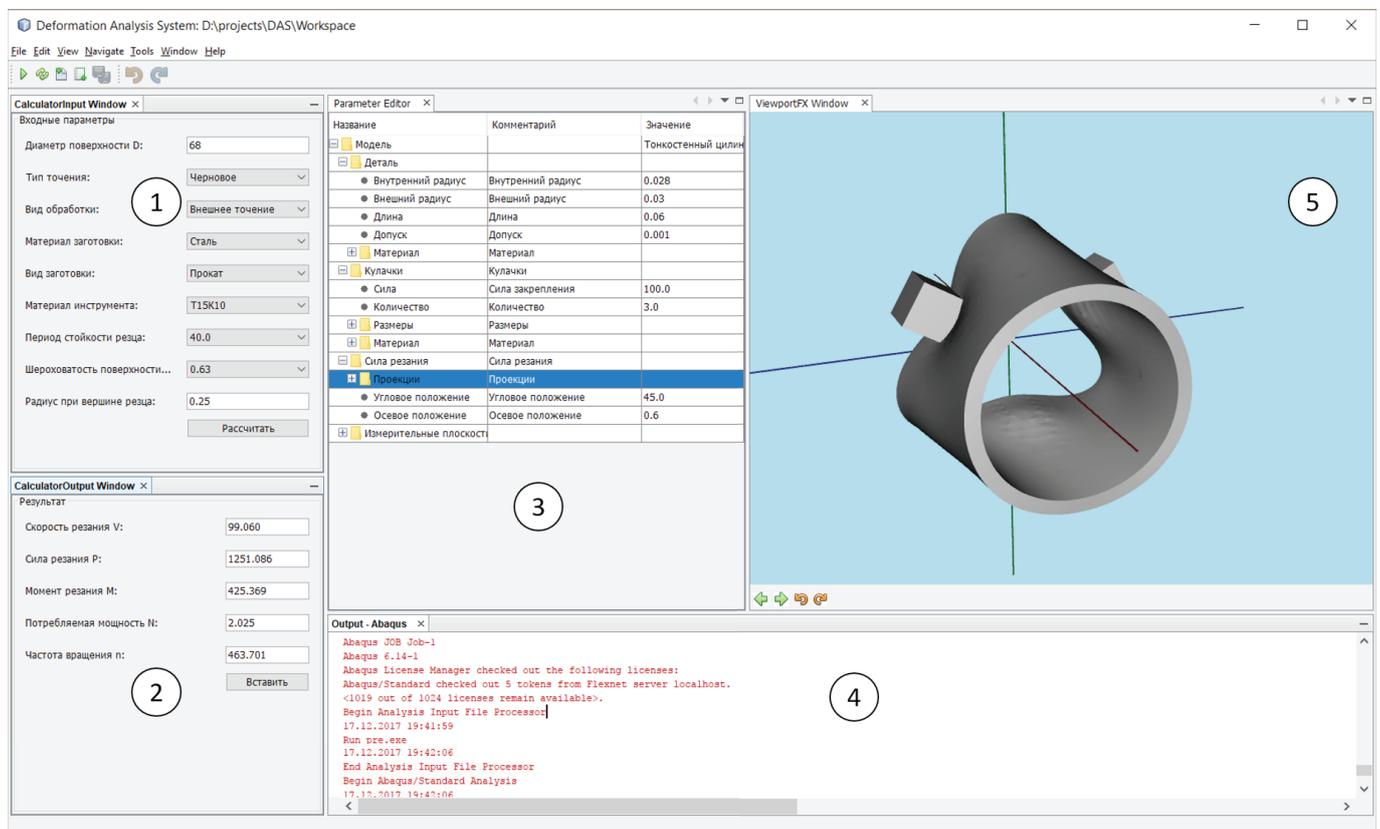


Рис. 1. Графический интерфейс системы анализа деформаций
 Fig. 1. Graphical user interface of the deformation analysis system

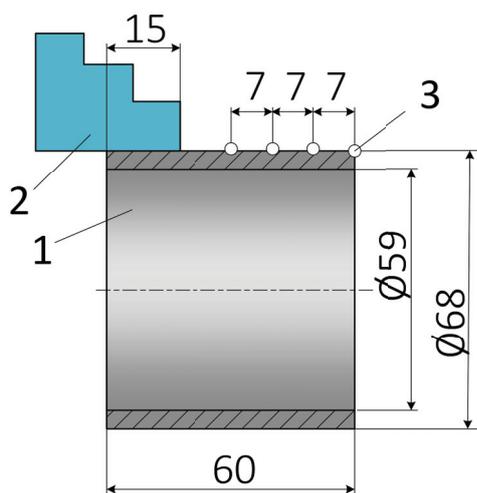


Рис. 2. Эскиз детали:

1 – заготовка; 2 – кулачок токарного патрона; 3 – точки измерения деформаций

Fig. 2. Sketch of the workpiece:

1 – workpiece; 2 – jaw; 3 – checkpoints

Исходя из общефизических положений и расчетных формул традиционной таблично-аналитической методики [20, 21] можно сделать вывод, что наиболее остро вопрос о деформациях тонкостенных деталей стоит при высокой подаче и глубине резания. Поэтому для эксперимента выбраны режимы резания, характерные для черновой обработки. Режимы резания были получены при помощи расчетного модуля, входящего в состав разработанной программной системы. Результат расчета представлен на рис. 3.

Частота вращения округлена до наиболее близкой, которая может быть выставлена на

станке. Так как расчетный модуль использует таблично-аналитическую методику, подача и глубина резания выбраны из ряда допустимых значений и не требуют округления. Результирующие режимы резания приведены в таблице.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. Деформации детали, зажатой в патроне, измеряются при помощи измерительной головки, закрепленной на штативе. Контрольные точки равномерно распределены в четырех сечениях. Угловое положение детали изменяется вручную поворотом патрона на 30° , которые отсчитывается по градусному лимбу на фланце трехкулачкового патрона.

Измерение деформаций заготовки происходит на четырех стадиях: а) до зажатия кулачков, при этом деталь удерживается патроном станка с минимально возможным усилием; б) сразу после зажатия кулачков до обработки; в) после обработки в закрепленном состоянии; г) после обработки в свободном состоянии с минимальным зажимом.

Таким образом, эксперимент составляет следующую последовательность действий:

- 1) установить заготовку в патрон токарного станка с минимальным зажимом;
- 2) выставить положение измерительного щупа на нулевом сечении детали (т. е. непосредственно на свободном торце);
- 3) выставить 0 на измерительной головке;
- 4) повернуть заготовку на 30° по шкале патрона;

CalculatorInput Window ×		CalculatorOutput Window ×	
Входные параметры		Результат	
Диаметр поверхности D:	68	Скорость резания V:	104.926
Тип точения:	Черновое	Сила резания P:	1236.772
Вид обработки:	Внешнее точение	Момент резания M:	420.503
Материал заготовки:	Сталь	Потребляемая мощн...:	2.120
Вид заготовки:	Прокат	Частота вращения n:	823.451
Материал инструмента:	T15K10	Подача S:	0.4
Период стойкости резца:	30.0	Глубина резания t:	1
Шероховатость поверхнос...:	0.63		
Радиус при вершине резца:	0.25		
	<input type="button" value="Рассчитать"/>		<input type="button" value="Вставить"/>

Рис. 3. Результат расчета режимов резания в программе

Fig. 3. The result of cutting modes calculation

Режимы резания Cutting modes

Обозначения	Параметр	Значение	
		Режимы, определенные по таблично-аналитической методике	Мягкие режимы
n	Частота вращения шпинделя	700 об/мин	800 об/мин
S	Подача	0,9 мм/об	0,4 мм/об
t	Глубина резания	1,25 мм	1 мм

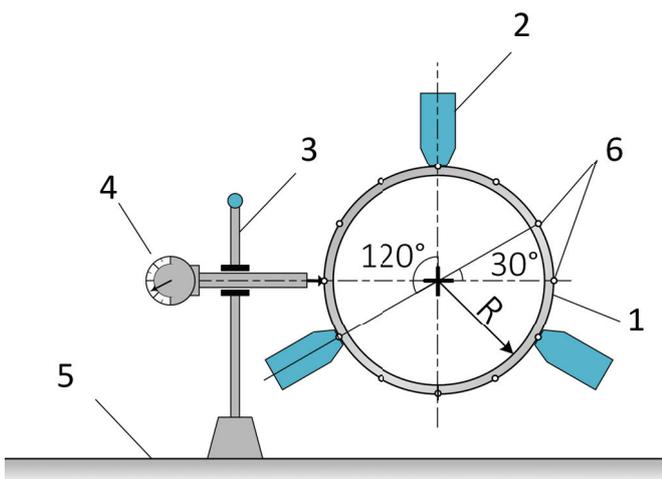


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – цилиндрическая заготовка; 2 – кулачок токарного патрона; 3 – штатив; 4 – измерительная головка; 5 – станина токарного станка; 6 – точки измерения

Fig. 4. The scheme of the experimental facility:

1 – cylindrical workpiece; 2 – chuck jaw; 3 – stand; 4 – indicator head; 5 – lathe base; 6 – checkpoints

5) записать показания на индикаторной головке;

6) повторить пп. 4, 5, пока измерительный щуп не вернется в исходное положение относительно детали;

7) сдвинуть деталь в направлении движения подачи на 7 мм;

8) повторить измерения, описанные в пп. 4–6 еще для трех сечений;

9) зажать заготовку и повторить измерения в пп. 2–8;

10) обработать заготовку, повторить измерения в пп. 2–8;

11) разжать заготовку до минимального усилия, но таким образом, чтобы она удерживалась в патроне, повторить измерения в пп. 2–8.

Результаты и их обсуждение

Примеры обработанных деталей показаны на рис. 5. Слева изображена деталь, обработанная на стандартных режимах резания, а справа – на «мягких» режимах, указанных в таблице. Анализ показывает, что применение мягких режимов резания позволяет повысить качество поверхности детали. Однако главная цель подхода заключается не в повышении качества поверхности, которое достигается при финишной обработке, а в снижении огранки, вызванной технологическим деформированием.

Характерные значения перемещений, описывающие процесс упругой деформации, представлены на рис. 6 и 7 для сечений 0 и 21 мм соответственно. На графиках показаны полученные в ходе эксперимента отклонения в зависимости от углового положения заготовки. Теоретические кривые были построены при помощи численного моделирования в программе для ЭВМ [21].

Наибольшие расхождения возникают на крайнем сечении 21 мм и вызваны нестационарным характером начального этапа обработки.

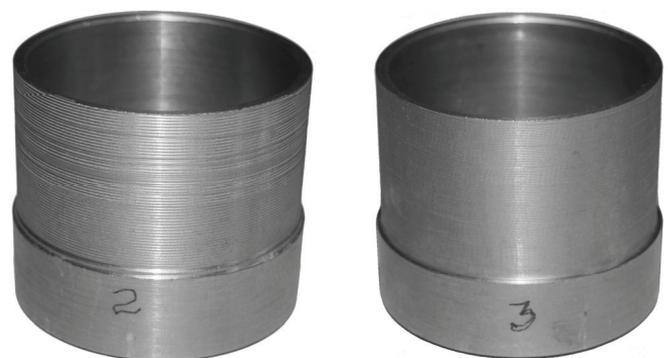


Рис. 5. Примеры обработанных деталей

Fig. 5. The samples of processed workpieces

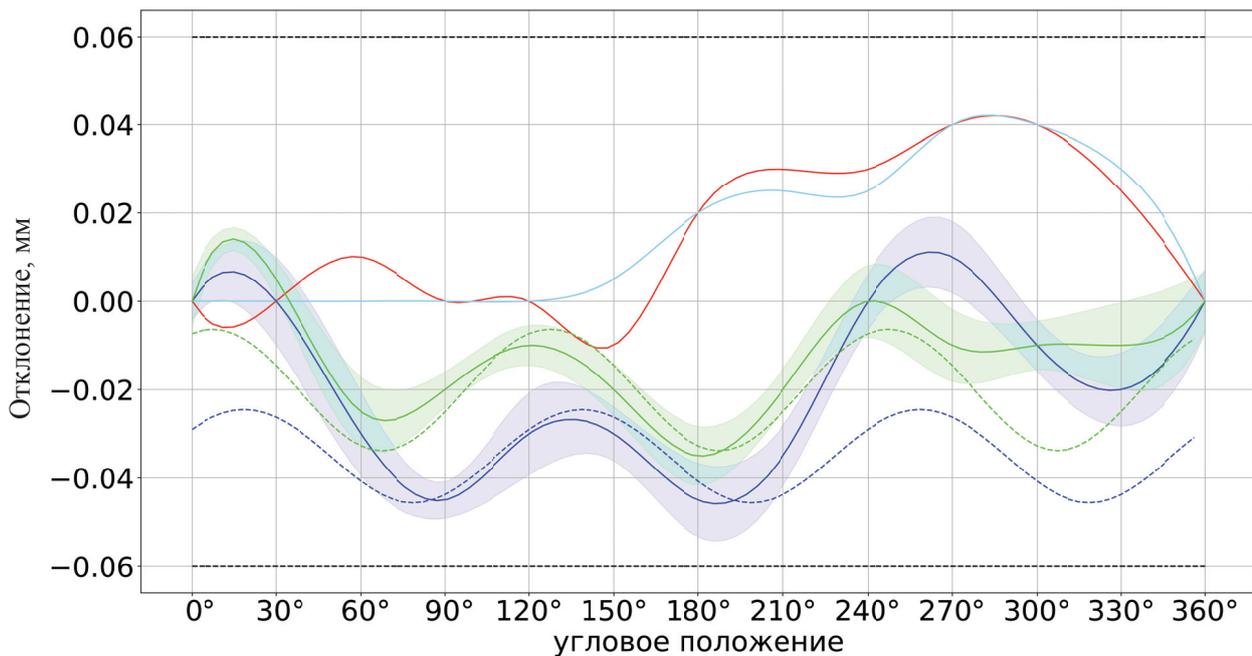


Рис. 6. График измеренных отклонений для сечения 0 мм

Fig. 6. The chart of measured deflections at 0 mm section

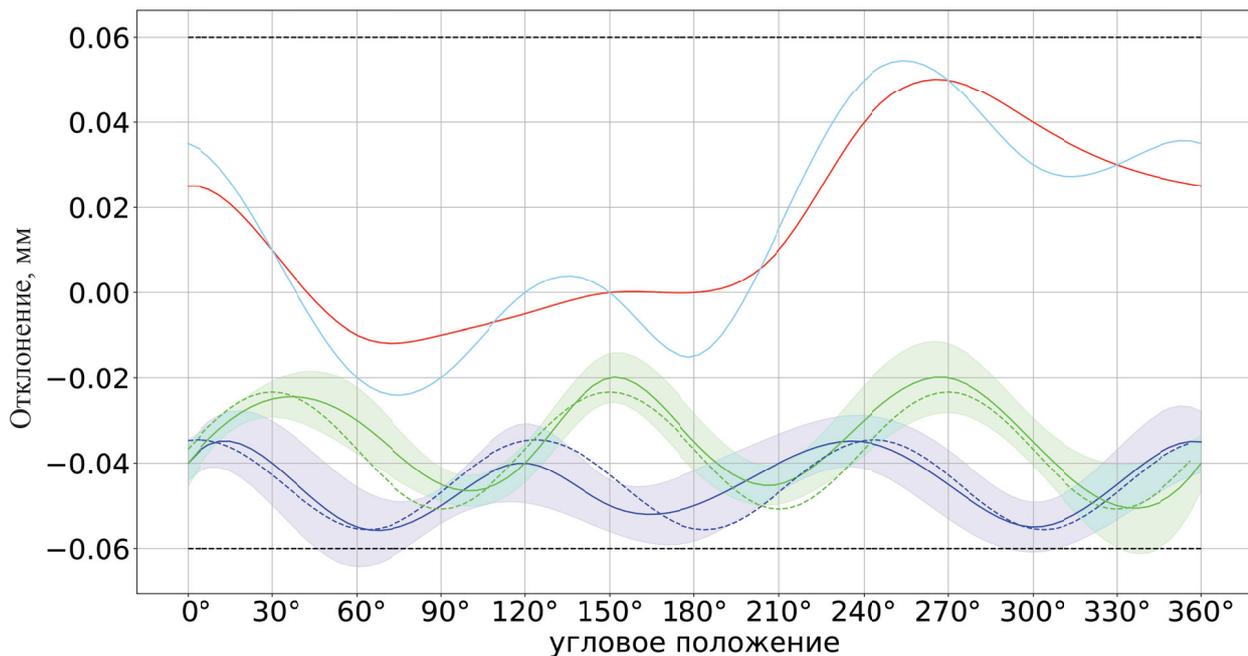


Рис. 7. График отклонений для сечения 21 мм

Fig. 7. The chart of measured deflections at 21 mm section

Обозначения на графиках, рис. 6 и 7 / Indications on charts:

- свободная до обработки / Free before treatment
- зажатая до обработки / Chucked before treatment
- зажатая после обработки / Chucked after treatment
- свободная после обработки / Free after treatment
- - - зажатая после обработки (теор.) / Chucked after treatment (theoretical)
- - - свободная после обработки (теор.) / Free after treatment (theoretical)

Кривые, соответствующие необработанной заготовке до закрепления и после, подтверждают, что тонкостенная заготовка существенно деформируется под действием силы закрепления: голубая кривая относительно красной приобретает минимумы, обусловленные воздействием кулачков токарного патрона. Это явно видно на рис. 7 для сечения, наиболее близкого к кулачкам.

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментом показывает хорошее совпадение для стационарного процесса резания, относительная погрешность в этом случае не превышает 24 %.

В целом форма и периодичность полученных эмпирических кривых соответствует результату численного моделирования, что позволяет говорить о подтверждении работоспособности программной системы для анализа режимов резания тонкостенных заготовок.

Выводы

Метод мягких режимов резания был предложен в качестве альтернативного подхода для обработки тонкостенных деталей и расширяет возможности технолога в выборе способа изготовления в первую очередь в единичном и мелкосерийном производстве. Применение указанного способа целесообразно, для того чтобы избежать необходимости разрабатывать и закупать специализированную оснастку при производстве небольших партий изделий. Вместе с тем для внедрения метода мягких режимов резания потребуется применение специализированной программной системы, что накладывает ограничения на программную инфраструктуру предприятия. Применение метода мягких режимов рекомендуется рассматривать в том случае, если величина пружинения (т.е. упругого отклонения детали без снятия материала) сопоставима с глубиной резания.

В настоящей работе экспериментальные данные показали работоспособность спроектированной интегрированной программной системы, а также адекватность применяемых моделей и расчетных параметров. Полученные результаты подтверждают перспективность развиваемого метода мягких режимов механообработки тонкостенных деталей.

Список литературы

1. Machining surface quality analysis of aluminum alloy thin-walled parts in aerospace / D. Bing, Y. Guangbin, G. Yan-qi, S. Jun-peng, W. Xue-mei, L. Yu-xin // *International Journal of Security and Its Applications*. – 2015. – Vol. 9, N 11. – P. 201–208. – doi: 10.14257/ijisia.2015.9.11.19.
2. Технология машиностроения. В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / под общ. ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 370 с. – ISBN 978-5-7038-3442-8.
3. Кузнецов Ю.И., Мослов А.Р., Бойков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с. – ISBN 5-217-01114-9.
4. Евгеньев Г.Б., Гаврюшин С.С., Хоботов Е.Н. Основы автоматизации технологических процессов и производств. В 2 т. Т. 2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 479 с. – ISBN 978-5-7038-4139-6.
5. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts / S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2004. – Vol. 44, iss. 15. – P. 1629–1641. – doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.001.
6. Demyanenko E.G., Popov I.P., Menshikov V.S. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, Tomsk, Russia, 27–29 October 2016*. – Bristol, 2017. – Art. 012122. – (IOP conference series. Materials science and engineering; vol. 177). – doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012122.
7. Huang Y., Zhang X., Xiong Y. Finite element analysis of machining thin-wall parts: error prediction and stability analysis // *Finite element analysis – applications in mechanical engineering* / ed. by F. Ebrahimi. – Rijeka, Croatia: InTech, 2004. – doi: 10.5772/50374.
8. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. – 2017. – Vol. 98, iss. 3. – P. 343–352. – doi: 10.1007/s40032-016-0246-9.
9. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional numerical modeling, simulation and experimental validation of milling of a thin-wall component // *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2017. – Vol. 231, iss. 5. – P. 792–804. – doi: 10.1177/0954405416685387.
10. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining // *Procedia CIRP*. – 2014 – Vol. 14. – P. 287–292. – doi: 10.1016/j.procir.2014.03.023.

11. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. – London; New York: McGraw-Hill, 1972. – 521 p. – ISBN 978-0-0709-4138-0.

12. Bathe K.J. Finite element method procedures. – [S. l.]: Klaus-Jurgen Bathe, 2007. – 1037 p. – ISBN 978-0-9790-0490-2.

13. Izamshah R.A., Mo J.P.T., Ding S.L. Finite element analysis of machining thin-wall parts // Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 458. – P. 283–288. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283.

14. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies / A. Isaev, V. Grechishnikov, P. Pivkin, M. Kozochkin, Y. Ilyuhin, A. Vorotnikov // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 41. – P. 1023–1026. – doi: 10.1016/j.procir.2015.08.088.

15. Shamsuddin K.A., Ab-Kadir A.R., Osman M.H. A comparison of milling cutting path strategies for thin-walled aluminium alloys fabrication // The International Journal of Engineering and Science (IJES). – 2013. – Vol. 2, iss. 3. – P. 1–8.

16. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей / С.С. Гаврюшин, А.Д. Жаргалова, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 11. – С. 53–61. – doi: 10.18698/0536-1044-2015-11-53-61.

17. Жаргалова А.Д., Еремейкин П.А. Программная система автоматизированного выбора режимов механической обработки тонкостенных деталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 9–14.

18. Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. A software system for thin-walled parts deformation analysis // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education / ed. by Z. Hu, S.V. Petukhov, M. He. – Cham: Switzerland Springer Nature, 2018. – P. 259–265. – (Advances in intelligent systems and computing; vol. 658). – doi: 10.1007/978-3-319-67349-3_24.

19. Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Лазаренко Г.П. Интегрированная система поддержки принятия решения о выборе режимов механической обработки тонкостенных деталей: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663071.

20. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 418 с.

21. Гузеев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / под ред. В.И. Гузеева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 368 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Empirical Evaluation of Technological Deformations for “Soft” Cutting Modes During Thin-Walled Parts Turning

Petr Eremeykin^{1, a, *}, *Ayagma Zhargalova*^{2, b}, *Sergei Gavriushin*^{1, 2, c}

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-6291-8309>, eremeykin@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, azhargalova@bmstu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-6547-1351>, gss@bmstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 December 2017

Revised: 17 January 2018

Accepted: 15 February 2018

Available online: 15 March 2018

Keywords:

Cutting modes definition

Turning

Technological deformation

Thin-walled workpiece

Software

Experiment

Cutting modes

Acknowledgements:

The authors are grateful to *Vitalij Semisalov* and *Vladimir Komarov* for technical assistance.

Funding:

The work was carried out within grant: “Automation of technical systems and technological processes monitoring within the concept of digital manufacturing” No. 2.7918.2017 / 8.9.

ABSTRACT

Introduction. The problem of thin-walled parts processing is actual for various areas: aviation and space industries, power machine building and others. The literature review shows that modern methods of thin-walled parts processing suppose applying additional technological equipment that increases product cost. Recently the researchers have suggested a “soft” cutting modes method, which proposes a rational pick of cutting and clamping parameters. The method allows parts processing without additional equipment due to the effective selection of the technological process parameters (feed, rotation frequency, cutting depth) based on deformations numerical modeling. In previous papers, researchers described a computer system which allows a technologist superficially estimate the applicability of the chosen cutting modes and take the suppleness into account. Due to this system, a technologist is able to pick the parameters to minimize deformation of the workpiece before the processing starts. **The purpose of the paper** is to estimate the efficiency of the developed software. **The article considers** the case of a hollow cylindrical workpiece clamped by a three-jaw chuck. **The methods of investigation:** the experiment was carried out on a dedicated facility, constructed on the basis of a lathe. A dial gauge was used to measure deformations in predefined points on the workpiece surface. **Results and Discussion.** The experimental results are presented as deflection graphs. The graphs show both theoretical and experimental curves for various sections of the workpiece. The behavior and periodicity of the experimental curves fit the theoretical. The conducted experiments show that the developed software system is effective and reliable.

For citation: Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. Raschetno-eksperimental'naya otsenka tekhnologicheskikh deformatsii pri «myagkikh» rezhimakh tokarnoi obrabotki tonkostennykh detalei [Empirical evaluation of technological deformations for “soft” cutting modes during thin-walled parts turning]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 22–32. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32. (In Russian).

* Corresponding author

Eremeykin Petr A., post-graduate student
 Mechanical Engineering Research Institute
 of the Russian Academy of Sciences,
 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok,
 101990, Moscow, Russian Federation
 Tel.: 8 (916) 662-57-38, e-mail: eremeykin@gmail.com

References

1. Bing D., Guang-bin Y., Yan-qi G., Jun-peng S., Xue-mei W., Yu-xin L. Machining surface quality analysis of aluminum alloy thin-walled parts in aerospace. *International Journal of Security and Its Applications*, 2015, vol. 9, no. 11, pp. 201–208. doi: 10.14257/ijasia.2015.9.11.19.
2. Dal'skii A.M., ed. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. V 2 t. T. 1. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Engineering technology. In 2 vol. Vol. 1. Engineering technology basics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 370 p. ISBN 978-5-7038-3442-8.
3. Kuznetsov Yu.I., Moslov A.R., Boikov A.N. *Osnastka dlya stankov s ChPU: spravochnik* [CNC machine tools equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 512 p. ISBN 5-217-01114-9.
4. Evgenev G.B., Gavriushin S.S., Khobotov E.N. *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv*. V 2 t. T. 2 [Basics of manufacturing automation. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 479 p. ISBN 978-5-7038-4139-6.
5. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A.A. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004. vol. 44, iss. 15, pp. 1629–1641. doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.06.001.
6. Demyanenko E.G., Popov I.P., Menshikov V.S. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*, Tomsk, Russia, 27–29 October 2016, art. 012122. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012122.
7. Huang Y., Zhang X., Xiong Y. Finite element analysis of machining thin-wall parts: error prediction and stability analysis. *Finite element analysis - applications in mechanical engineering*. Ed. by F. Ebrahimi. Rijeka, Croatia, InTech, 2004. doi: 10.5772/50374.
8. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2017, vol. 98, iss. 3, pp. 343–352. doi: 10.1007/s40032-016-0246-9.
9. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional numerical modeling, simulation and experimental validation of milling of a thin-wall component. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2017, vol. 231, iss. 5, pp. 792–804. doi: 10.1177/0954405416685387.
10. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 287–292. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.023.
11. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London, New York, McGraw-Hill, 1972. 521 p. ISBN 978-0-0709-4138-0.
12. Bathe K.J. *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe, 2007. 1037 p. ISBN 978-0-9790-0490-2.
13. Izamshah R.A., Mo J.P.T., Ding S.L. Finite element analysis of machining thin-wall parts. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 458, pp. 283–288. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283.
14. Isaev A., Grechishnikov V., Pivkin P., Kozochkin M., Ilyuhin Y., Vorotnikov A. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 1023–1026. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.088.
15. Shamsuddin K.A., Ab-Kadir A.R., Osman M.H. A Comparison of milling cutting path strategies for thin-walled aluminium alloys fabrication. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2013, vol. 2, iss. 3, pp. 1–8.
16. Gavriushin S.C., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. Metod opredeleniya uslovii mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei [The method of determining the conditions for machining thin-walled parts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 11, pp.53–61. doi: 10.18698/0536-1044-2015-11-53-61.
17. Zhargalova A.D., Eremeykin P.A. Programmaya sistema avtomatizirovannogo vybora rezhimov mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei [Integrated decision support system for thin-walled parts cutting]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual problems in machine building*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 9–14.
18. Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. A software system for thin-walled parts deformation analysis. *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education*. Ed. by Z. Hu, S.V. Petukhov, M. He. Cham, Switzerland Springer Nature, 2018, pp. 259–265. doi: 10.1007/978-3-319-67349-3_24.
19. Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P. *Integrirovannaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya o vybore rezhimov mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei* [Integrated software system for selecting rational

cutting modes during thin-walled workpieces processing]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2016663071. (In Russian, unpublished).

20. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya*. V 2 t. T. 2 [Reference book of the technologist. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 418 p.

21. Guzeev V.I., Batuev V.A., Surkov I.V. *Rezhimy rezaniya dlya tokarnykh i sverlil'no-frezerno-rastochnykh stankov s chislovyim programmnyim upravleniem: spravochnik* [Cutting modes for CNC lathes]. Ed. by V.I. Guzeev. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 368 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Повышение работоспособности охватывающей фрезы с режущими элементами из композита при нарезании трапецидальной резьбы с элементами разрыва

Евгений Кудряшов^{а, *}, Татьяна Каменева^б

Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-1627-1919>,  kea-swsu@mail.ru, ^б  <http://orcid.org/0000-0002-9187-3039>,  taska015@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9

История статьи:

Поступила: 20 ноября 2017
 Рецензирование: 31 января 2018
 Принята к печати: 15 февраля 2018
 Доступно онлайн: 15 марта 2018

Ключевые слова:

Винтовая поверхность
 Элемент прерыва
 Режущий элемент
 Удар
 Стойкость
 Способ обработки

АННОТАЦИЯ

Цель: повышение работоспособности охватывающей фрезы благодаря разработанному способу настройки резцов на расчетные значения углов безударного резания, вследствие применения которого расширяются технологические возможности хрупкого инструментального материала композит при нарезании трапецидальной резьбы с элементами разрыва. В работе проведен анализ физико-механических характеристик инструментальных материалов группы композитов. Отмечается, что основной причиной низкой работоспособности режущих элементов охватывающей фрезы является скалывание их вершин и режущих кромок при врезании (выходе) инструмента в заготовку и прохождении через элементы разрыва резьбы образованными второстепенными конструктивными элементами, находящимися на ее поверхности. **Методы:** экспериментальные исследования проведены на токарно-винторезном станке с установкой на суппорте специального приспособления для нарезания резьбы, оснащенного сменной охватывающей фрезой, имеющей комплект резьбовых резцов, режущая часть которых выполнена из инструментального материала композит. Качество обработанной поверхности резьбы и точность исполнения контролировались оптическим методом с использованием стандартных и специальных средств измерений. **Результаты и обсуждение:** приведены рациональные значения геометрии режущего элемента и режимов нарезания трапецидальной резьбы охватывающей фрезой, оснащенной комплектом режущих элементов из инструментального материала композит, настроенной на врезание в обрабатываемую заготовку с элементами разрыва таким образом, чтобы встреча и последующее формообразование резьбы происходили в области передней поверхности режущего элемента, максимально удаленной как от его вершины, так и режущих кромок. Использование способа настройки, защищенного патентом РФ, позволило повысить работоспособность охватывающей фрезы и расширить область применения инструментального материала композит при прерывистом резании.

Для цитирования: Кудряшов Е.А., Каменева Т.Е. Повышение работоспособности охватывающей фрезы с режущими элементами из композита при нарезании трапецидальной резьбы с элементами разрыва // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 33–43. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-33-43.

Введение

Повышение эффективности использования лезвийного инструмента, обладающего уникальными физико-механическими и режущими свойствами при многих видах обработки поверхностей деталей различной конструктивной сложности, в том числе содержащих на обрабатываемой поверхности конструктивные элементы разрыва, является актуальной задачей

современной металлообработки. Однако из-за прерывистого характера процесса резания режущие элементы из модификаций композита вследствие своей природной хрупкости не могут составить конкуренцию шлифованию – традиционному методу чистовой и отделочной обработки поверхностей различной конструктивной сложности [1–6]. Существуют и другие причины потери режущей способности инструментальных материалов, например:

- отсутствие рекомендаций для выбора рациональной марки инструментального материала, учитывающей особенности конструкции обрабатываемой поверхности;

*Адрес для переписки

Кудряшов Евгений Алексеевич, д.т.н., профессор
 АО «Научно-исследовательский инженерный институт»
 шоссе Энтузиастов, 6,
 143912, г. Балашиха, Московская область, Россия
 Тел.: 8 (915) 339-99-29, e-mail: kea-swsu@mail.ru

- неоправданно малое внимание связи формы профиля режущего элемента и условиями контакта его передней поверхности с заготовкой;

- разрушение режущего элемента в момент врезания (выхода) его вершины и режущих кромок в заготовку, содержащую элементы разрыва обрабатываемой поверхности (пазы, второстепенные отверстия различной формы, расположение и количество).

Обобщение опыта отечественной и зарубежной металлообработки в области изготовления конструктивно сложных поверхностей деталей класса «Тела вращения» свидетельствует о том, что основной причиной потери режущей способности инструмента является ударное столкновение его хрупкой вершины и режущих кромок с обрабатываемыми элементами конструкции (врезание, элементы разрыва, выход из контакта). В работах [7–11] отмечается, что за период резания многократная встреча резца с элементами разрыва практически за короткое время приводит к выкрашиванию рабочей части. То что разрушение режущего элемента является основной причиной потери работоспособности инструмента, отражено и в других работах [12–15].

Таким образом, целью данной работы является установление особенностей контактного взаимодействия режущего элемента и обрабатываемой поверхности заготовки, на базе которых благодаря разработанному способу настройки резцов на расчетные значения углов безударного резания повышается работоспособность охватывающей фрезы и расширяются технологические возможности хрупкого инструментального материала композит в условиях прерывистого резания.

Методика экспериментального исследования

Экспериментальные исследования проводились на специальном приспособлении, установленном на суппорте токарно-винторезного станка (рис. 1).

Охватывающая фреза состоит из массивного корпуса с пазами для установки резцов. Каждый из четырех резцов закрепляется парой винтов. Резцы устанавливаются по специальному шаблону (эталонная ранее изготовленная деталь) непосредственно на станке или вне станка с помощью специального приспособления, исключая

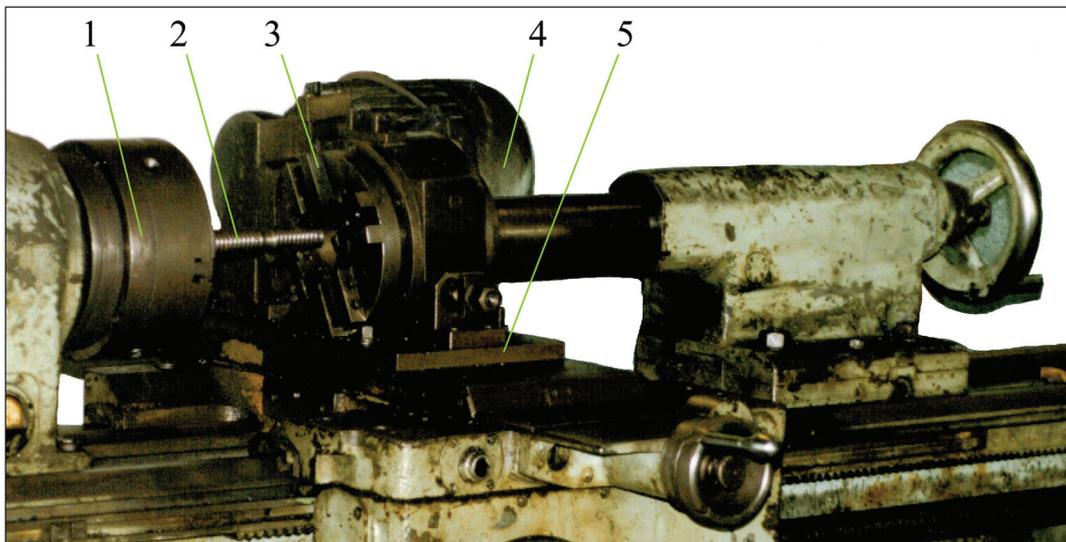


Рис. 1. Приспособление для нарезания резьбы охватывающей фрезой:

1 – патрон для закрепления заготовки (второй торец заготовки закреплен центром задней бабки); 2 – заготовка, деталь – винт ходовой; 3 – охватывающая фреза, оснащенная четырьмя резьбонарезными резцами; 4 – электродвигатель привода охватывающей фрезы; 5 – опорная (установочная) плита приспособления

Fig. 1. Device for threading by the internally cutting mill

1 – chuck; 2 – part, Feed-screw; 3 – internally cutting mill with four cutters; 4 – electric motor; 5 – base-plate

ющего необходимость подналадки при смене охватывающей фрезы. Резцы устанавливаются таким образом, чтобы равномерно распределить между ними снимаемый припуск.

Типовая деталь «винт ходовой» содержит на обрабатываемой поверхности резьбы элемент разрыва (сквозное отверстие диаметром 6 мм), рис. 2. Материал детали и его заменитель – сталь 40X13 (30X13).

На рис. 3 представлена схема нарезания резьбы охватывающей фрезой, оснащенной четырьмя резцами.

Инструмент (фреза, оснащенная четырьмя зубьями-резцами) работает по схеме внутреннего касания, при этом кинематика процесса аналогична фрезерованию полый охватывающей фрезой. Резьба формируется за один проход одинаковой формы резцами полного профиля, когда каждый из них режет тремя режущими кромками и окончательно профилирует впадину резьбы на участке дуги, соответствующей величине круговой подачи на резец.

На рис. 4 представлена конструкция одного из четырех резцов охватывающей фрезы, предназначенных для нарезания трапецеидальной резьбы.

Размеры, форма, точность, качество подготовки режущих кромок определяются в каждом конкретном случае в зависимости от профиля, размеров и длины нарезания резьбы.

Форма передней поверхности образуется переточкой режущего элемента на расчетные значения циклоидального профиля кругом

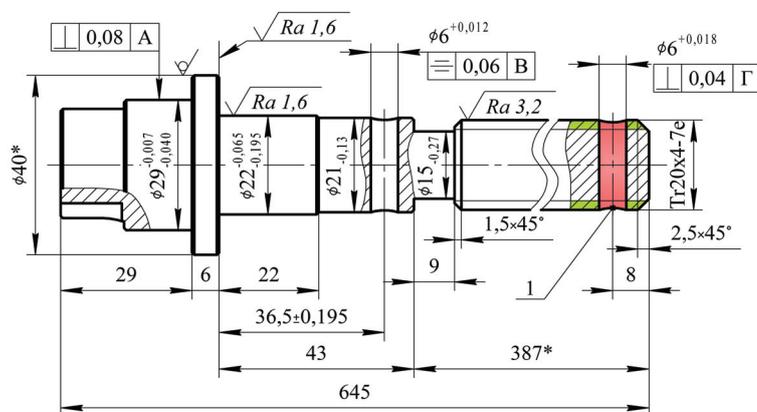


Рис. 2. Типовая деталь «винт ходовой»:

1 – элемент прерыва

Fig. 2. Typical part Feed-screw:

1 – interrupted element

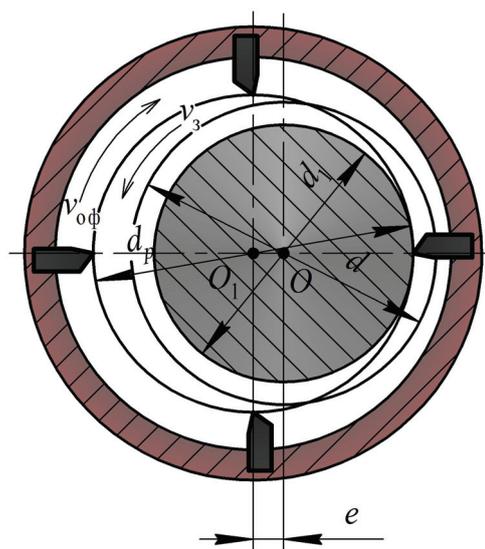


Рис. 3. Схема нарезания резьбы охватывающей фрезой:

$v_{оф}$ – направление вращения охватывающей фрезы; v_3 – направление вращения заготовки; d_p – диаметр окружности вершин резцов; d – наружный диаметр нарезаемой резьбы; d_1 – внутренний диаметр нарезаемой резьбы; e – эксцентриситет; O_1 и O – оси вращения фрезы и заготовки соответственно

Fig. 3. Scheme for threading by the internally cutting mill:

$v_{оф}$ – rotational direction of the internally cutting mill; v_3 – rotational direction of the part; d_p – diameter of the circumference of the cutter tips; d – external diameter of the thread to be cut; d_1 – internal diameter of the thread to be cut; e – eccentricity; O_1 и O – axes of rotation of the mill and workpiece

АСО 80/63-125/100 Б1 100 % на связках М1, М5, Т02 с доводкой и охлаждением при следующих режимах резания: $V = 25$ м/с; $S_{II} = 0,5$ м/с; $t = 0,005$ мм/дв.ход.

Теория

В условиях прерывистого резания основной причиной потери работоспособности инструмента является ударное столкновение его хрупкой вершины и режущих кромок с элементами разрыва обрабатываемой поверхности. Поэтому создание безударных условий обработки является актуальной научной задачей, заключающейся

$$\sin \varepsilon_{\phi} = \frac{K \operatorname{tg} \alpha}{\sin 2\gamma}, \quad (2)$$

где γ – передний угол режущего элемента; α – задний угол режущего элемента (см. рис. 4); $\varphi_1(\varphi_2)$ – углы в плане исходной формы режущего элемента и после его срабатывания; K – коэффициент, учитывающий конструктивную сложность обрабатываемой винтовой прерывистой поверхности резьбы, равный $S_{\text{пр}}/S_r$ (для винтовой поверхности без элементов прерыва $K = 1$); $S_{\text{пр}}$ – площадь обрабатываемой винтовой поверхности за вычетом площади элементов прерыва; S_r – площадь обрабатываемой винтовой поверхности без элементов прерыва.

$$\Delta \varepsilon = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{l \operatorname{tg}(\varepsilon / 2)}{(r_d - 0,5d_2) + h} \right), \quad (3)$$

где l – расстояние от вершины режущего элемента A до точки O – места первоначальной встречи режущего элемента с обрабатываемой винтовой поверхностью; h – высота головки резьбы; r_d – радиус детали.

Определение настроечных углов элемента в положении оптимального первоначального контакта с обрабатываемой винтовой поверхностью происходит в следующем порядке:

1) определяется конструктивная сложность обрабатываемой поверхности $K = S_{\text{пр}}/S_r$;

2) исходя из размеров режущего элемента определяется максимально возможное l ;

3) по формулам (2) и (3) рассчитывается значение переднего угла γ , при котором первоначальная встреча инструмента и прерывистой обрабатываемой поверхности произойдет в заданном положении настройки – точке O .

Очевидно, что расчетное положение, при котором передняя поверхность режущего элемента встречается с прерывистой поверхностью детали без удара, является оптимальным с точки зрения сохранения периода стойкости инструмента.

Задача 2. Придание передней поверхности режущего элемента формы, способной без разрушения принимать динамические нагрузки прерывистого резания

Графическое построение трехмерных моделей арки циклоиды проведено качением окружности, диаметр которой для режущего элемента

из инструментального материала композит 10 равен максимально возможной удвоенной глубине резания. При этом для режущего элемента формируется модельный ряд вариантов передней поверхности циклоидального профиля. Отличительной особенностью вариантов являются принадлежащие каждому из вариантов собственный угол и контур, формируемый дискретным изменением величины угла наклона касательной к циклоидальному профилю передней поверхности резца. Предпочтение в выборе отдается модели арки циклоиды с максимальными значениями расчетных величин, определяющими на передней поверхности место нахождения участка, наиболее отдаленного от хрупкой вершины и наиболее благоприятного для первоначальной встречи (врезания) режущего элемента и заготовки под углом β (рис. 6).

Циклоидальная форма профиля способствует уменьшению силы трения стружки о переднюю поверхность, что обеспечивает при рациональных условиях врезания режущего элемента в заготовку сохранение на длительный период стойкости инструментального материала [18–20].

Задача 3. Обоснование эффективной марки инструментального материала для условий прерывистого резания

Из известных инструментальных материалов, применение которых возможно на операциях токарной обработки, группа сверхтвердых материалов обладает объективными преимуществами: способностью обеспечить высокоскоростную обработку поверхностей деталей различной конструктивной сложности с требуемой точностью не грубее 7-го качества и шероховатостью Ra 0,32...0,63 мкм, исключая вероятность прижогов, шаржирование, формирование растягивающих напряжений, характерных для операций шлифования.

В группе сверхтвердых материалов насчитывается более десяти марок композитов, из которых для прерывистого резания наиболее часто используется пять, а именно марки композита 01, 02, 05, 09, 10.

Сравнение пяти важнейших физико-механических характеристик отдает предпочтение композиту 10, который обладает неоспоримыми преимуществами (рис. 7) [2, 7, 8].

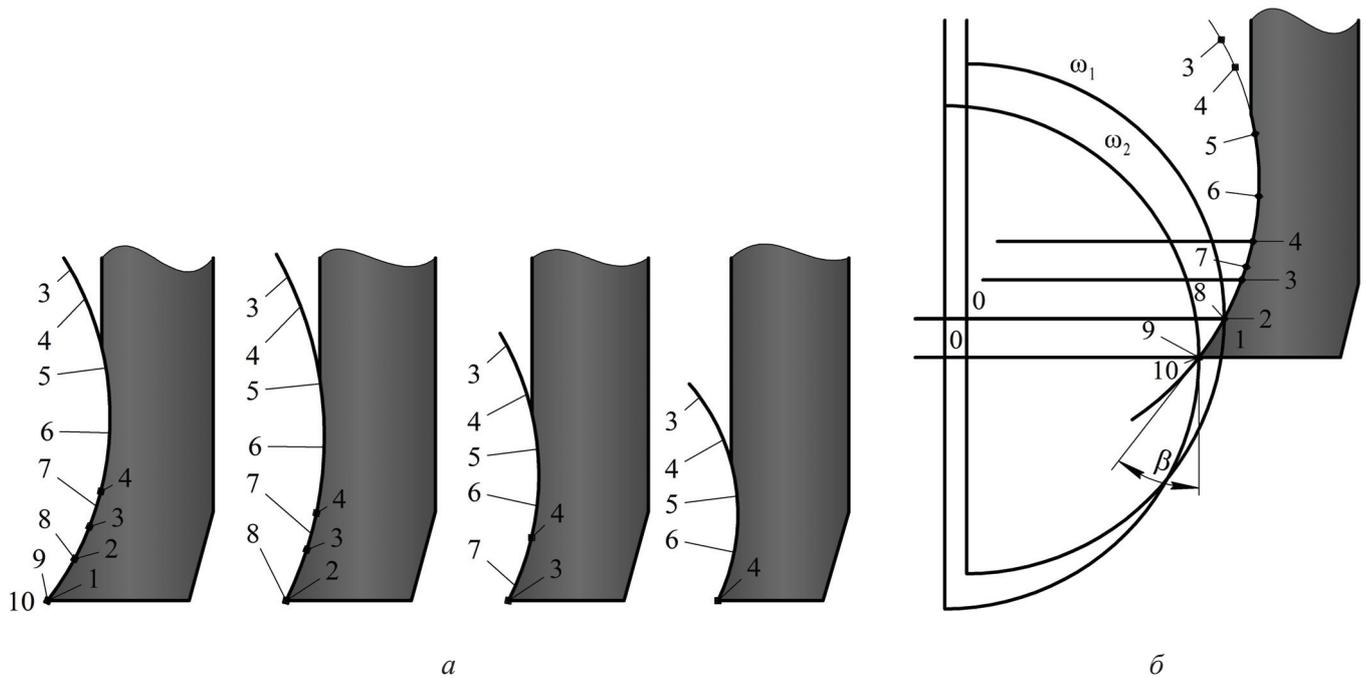


Рис. 6. Геометрическое построение модели арки циклоиды:

a – модельный ряд передних поверхностей инструмента со ступенчатым интервалом возрастания углов от 1, 2, 3 до *n*;
б – схема кривой для построения оптимизированного профиля модельного ряда

Fig. 6. Geometrical construction of the cycloid arc:

a – model range of the front surfaces of the tool with a stepped interval of increasing angles from 1, 2, 3 to *n*; *б* – scheme of the curve for constructing an optimized profile of the model range

Характеристика 1	Характеристика 2	Характеристика 3	Характеристика 4	Характеристика 5
E , ГПа	σ_n , ГПа	σ_p , ГПа	T , °C	K_{Ic} , МПа \times м ^{1/2}
880 — К10	1,50 — К10	0,49 — К01	1500 — К10	7,12 — К10
840 — К01	1,19 — К09	0,39 — К10	1470 — К01	7,10 — К05
800 — К02	0,98 — К01	0,35 — К09	1300 — К02	7,00 — К05
720 — К05	0,80 — К02	0,30 — К05	1200 — К05	4,62 — К02
700 — К09	0,60 — К05	0,22 — К05	1050 — К05	4,17 — К01
500 — К09	0,50 — К05			
Модуль упругости	Предел прочности при изгибе	Предел прочности при растяжении	Термостойкость	Коэффициент трещиностойкости

Рис. 7. Сравнение физико-механических характеристик марок композитов

Fig. 7. Comparison of physical and mechanical characteristics of composites

Результаты и их обсуждение

Экспериментальные данные получены при оснащении резцов охватывающей фрезы инструментальным материалом композит 10 и настройке ее положения с первоначальной встречей инструмента с конструктивно сложной поверхностью детали в точке передней поверхности режущего элемента, максимально удаленной от вершины и режущих кромок.

Суммарная погрешность нарезанной резьбы $Tr\ 20\times 4-7e$ на заготовке из стали 40X13 и рассеяние размеров приведены в табл. 1.

Полученные показатели ухудшаются на 10, 20 и 35 % при замене композита 10 на композит 01, композит 09 и композит 05 соответственно.

Отказ от настройки режущих элементов охватывающей фрезы в положение оптимальных условий встречи с обрабатываемой конструктивно сложной поверхностью резко ухудшает искомые показатели суммарной погрешности нарезаемой резьбы и делает их неприемлемыми для использования практически всех марок композитов.

Как следует из анализа данных табл. 1, рассеяние размеров не превышает одной трети суммарного допуска номинального среднего диаметра. Оставшееся значение суммарного допуска по номинальному среднему диаметру резьбы в

полной мере способно компенсировать образующиеся погрешности, вызванные износом режущего элемента из инструментального материала композит 10, принятого в качестве эталонного инструментального материала.

Методом крутого восхождения найдены показатели скорости, подачи и глубины резания, соответствующие рациональным значениям настройки охватывающей фрезы: $V = 3,8$ м/с; $S = 0,80$ мм/резец в условиях, при которых площадь участка разрыва обрабатываемой поверхности не превышает 10 % общей площади резьбовой поверхности.

В результате экспериментов и математической обработки опытных данных получены параметры геометрии режущих элементов, соответствующие условиям максимально возможной работоспособности резьбообразующего инструмента (табл. 2).

При сравнении преимущества предлагаемого способа обработки по отношению к резьбошлифованию следует иметь в виду многооперационность изготовления поверхности трапецеидального профиля – винтовую поверхность, упрочненную термообработкой, обрабатывают на резьбошлифовальных станках за две-три операции, в том числе: черновая, получистовая и чистовая (окончательная) обработка.

Таблица 1
Table 1

Влияние на точность нарезаемой винтовой поверхности; отношения диаметра вершин резцов к диаметру вала, круговой подаче и скорости резания

Influence on the accuracy of the spiral surface; ratio of a cutter tip diameter to a diameter of a shaft, circular feed and cutting speed

Постоянные факторы	Переменные факторы		Рассеяние			
			Δd_2	ΔS	$0,5\delta\alpha/2$	
$d_p/d = 1,05$; $V = 3,0$ м/с	S_z , мм/резец	1	0,47	30	20	6
		2	0,79	20	30	5
		3	1,11	35	30	5
$S_z = 0,47$ мм/резец; $d_p/d = 1,05$;	V , м/с	1	1,0	50	20	5
		2	3,0	50	20	6
		3	5,0	50	30	6
$S_z = 0,47$ мм/резец; $V = 3,0$ м/с	d_p/d	1	1,1	40	20	8
		2	1,3	30	20	7
		3	1,5	30	20	6

Рациональные параметры режущих элементов
Rational parameters of cutting elements

Марка инструментального материала	Геометрия режущего элемента		Режимы резания		Стойкость, T , мин
	α , град	γ , град	V , м/с	S , мм/резец	
Композит 10	10	-6	3,80	0,80	29

Окончательная обработка производится окончательным шлифовальным кругом из «Эльбора» (связка керамическая; зернистость Л8-Л16; степень твердости круга СМ1-СМ2) при режимах резания: глубина резания до 0,15 мм; скорость резания до 35 м/с; круговая подача заготовки до 0,7 м/мин; количество рабочих ходов от 2 до 4.

Одно только перечисление операций свидетельствует о существенных (по сравнению с нарезанием) затратах времени на подготовку и проведение операций резбошлифования. Кроме дорогостоящего оборудования, а также затрат на профилирование шлифовального круга следует иметь в виду высокую вероятность появления прижогов и насыщение обработанной поверхности резьбы частицами материала круга (шаржирование).

Метод нарезания трапецеидальной резьбы резцами из композитов эффективнее технологий резбошлифования и выигрывает как по производительности, так и по качеству. До недавнего времени сверхтвердые лезвийные материалы практически не применялись на подобных операциях, а наличие элементов разрыва обрабатываемой поверхности резьбы приводило к разрушению режущего элемента. Вместе с тем наиболее эффективные из них (композиты) обладают рядом преимуществ перед шлифованием, что делает их привлекательными с точки зрения производительности и качества обработки.

Предложенный способ управления положением режущего элемента в сочетании с циклоидальной формой передней поверхности инструмента позволяет создать не только безударные условия работы инструментальному материалу композит, но и тем самым значительно расширить область его применения при прерывистом резании.

Выводы

1. Разработанный способ настройки охватывающей фрезы на безударное резание позволил существенно повысить работоспособность резбообразующего инструмента.
2. Предложены условия придания передней поверхности режущего элемента формы, способной без разрушения принимать динамические нагрузки прерывистого резания.
3. Проведено обоснование эффективной марки инструментального материала для условий прерывистого резания.

Список литературы

1. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Скоростное фрезерование резьбы вращающимися резцами // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 1 (58). – С. 4–8.
2. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Эффективная работа инструмента из композита при скоростном фрезеровании резьбы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 25–32.
3. Song S., Zuo D. Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2014. – Vol. 42. – P. 98–106. – doi: 10.1016/j.simpat.2013.12.011.
4. Stahl J.E. Metal cutting – theories and models. – Lund, Sweden: Lund University Press, 2012. – 580 p.
5. Vos P. de. Applied metal cutting physics – best practice. – Fagersta: SECO Tools AB, 2016. – 163 p.
6. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 366 p.
7. Технологические преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных поверхностей деталей / Е.А. Кудряшов, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин, Е.Н. Фомичев // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 12 (72). – С. 15–20.

8. Павлов Е.В., Смирнов И.М. О возможности применения резцов из композита при обработке поверхностей деталей, образованных сочетанием конструкционных материалов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – № 2 (71). – С. 91–98.

9. Ni S.Y., Li Y., Deng S.X. Study on machining mechanism of internal whirling process for precise external thread and its tool profile design // Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 48, N 7. – P. 193–198. – doi: 10.3901/JME.2012.07.193.

10. Zhu H.Y., Li Y. Study on macro-morphology of hard whirling chips with PCBN tools // Manufacturing Technology & Machine Tool. – 2011. – Vol. 9. – P. 101–104.

11. Zhu H.Y., Li Y. Study on macro-morphology of hard whirling chips with PCBN cutting tools coated with chromium aluminum nitride // Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique. – 2011. – Vol. 11. – P. 99–101.

12. Солодков В.А., Тибиркова М.А. Влияние условий выхода на работоспособность твердосплавного инструмента при прерывистом резании // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 12 (72). – С. 62–65.

13. The dynamic modeling and vibration analysis of the large-scale thread whirling system under high-speed hard cutting / Y. Wang, L. Li, C. Zhou, Q. Guo, C. Zhang, H. Feng // Machining Science and Technology. – 2014. – Vol. 18, iss. 4. – P. 522–546. – doi: 10.1080/10910344.2014.955366.

14. Yang Y., Li J.F. Study on mechanism of chip formation during high-speed milling of alloy cast iron // The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology. – 2010. – Vol. 46. – P. 43–50. – doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2064-1>.

15. Mohan L.V., Shunmugam M.S. Simulation of whirling process and tool profiling for machining of worms // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 185. – P. 191–197. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.115.

16. А. с. 1641509 СССР, МПК В 23 В 1/00. Способ обработки прерывистых поверхностей резанием / В.Н. Петренко, А.П. Гвоздецкий, С.И. Колесников. – № 4623042; заявл. 28.09.1988; опубл. 15.04.1991.

17. Патент 2633815 Российская Федерация, МПК В 23 В 1/00. Способ обработки винтовых поверхностей резанием с ударом / Е.А. Кудряшов, Т.Е. Каменева. – № 2016111239; заявл. 25.03.2016; опубл. 28.09.2017, Бюл. № 29.

18. Преимущества высокоэффективной лезвийной технологии обработки деталей инструментов из композита / Е.А. Кудряшов, В.И. Иванов, О.Г. Локтионова, П.Н. Учайев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5-1 (38). – С. 103–106.

19. Study on the forming process of thread raceway surface under the hard whirling / W. Yulin, L. Tao, Q. Guo, H. Feng // Proceedings of the 8th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2013), 26–28 April 2013, Colombo, Sri Lanka. – Colombo, 2013. – P. 627–632. – doi: 10.1109/ICCSE.2013.6553985.

20. Ресурсосберегающие системы резания с инструментом из композитных материалов / Е.И. Яцун, С.В. Швец, А.И. Ремнев, Е.В. Павлов // СТИН. – 2013. – № 7. – С. 29–35.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Increase of Efficiency of the Internally Cutting Mill with Composite Cutters when Cutting Trapezoidal Thread with Interrupted Elements

Evgenii Kudryashov^{a, *}, Tatyana Kameneva^b

Southwest State University, 50 Let Oktyabrya Street, 94, Kursk, 305040, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-1627-1919>, kea-swsu@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9187-3039>, taska015@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 November 2017

Revised: 31 January 2018

Accepted: 15 February 2018

Available online: 15 March 2018

Keywords:

Spiral surface

Interrupted element

Cutter

Shock

Cutter power

Machining method

ABSTRACT

Purpose: to increase the efficiency of the internally cutting mill due to the developed method of setting the cutters to the calculated values of the angles of shock-free cutting. This allows expanding the technological capabilities of the fragile cutting tool material when cutting trapezoidal thread with the interrupted elements. An analysis of the stress-related characteristics of cutting tool materials of a group of composites is made. The paper shows that the main reason for the low efficiency of cutting elements of the internally cutting mill is the chipping of its cutting edges when inserting (output) the tool into the workpiece and passing through the interrupted elements of the thread, located on its surface. **Methods:** experimental studies are carried out on a lathe, with the installation on its support of a special device for threading, equipped with a replaceable internally cutting mill, having a set of thread cutters, the cutting part of which is made of a composite material. The quality of the machined thread surface and the accuracy of the execution are controlled by optical method using standard and special measuring instruments. **Results and discussion:** the rational values of the geometry of the cutting element and the cutting data of the trapezoidal thread by the internally cutting mill equipped with a set of composite cutting elements tuned for cutting into the workpiece with interrupted elements so that the meeting and thread formation occurred as a region of the front surface of the cutting element as far as possible from the cutting edges are presented. The use of the tuning method, protected by the Russian Federation patent, made it possible to increase the efficiency of the internally cutting mill and to extend the range of application of the composite tool material with interrupted cutting.

For citation: Kudryashov E.A., Kameneva T.E. Increase of efficiency of the internally cutting mill with composite cutters when cutting trapezoidal thread with interrupted elements. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 33–43. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-33-43. (In Russian).

References

1. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Skorostnoe frezerovanie rez'by vrashchayushchimisya reztsami [High-speed milling of the thread by rotating cutters]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 1 (58), pp. 4–8.
2. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Effektivnaya rabota instrumenta iz kompozita pri skorostnom frezerovanii rez'by [Efficient tool of composite at high-speed thread milling]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 2 (59), pp. 25–32.
3. Song S., Zuo D. Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 42, pp. 98–106. doi: 10.1016/j.simpat.2013.12.011.
4. Stahl J.E. *Metal cutting – theories and models*. Lund, Sweden, Lund University Press, 2012. 580 p.
5. Vos P. de. *Applied metal cutting physics – best practice*. Fagersta, SECO Tools AB, 2016. 163 p.
6. Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. New York, Cambridge University Press, 2012. 366 p.

* Corresponding author

Kudryashov Evgenii A., D.Sc. (Engineering), Professor
 Scientific Research Engineering Institute,
 6 Shosse Entuziastov,
 143912, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation
 Tel.: 8 (915) 339-99-29, e-mail: kea-swsu@mail.ru

7. Kudryashov E.A., Altukhov A.Yu., Lunin D.Yu., Fomichev E.N. Tekhnologicheskie preimushchestva instrumental'nogo materiala kompozit pri obrabotke konstruktivno slozhnykh poverkhnostei detalei [Technological advantages of the CBN tool when machining structurally complex parts surfaces]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2010, no. 12 (72), pp. 15–20.
8. Pavlov E.V., Smirnov I.M. O vozmozhnosti primeneniya reztsov iz kompozita pri obrabotke poverkhnostei detalei, obrazovannykh sochetaniem konstruktsionnykh materialov [Applicability of composite cutters for machining surfaces formed by a combination of structural materials]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the South-West State University. Technics and Technologies*, 2017, no. 2 (71), pp. 91–98.
9. Ni S.Y., Li Y., Deng S.X. Study on machining mechanism of internal whirling process for precise external thread and its tool profile design. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 48, no. 7, pp. 193–198. doi: 10.3901/JME.2012.07.193.
10. Zhu H.Y., Li Y. Study on macro-morphology of hard whirling chips with PCBN tools. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2011, vol. 9, pp. 101–104.
11. Zhu H.Y., Li Y. Study on macro-morphology of hard whirling chips with PCBN cutting tools coated with chromium aluminum nitride. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2011, vol. 11, pp. 99–101.
12. Solodkov V.A., Tibirkova M.A. Vliyanie uslovii vykhoda na rabotospo-sobnost' tverdosplavnogo instrumenta pri preryvistom rezanii [Effect of output conditions on the performance of a carbide tool with intermittent cutting]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2010, no. 12 (72), pp. 62–65.
13. Wang Y., Li L., Zhou C., Guo Q., Zhang C., Feng H. The dynamic modeling and vibration analysis of the large-scale thread whirling system under high-speed hard cutting. *Machining Science and Technology*, 2014, vol. 18, iss. 4, pp. 522–546. doi: 10.1080/10910344.2014.955366.
14. Yang Y., Li J.F. Study on mechanism of chip formation during high-speed milling of alloy cast iron. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 46, pp. 43–50. doi: 10.1007/s00170-009-2064-1.
15. Mohan L.V., Shunmugam M.S. Simulation of whirling process and tool profiling for machining of worms. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 185, pp. 191–197. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.115.
16. Petrenko V.N., Gvozdetskii A.P., Kolesnikov S.I. *Sposob obrabotki preryvistykh poverkhnostei rezaniem* [Method for processing discontinuous surfaces by cutting]. Inventor's Certificate SU, no. 1641509, 1991.
17. Kudryashov E.A., Kameneva T.E. *Sposob obrabotki vintovykh poverkhnostei rezaniem s udarom* [Method of machining screw surfaces by cutting with impact]. Patent RF, no. 2633815, 2017.
18. Kudryashov E.A., Ivanov V.I., Loktionova O.G., Uchaev P.N. Preimushchestva vysokoeffektivnoi lezviinoy tekhnologii obrabotki detalei instrumentov iz kompozita [Advantages of high-efficiency blade technology for machining with CBN tools]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the South-West State University. Technics and Technologies*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 103–106.
19. Yulin W., Tao L., Guo Q., Feng H. Study on the forming process of thread raceway surface under the hard whirling. *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2013)*, 26–28 April 2013, Colombo, Sri Lanka, pp. 627–632. doi: 10.1109/ICCSE.2013.6553985.
20. Yatsun E.I., Shvets S.V., Remnev A.I., Pavlov E.V. Resursosberegayushchie sistemy rezaniya s instrumentom iz kompozitnykh materialov [Resource-saving cutting systems with CBN tools]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2013, no. 7, pp. 29–35. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Особенности циклограммирования машины с учетом взаимодействия звеньев механизмов с упорами

Юрий Подгорный^{1, 2, a}, Ольга Максимчук^{2, b, *}, Александр Кириллов^{1, 3, c}, Вадим Скиба^{1, d}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Новосибирский технологический институт (филиал) РГУ им. А.Н. Косыгина, Красный пр., 35 (ул. Потанинская, 5), г. Новосибирск, 630099, Россия

³ Новосибирский государственный педагогический университет, ул. Вилюйская, 28, г. Новосибирск, 630126, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0002-1664-5351>, pjui@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6976-1164>, ovmak@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-8142-2787>, kirillovalvs@mail.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeeba_vadim@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.835.2

История статьи:

Поступила: 14 декабря 2017

Рецензирование: 12 января 2018

Принята к печати: 12 февраля 2018

Доступно онлайн: 15 марта 2018

Ключевые слова:

Циклограмма машины

Кулачковый механизм

Динамическая модель

Удар

Закон движения

Оптимизация циклограммы

Финансирование:

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, код проекта: 9.11829.2018/11.12.

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы циклограммирования технологической машины с учётом взаимодействия звеньев механизмов с упорами. Анализ научной литературы указывает на то, что в настоящее время вопросы циклограммирования сложных машин с учетом упругодиссипативных характеристик механизмов нуждаются в дальнейшей разработке, так как при оптимизации циклограмм используются упрощённые динамические модели, не учитывающие податливости ведомых звеньев механизмов. Актуальность исследования обусловлена тем, что существующие динамические модели не могут быть использованы для расчета колебаний, возбуждаемых при ударах рабочих органов об ограничительные упоры, при входе в контакт с упругими элементами. **Цель работы:** совершенствование методики синтеза циклограммы технологической машины, позволяющей повысить ее производительность. **В работе исследована** циклограмма технологической машины, представленная в виде математических моделей взаимодействия механизмов с использованием связанных ориентированных графов. В качестве объекта исследования выбран станок ткацкий бесчелночный СТБ – сложная технологическая машина с большим числом исполнительных механизмов, движения которых тесно взаимосвязаны. При решении оптимизационной задачи необходимо увеличить время лимитирующей операции путём сокращения времени выполнения технологических операций в группах механизмов, при этом задача для каждой группы формулируется математически как задача оптимизации на сетевом графике. При проведении исследований рассмотрен механизм подъёмника прокладчиков утка ткацкого станка типа СТБ. **Метод исследования:** оптимизация цикловой диаграммы с использованием динамических моделей механизмов. **Результаты и обсуждение.** Предложены динамические модели механизмов, учитывающие взаимодействие ведомых звеньев с ограничительными упорами. Проведен расчет динамических погрешностей законов движения кулачкового механизма, работающего с ударом об упор, при скорости вращения главного вала $n = 280 \dots 420$ об/мин. Исследованы колебания механизма на собственной частоте после контакта с упором. Сформулирована ограничительная часть оптимизационной задачи циклограммирования с учетом колебаний исполнительного звена и ударного взаимодействия его с ограничительным упором.

Для цитирования: Особенности циклограммирования машины с учетом взаимодействия звеньев механизмов с упорами / Ю.И. Подгорный, О.В. Максимчук, А.В. Кириллов, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 44–54. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-44-54.

Введение

Одним из перспективных направлений повышения производительности технологического оборудования является создание машин

с оптимальными циклограммами. В условиях увеличения рабочих скоростей машин при необходимости соблюдения высокой точности позиционирования рабочих органов предъявляются повышенные требования к точности расчетов цикловых диаграмм на основе динамических моделей механизмов.

Современный подход к циклограммированию машин представляет собой оптимизацион-

*Адрес для переписки

Максимчук Ольга Владимировна, к.т.н., доцент
 Новосибирский технологический институт (филиал) РГУ
 им. А.Н. Косыгина,
 Красный пр., 35 (ул. Потанинская, 5),
 630099, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 222-79-29, e-mail: ovmak@mail.ru

ный синтез цикловой диаграммы на основе математических моделей [1–4].

Циклограммы сложных технологических машин представляют в виде математических моделей взаимодействия механизмов с использованием связанных ориентированных графов [1], сетевых графиков [2], векторных многоугольников [3, 4], которые позволяют автоматизировать процесс их обработки, ставить и решать задачи оптимального синтеза циклограмм.

Следует отметить, что исследования цикловых диаграмм проводятся с применением различных моделей механизмов. В большинстве работ при проектировании цикловых диаграмм рассматриваются модели механизмов машин без учета упругости звеньев [1, 2, 5–12]. При увеличении быстроходности машин такие допущения могут приводить к значительным искажениям кинематических и динамических характеристик [13, 14], которые дополняются колебательными явлениями в механизмах [15–23].

В работах [3, 4, 6] предлагается проводить поиск законов движения исполнительных органов кулачковых механизмов с учетом упругости звеньев, разрывов кинематической цепи, происходящих в результате действия динамических нагрузок, ударов и вибрации. Хотя авторы работ отмечают важность динамических расчетов при проектировании, в то же время они рекомендуют ограничиваться расчетами одного-двух механизмов, определяющих динамику машины [2]. В работе [3] предлагается динамическая модель технологической машины, учитывающая упругодиссипативные характеристики звеньев механизмов.

Проведенный анализ состояния вопроса указывает на то, что наиболее перспективным направлением представления универсальных математических моделей, позволяющих отразить все взаимосвязи между движениями исполнительных органов машины, являются графы. Использование оптимизационных методов теории графов при проектировании циклограммы позволяет проводить анализ и синтез механизмов независимо от отраслевой принадлежности машин-автоматов [1, 2, 4, 7, 8].

Кроме того, при существующих методах оптимизации циклограмм машины используются упрощенные динамические модели, не учитывающие податливости звеньев механизмов, поэто-

му они не могут быть использованы для расчета колебаний, возбуждаемых при ударах рабочих органов об ограничительные упоры.

С учетом сказанного сформулируем цель настоящей работы – совершенствование методики синтеза циклограммы технологической машины, позволяющей повысить ее производительность.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- для существующей модели циклограммы технологической машины (в виде графа) получить модели механизмов с учетом упругих и диссипативных свойств звеньев, позволяющих описывать их поведение в динамических условиях;

- рассчитать погрешности закона движения для механизма, испытывающего ударные нагрузки;

- определить критерии оптимизации для механизмов, осуществляющих ограничение перемещений конечного звена.

Методика исследований

В качестве объекта исследования выбрана сложная технологическая машина с большим числом исполнительных механизмов, движения которых тесно взаимосвязаны, а именно станок ткацкий бесчелночный (СТБ).

Циклограмма станка представлена на рис. 1 сетевой циклограммой, в которой выделены в виде подграфов группы технологически взаимосвязанных механизмов и лимитирующая операция 10.1–10.2 [8].

В настоящей работе рассматриваются механизмы группы 1, которая состоит из механизма возвратчика уточной нити, механизма подъемника прокладчиков, раскрывателя пружины прокладчиков, раскрывателя пружины возвратчика.

Сетевая циклограмма группы 1 подробно представлена на рис. 2, где отражены последовательность работы и взаимосвязи между движениями механизмов рассматриваемой группы. Вершинами графа являются характерные положения механизмов группы, отмеченные на циклограмме. Каждой вершине графа соответствует время наступления события p . Ребра графа имеют несколько весовых характеристик: фазовый угол t , значение максимальных контактных

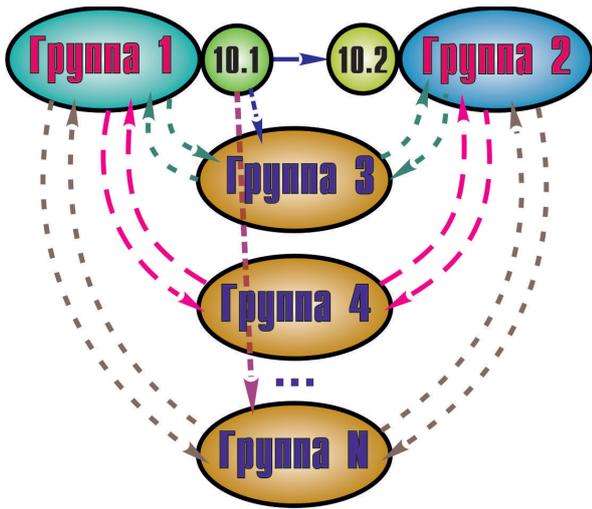


Рис. 1. Сетевая циклограмма станка СТБ

Fig. 1. The network cyclogram of the STB loom

напряжений в высшей паре k и амплитуду колебаний рабочего органа на соответствующем участке циклограммы a . Фазовый угол t для каждого ребра вычисляется как разность времени наступления событий.

Целью оптимизации циклограммы является повышение производительности машины. Для достижения поставленной цели необходимо увеличить время лимитирующей операции. Согласно рис. 1 увеличение длины дуги 10.1–10.2 можно получить, сокращая время выполнения операций в группах.

Оптимизационная задача для каждой группы формулируется математически как задача оптимизации на сетевом графике [24]:

целевая функция:

$$[p(N) - p(1)] \rightarrow \min$$

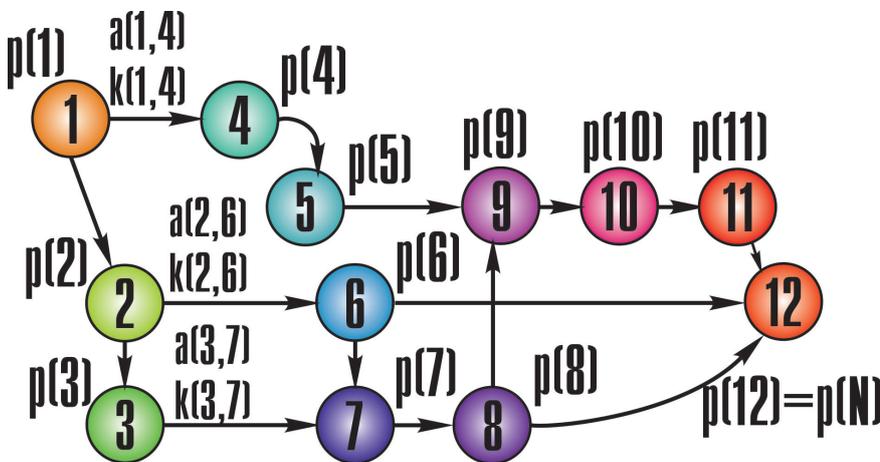


Рис. 2. Сетевая циклограмма группы 1

Fig. 2. The network cyclogram of the first group

при ограничениях

$$p(x) \leq p(y) - t(x, y) \tag{1}$$

для всех дуг (x, y)

$$t(x, y) \geq [\varphi(x, y)],$$

где $p(x)$ – время наступления события x ; $t(x, y)$ – продолжительность операции (x, y) ; $[\varphi(x, y)]$ – минимальный допускаемый фазовый угол для операции (x, y) ; N – номер последнего события сетевой циклограммы.

Параметрами, определяемыми в процессе оптимизации, являются фазовые углы t . В ограничительную часть входят максимальные нормальные контактные напряжения в высших парах, а также ограничения, отражающие последовательность операций. Ограничение контактных напряжений на каком-либо участке циклограммы:

$$\sigma_{\max}(t(x, y)) \leq [\sigma_H],$$

где $[\sigma_H]$ – допускаемое напряжение смятия в высшей паре (преобразовано в ограничение на величину соответствующего фазового угла снизу).

Рассмотрим особенности формулировки ограничительной части в задаче оптимизации циклограммы на примере группы 1.

Рассматриваемая группа механизмов выполняет ответственную операцию передачи уточной нити от возвратчика к прокладчику. Точность, с которой происходит передача нити, должна составлять $\pm 0,1$ мм. Эта величина является ограничением для амплитуды колебаний исполнительных органов в момент передачи нити.

В проведенных ранее исследованиях циклограммы станка СТБ [9, 10] использована динамическая модель группы механизмов (кулачковых), учитывающая упругодиссипативные характеристики ведущих и ведомых звеньев. Математическая модель сформулирована в виде системы уравнений движения с избыточными координатами. Эта модель позволяет выявить искажения идеальных кинематических функций ведомого звена, которые возникают за счет

крутильных колебаний главного вала станка. Представленная методика решения системы дифференциальных уравнений, моделирующая динамическое поведение механизма, применима только для анализа динамических моделей с медленно меняющимися параметрами [11, 12, 15] и не может быть использована для определения поведения механизмов при периодических взаимодействиях ведомых звеньев с упорами.

В момент касания ведомым звеном упора жесткость системы возрастает по сравнению с жесткостью во время движения к упору, следовательно, изменяются и значения частот свободных колебаний системы.

В настоящей работе в качестве примера рассмотрен механизм группы 1, осуществляющий подъем прокладчиков станка ткацкого бесчелночного типа СТБ, работающего с упором. Ведомое звено механизма подъемника прокладчиков в крайних положениях с натягом прижимается к ограничительным пластинам для точного позиционирования. При подходе исполнительного звена к упору возникает удар и последующие колебания исполнительного звена. Кинематическая схема механизма представлена на рис. 3, где 1 – кулачок пазовый; 2 – ролик; 3 – рычаг; 4 – тяга; 5 – корпус подъемника прокладчиков; 6 – нижний упор; 7 – верхний упор.

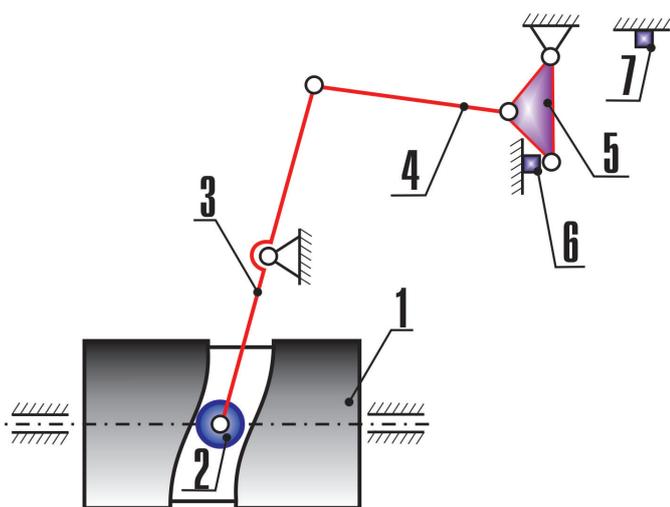


Рис. 3. Кинематическая схема механизма подъемника прокладчиков

Fig. 3. Kinematic scheme of the microshuttle lift mechanism

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов исследуемого механизма с использованием упомянутой ранее динамической модели [9] представлены на рис. 4.

Расчетные модели механизма для определения частоты собственных колебаний для момента контакта с упором и для момента движения без контакта с упором предлагаются в виде, изображенном на рис. 5 и 6. В момент контакта с упором появляется дополнительная опора в точке C (см. рис. 6). Ведомую часть механизма представим в виде рычага, имеющего ось вращения A и несущего приведенную массу $m_{пр}$.

Приведенную жесткость найдем по формуле

$$c_{пр} = \frac{3EJ_x}{(a+b)b^2},$$

где E – модуль упругости первого рода; J_x – осевой момент инерции сечения рычага; a , b – длины плеч рычага (см. рис. 5).

Адекватность предложенных расчетных моделей натурным образцам проверена в работе [8]. Расчетное значение частоты собственных колебаний свободной системы $f = 297$ Гц согласуется с экспериментальным значением $f = 268$ Гц (относительное отклонение 11 %). Расчетное значение собственной частоты при взаимодействии с упором $f = 768$ Гц отличается от экспериментального значения $f = 700$ Гц [8] на 10 %.

Для исследования вынужденных колебаний необходимо определить силу взаимодействия между ведомым звеном и упором $F_{уд}$. Для этого следует найти импульс силы S_C [25]:

$$S_C = \frac{J_A(\omega_1 - \omega_0)}{l}(1+k),$$

где ω_1 , ω_0 – угловая скорость рычага в конце и начале взаимодействия соответственно; k – коэффициент восстановления ($k = 5/9$ для стали); l – длина рычага; J_A – момент инерции рычага.

Так как в конце взаимодействия $\omega_1 = 0$, запишем

$$S_C = F_{уд}\tau = \frac{J_A\omega_0}{l}(1+k),$$

где τ – время взаимодействия.

Тогда

$$F_{уд} = \frac{J_A\omega_0(1+k)}{l\tau}.$$

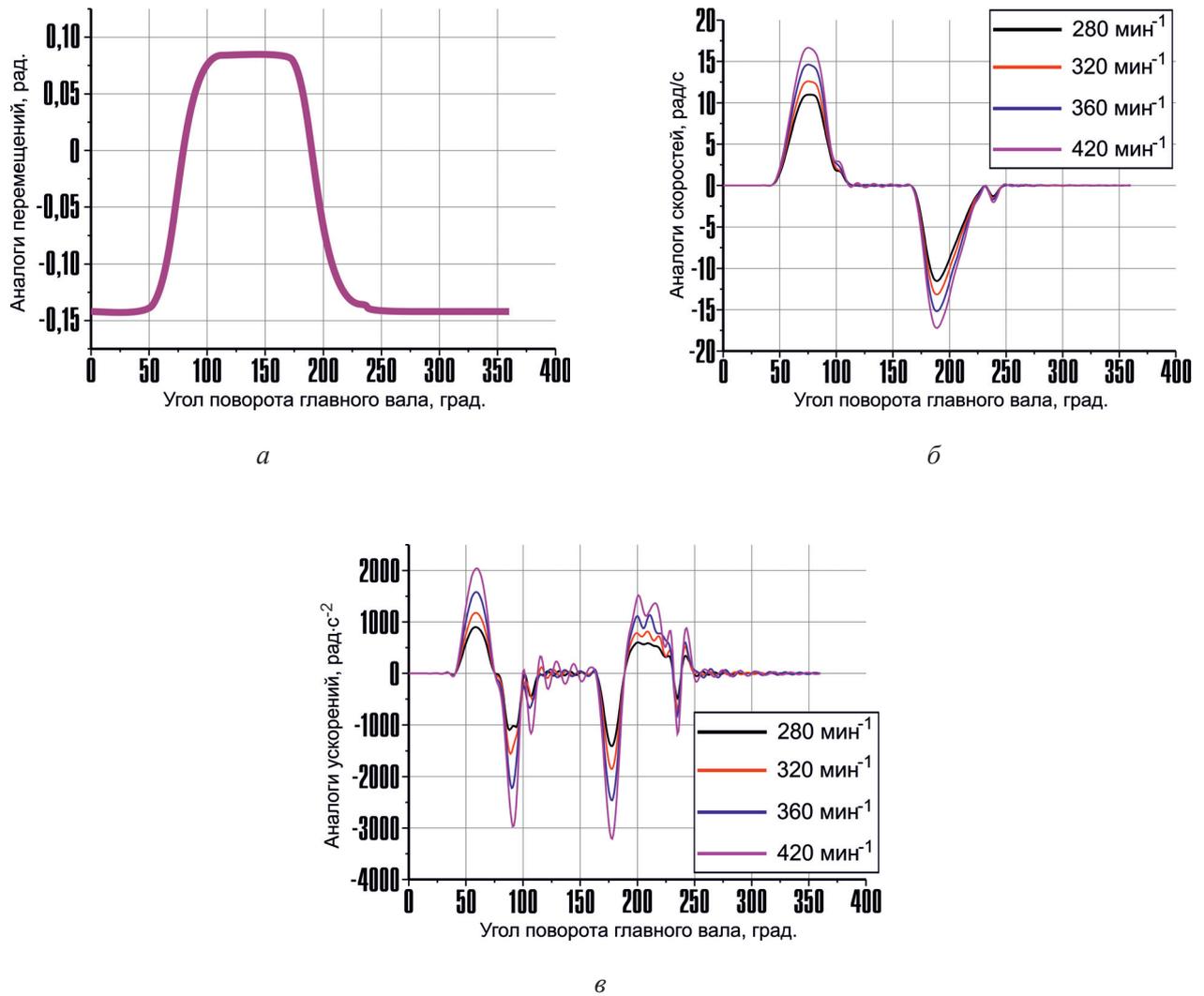


Рис. 4. Графики кинематических характеристик звена привода механизма подъемника прокладчиков, полученные с учетом упругости звеньев при частоте вращения главного вала $n = 280 \dots 420 \text{ мин}^{-1}$:

a – аналоги перемещений; *б* – аналоги скоростей; *в* – аналоги ускорений

Fig.4. End link kinematic characteristics of the microshuttle lift mechanism calculated with the account of the link elasticity at the main shaft rotation rate $n = 280 \dots 420 \text{ min}^{-1}$:

a – movement analogs; *б* – velocity analogs; *в* – acceleration analogs

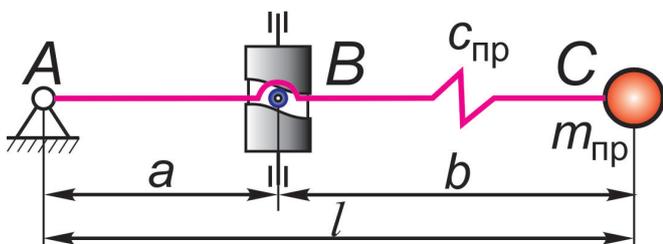


Рис. 5. Схема для расчета приведенной жесткости для момента движения без контакта с упором

Fig. 5. Model for reduced stiffness calculation at the moment before the stop member impact

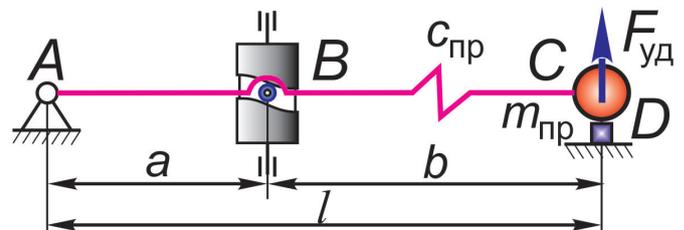


Рис. 6. Схема для расчета приведенной жесткости в момент контакта ведомого звена с жестким упором

Fig. 6. Model for reduced stiffness calculation at the moment of the impact of driven link with the fixed stop member

Задавая время τ , определим силу $F_{уд}$. Время найдем, предположив, что оно близко к половине периода свободных колебаний системы в соответствии с рекомендациями [25]. Для рассматриваемого механизма $F_{уд} = 4,137 \dots 6,2$ Н при скорости вращения главного вала 280...420 об/мин.

Рассмотрим колебания системы, представленной одной массой, приведенной к точке С (см. рис. 5). В начальный момент контакта рычага с упором его поведение будем рассматривать как результат воздействия на него вынуждающей силы (см. рис. 6). Составим дифференциальное уравнение, описывающее поведение механизма после контакта с упором.

Дифференциальное уравнение, описывающее вынужденные колебания одномассовой системы от произвольной вынуждающей силы, в соответствии с [26] имеет вид

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + \omega_c^2 q = \frac{1}{a} Q_F(t).$$

Пусть на систему действует динамическая нагрузка $Q_F(t)$, которая приводит ее в движение. Закон изменения нагрузки, действующей на ведомое звено, представлен на рис. 7.

В случае, когда на рассматриваемую систему кроме восстанавливающих сил и сил сопротивления с некоторого момента времени t_1 действует возмущающая сила $Q_F(t_1)$, за промежуток времени dt_1 эта сила вызывает дополнительное приращение обобщенной скорости $d\dot{q}_{доп}$ [26].

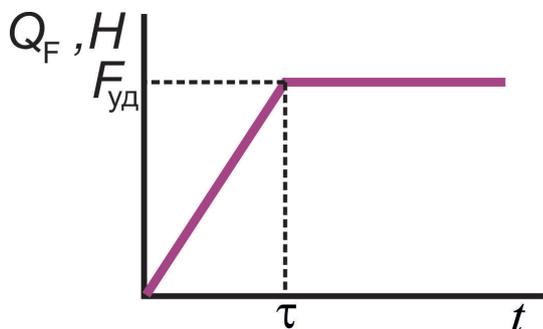


Рис. 7. Закон изменения нагрузки в момент касания ведомым звеном упора

Fig.7. The law of load variation at the moment of contact by the driven link of the stop member

С учетом действия на систему $d\dot{q}_{доп}$ в течение $0 \leq t_1 \leq \tau$, решение уравнения (1) имеет вид [25]

$$q = q_0 e^{-nt} \left(\cos k_1 t + \frac{n}{k_1} \sin k_1 t \right) + \frac{\dot{q}_0}{k_1} e^{-nt} \sin k_1 t +$$

$$+ \frac{1}{ak_1} \int_0^\tau Q_F(t_1) e^{-n(t-t_1)} \sin k_1(t-t_1) dt_1, \quad (2)$$

где $k_1 = \sqrt{\omega_c^2 - n^2}$.

Выражение (2) предлагается использовать, чтобы оценить амплитуду первого отскока ведомого звена после контакта с упором. Вычисления проводятся с использованием математического пакета MathCAD при $q_0 = 0$, $\dot{q}_0 = \omega_0$.

Сила $Q_F(t)$ представлена в виде

$$Q_F(t) = \begin{cases} F_{уд} \frac{t}{\tau} & \text{при } t \leq \tau, \\ F_{уд} \frac{2\tau - t}{\tau} & \text{при } t \geq \tau. \end{cases}$$

Исследования колебания механизма на собственной частоте после контакта с упором проведены с использованием уравнения (2). Амплитуда первого отскока приемника прокладчиков после касания верхней пластины для механизма подъемника прокладчиков составляет 0,022 мм при скорости главного вала 177 об/мин, натяге 0,25 мм. Экспериментальное значение амплитуды для подъемника прокладчиков составляет 0,02 мм [8]. Полученное относительное отклонение расчетного значения составляет 10 %.

Результаты расчетов колебаний приемника прокладчиков после удара об упор при частоте вращения главного вала $n = 280 \dots 420$ об/мин представлены на рис. 8.

Из полученных данных об амплитуде первого отскока исполнительного звена сформулированы ограничения в оптимизационной задаче (1) в виде линеаризованной зависимости от изменения фазового угла:

$$a(3,7) = -0,003t(3,7) + 0,208,$$

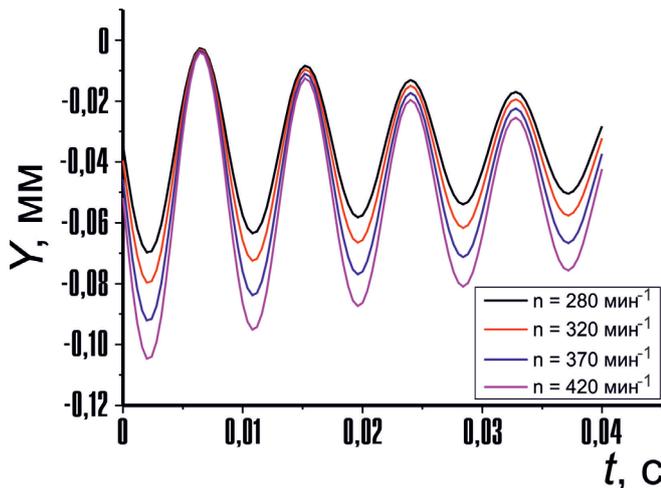


Рис. 8. Колебания приемника механизма подъемника прокладчиков после контакта с верхней пластиной при частоте вращения главного вала $n = 280 \dots 420 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 8. End link vibrations of the microshuttle lift mechanism after the contact with the upper plate at the speed of the main shaft $n = 280 \dots 420 \text{ мин}^{-1}$

где $a(3,7)$ – амплитуда колебаний рабочего органа на участке (3,7) сетевой циклограммы (см. рис. 2); $t(3,7)$ – фазовый угол операции (3,7) (см. рис. 2).

Выводы

1. Предложены динамические модели механизмов, учитывающие взаимодействие ведомых звеньев с ограничительными упорами.
2. Проведен расчет динамических погрешностей законов движения кулачкового механизма, работающего с ударом об упор, при скорости вращения главного вала $n = 280 \dots 420 \text{ мин}^{-1}$.
3. Сформулирована ограничительная часть оптимизационной задачи циклограммирования с учетом колебаний исполнительного звена и ударного взаимодействия его с ограничительным упором.
4. Величина отскока конечного звена механизма подъемника составляет: 0,07, 0,078, 0,092, 0,105 мм при частоте вращения главного вала 280, 320, 370, 420 мин^{-1} соответственно.

Список литературы

1. Цейтлин Г.В. Циклограммирование сложных технологических машин-автоматов // Машиноведение. – 1975. – № 3. – С. 49–53.
2. Новгородцев В.А. Представление цикловой диаграммы машины в виде графа // Теория механизмов и машин. – 1982. – Вып. 33. – С. 57–60.

3. Jomartov A., Joldasbekov S. Typical dynamic models of the cyclic mechanism on the software simulationX // Proceedings of the 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, 25–30 October 2015. – Taipei, 2015. – doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS11.001.

4. Jomartov A.A. Multi-objective optimization of cyclogram mechanisms machine-automaton // Proceedings of the World Congress on Engineering WSE 2011, London, U.K., 6–8 July 2011. – London, 2011. – Vol. 3.

5. Artobolevsky I.I. Mechanisms in modern engineering design: a handbook for engineers, designers and inventors. Vol. 4. Cam and friction mechanisms flexible-link mechanisms. – Moscow: Mir, 1977. – 520 p.

6. Петрокас Л.В. Вопросы теории циклограммирования производственных машин и автоматических линий // Теория машин-автоматов и пневмогидроприводов / под ред. Л.В. Петрокаса. – М.: Машиностроение, 1970. – С. 22–36.

7. Graph-based modelling in engineering / ed. by S. Zawislak, J. Rysiński. – Switzerland: Springer International Publ., 2017. – 247 p. – (Mechanisms and Machine Science; vol. 42). – ISBN 978-3-319-39018-5. – eISBN 978-3-319-39020-8. – doi: 10.1007/978-3-319-39020-8.

8. Максимчук О.В. Синтез цикловой диаграммы машины-автомата с кулачковым распределительным валом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.18. – Новосибирск, 2002. – 16 с.

9. Исследование и проектирование цикловых диаграмм технологических машин / Ю.А. Афанасьев, Ю.И. Подгорный, В.Ф. Ермолаев, О.В. Максимчук. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 198 с.

10. Исследование и синтез законов движения кулачковых механизмов: монография / Ю.И. Подгорный, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, М.В. Лукин. – Новосибирск: Изд-во НГПУ, 2011. – 219 с.

11. Вульфсон И.И. Динамика цикловых машин. – СПб.: Политехника, 2013. – 425 с. – ISBN 978-5-7325-1024-9.

12. Vulfson I. Dynamics of cyclic machines. – Cham: Springer International Publ., 2015. – 390 p. – (Foundations of engineering mechanics). – ISBN 978-3-319-12633-3. – eISBN 978-3-319-12634-0. – doi: 10.1007/978-3-319-12634-0.

13. Методика уравнивания роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, Д.В. Лобанов, А.А. Жирова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 41–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50.

14. Проектирование кулачкового механизма с учетом технологической нагрузки и энергетических затрат / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, П.Ю. Скиба // Обработка металлов



(технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 2 (75). – С. 17–27. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.

15. *Dresig H., Vul'fson I.I.* Dynamik der mechanismen. – Wien; New York: Springer, 1989. – 328 p. – ISBN 978-3-7091-9036-4. – doi: 10.1007/978-3-7091-9035-7.

16. *Eckhardt H.D.* Kinematic design of machines and mechanisms. – 1st ed. – New York: McGraw-Hill, 1998. – 620 p. – ISBN-10: 0070189536. – ISBN-13: 978-0070189539.

17. *Rao J.S., Dukkipati R.V.* Mechanism and machine theory. – 2nd ed. – New Delhi: Newage International, 2008. – 600 p. – ISBN-10: 812240426X. – ISBN-13: 978-8122404265.

18. *Sandler B.Z.* Robotics: designing the mechanisms for automated machinery. – San Diego: Academic Press, 1999. – 433 p. – ISBN-10: 0126185204. – ISBN-13: 9780126185201.

19. *Youssef H.A., El-Hofy H.* Machining technology: machine tools and operations. – Hoboken: Taylor & Francis Group, 2008. – 672 p. – ISBN 9781420043396.

20. *Shabana A.A.* Dynamic of multibody systems. – 4th ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 393 p. – ISBN-13: 978-1107042650. – ISBN-10: 1107042658.

21. *Erdman A.G., Sandor G.N.* Mechanism design: analysis and synthesis. – 4th ed. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2001. – 688 p. – ISBN-10: 0130408727. – ISBN-13: 978-0130408723.

22. Advanced theory of mechanisms and machines / M.Z. Kolovsky, A.N. Evgrafov, Yu.A. Semenov, A.V. Slousch. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. – 396 p. – (Foundations of Engineering Mechanics). – ISBN 978-3-642-53672-4. – eISBN 978-3-540-46516-4. – doi: 10.1007/978-3-540-46516-4.

23. *Astashev V.K., Babitsky V.I., Kolovsky M.Z.* Dynamics and control of machines. – 1st ed. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. – 235 p. – ISBN 978-3-642-53698-4. – eISBN 978-3-540-69634-6. – doi: 10.1007/978-3-540-69634-6.

24. *Hendrickson C.T., Janson B.N.* A common network flow formulation for several civil engineering problems // Civil Engineering Systems. – 1984. – Vol. 1, iss. 4. – P. 195–203. – doi: 10.1080/02630258408970343.

25. *Пановко Я.Г.* Основы прикладной теории колебаний и удара. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с. – ISBN 5-7325-0096-0.

26. *Яблонский А.А., Нореико С.С.* Курс теории колебаний: учебное пособие для студентов технических вузов. – Изд. 5-е, стер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 336 с. – ISBN 978-5-94157-989-1.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Features of Machine Cyclogram Optimization with the Account of Interaction of Mechanism Links with Stops

Yuriy Podgornyj^{1, 2, a}, Olga Maximchuk^{2, b, *}, Alexander Kirillov^{1, 3, c}, Vadim Skeebea^{1, d}

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Novosibirsk Technological Institute (branch) Russian State University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art), 35 Krasny prospect (5 Potaninskaya st.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation

³Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskaya st., Novosibirsk, 630126, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0002-1664-5351>, pjui@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6976-1164>, ovmak@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-8142-2787>, kirillovalvs@mail.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebea_vadim@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 December 2017

Revised: 12 January 2018

Accepted: 12 February 2018

Available online: 15 March 2018

Keywords:

Cyclogram of the machine

Camshaft mechanism

Dynamic model

Impact

Motion law

Optimization of the cyclogram

Funding:

The results were obtained under the state task of the Ministry of Education and Science of Russia, project code: 9.11829.2018/11.12.

ABSTRACT

Introduction. Cyclogram optimization of a technological machine with the account of interaction of the mechanisms links with stop members is discussed. The analysis of scientific literature indicates that cyclogram optimization for complex machines with the account of elastic-dissipative characteristics of the mechanisms needs additional research. Usually simplified dynamic models, which do not take into account elasticity of driven links are used for cyclogram optimization. The urgency of the study is justified by the fact that the existing dynamic models can not be used to calculate the vibrations excited by impacts of the working bodies on the limit stops, when entering into contact with elastic elements. **The goal of the study:** to improve the cyclogram synthesis method for a technological machine making it possible to increase its productivity. **In this study** a cyclogram of a technological machine presented in the form of mathematical models using networks for interaction of mechanisms is investigated. STB shuttleless loom, which is a complex technological machine with many executive mechanisms with interconnected movements, is used as the object of the study. During solution of the optimization problem it is necessary to increase the limiting operation time by decreasing the time for technological operations in mechanism groups. The problem for each group is mathematically formulated as an optimization problem on a network graph. The mechanism of microshuttle lift for the STB loom is used in this study. **Method of investigation:** cyclogram optimization using dynamic models of mechanisms is used. **Results and discussion:** dynamic models of mechanisms taking into account the interaction of driven links with limiting stop mechanisms are suggested. Dynamic errors of motion laws for a camshaft mechanism operating at the main shaft rotation rate $n = 280 \dots 420 \text{ min}^{-1}$ with a stop impact are calculated. The mechanism vibrations at natural frequency after contact with the stop are studied. Limitations of the cyclogram optimization problem with the account of the executive link vibrations and impact interaction with the limiting stop are formulated.

For citation: Podgornyj Yu.I., Maximchuk O.V., Kirillov A.V., Skeebea V.Yu. Features of machine cyclogram optimization with the account of interaction of mechanism links with stops. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 44–54. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-44-54. (In Russian).

References

1. Tseitlin G.V. Tsiklogrammirovaniye slozhnykh tekhnologicheskikh mashin-avtomatov [Cyclogramming of complex technological machine-machines]. *Mashinovedeniye = Engineering Science*, 1975, no. 3, pp. 49–53. (In Russian).

* Corresponding author

Maximchuk Olga V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk Technological Institute (branch) Russian State University named
 after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art),
 35 Krasny prospect (5 Potaninskaya st.),
 630099, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel: 8 (383) 222-79-29, e-mail: ovmak@mail.ru



2. Novgorodtsev V.A. Predstavlenie tsiklovoi diagrammy mashiny v vide grafa [Representation of a cyclic diagram of a machine in the form of a graph]. *Teoriya mekhanizmov i mashin = Theory of Mechanisms and Machines*, 1982, iss. 33, pp. 57–60.
3. Jomartov A., Joldasbekov S. Typical dynamic models of the cyclic mechanism on the software simulationX. *Proceedings of the 14th IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, 25–30 October 2015. doi: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS11.001.
4. Jomartov A.A. Multi-objective optimization of cyclogram mechanisms machine-automaton. *Proceedings of the World Congress on Engineering WSE 2011*. Vol. 3. London, U.K., 6–8 July 2011.
5. Artobolevsky I.I. *Mechanisms in modern engineering design: a handbook for engineers, designers and inventors*. Vol. 4. *Cam and friction mechanisms flexible-link mechanisms*. Moscow, Mir, 1977. 520 p.
6. Petrokas L.V. Voprosy teorii tsiklogrammirovaniya proizvodstvennykh mashin i avtomaticheskikh liniy [Reviews of cyclogram manufacturing machines and automatic production lines]. *Teoriya mashin-avtomatov i pnevmogidroprivodov* [Theory of automatic machines and pneumatic actuators]. Ed. by L.V. Petrokas. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, pp. 22–36.
7. Zawislak S., Rysiński J., eds. *Graph-based modelling in engineering. Mechanisms and machine science*, vol. 42. Switzerland, Springer International Publ., 2017. 247 p. ISBN 978-3-319-39018-5. eISBN 978-3-319-39020-8. doi: 10.1007/978-3-319-39020-8.
8. Maksimchuk O.V. *Sintez tsiklovoi diagrammy mashiny-avtomata s kulachkovym raspredelitel'nym valom*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Synthesis of the cyclic diagram of a machine with a cam-driven camshaft. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2002. 16 p.
9. Afanas'ev Yu.A., Podgorniy Yu.I., Ermolaev V.F., Maksimchuk O.V. *Issledovanie i proektirovanie tsiklovykh diagramm tekhnologicheskikh mashin* [Research and designing of cyclic diagrams of technological machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 198 p.
10. Podgorniy Yu.I., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Lukin M.V. *Issledovanie i sintez zakonov dvizheniya kulachkovykh mekhanizmov* [Research and synthesis of the laws of motion of cam mechanisms]. Novosibirsk, NSPU Publ., 2011. 219 p.
11. Vul'fson I.I. *Dinamika tsiklovykh mashin* [Dynamics of cyclic machines]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2013. 425 p. ISBN 978-5-7325-1024-9.
12. Vul'fson I. *Dynamics of cyclic machines. Foundations of Engineering Mechanics*. Cham, Springer International Publ., 2015. 390 p. ISBN 978-3-319-12633-3. eISBN 978-3-319-12634-0. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0.
13. Podgorniy Yu.I., Martynova T.G., Skeebe V.Yu., Lobanov D.V., Zhironova A.A., Bredikhina A.N., Kosilov A.S., Pechorkina N.S. Metodika uravnoveshivaniya rotorov tekhnologicheskikh mashin [The methods of technological machines' rotors balance]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 2 (71), pp. 41–50. doi: 10.17212/1994-6309-2016-2-41-50.
14. Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Maksimchuk O.V., Skeebe P.Yu. Proektirovanie kulachkovogo mekhanizma s uchetom tekhnologicheskoi nagruzki i energeticheskikh zatrat [Cam mechanism designing with account of the technological load and energy costs]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017, no. 2 (75), pp. 17–27. doi: 10.17212/1994-6309-2017-2-17-27.
15. Dresig H., Vul'fson I.I. *Dynamik der mechanismen*. Wien, New York, Springer, 1989. 328 p. ISBN 978-3-7091-9036-4. doi: 10.1007/978-3-7091-9035-7.
16. Eckhardt H.D. *Kinematic design of machines and mechanisms*. 1st ed. New York, McGraw-Hill, 1998. 620 p. ISBN-10: 0070189536. ISBN-13: 978-0070189539.
17. Rao J.S., Dukkupati R.V. *Mechanism and machine theory*. 2nd ed. New Delhi, Newage International, 2008. 600 p. ISBN-10: 812240426X. ISBN-13: 978-8122404265.
18. Sandler B.Z. *Robotics: designing the mechanisms for automated machinery*. San Diego, Academic Press, 1999. 433 p. ISBN-10: 0126185204. ISBN-13: 9780126185201.
19. Youssef H.A., El-Hofy H. *Machining technology: machine tools and operations*. Hoboken, Taylor & Francis Group, 2008. 672 p. ISBN 9781420043396.
20. Shabana A.A. *Dynamic of multibody systems*. 4th ed. Cambridge University Press, 2013. 393 p. ISBN-13: 978-1107042650. ISBN-10: 1107042658.
21. Erdman A.G., Sandor G.N. *Mechanism design: analysis and synthesis*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2001. 688 p. ISBN-10: 0130408727. ISBN-13: 978-0130408723.

22. Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V. *Advanced theory of mechanisms and machines. Foundations of Engineering Mechanics*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2000. 396 p. ISBN 978-3-642-53672-4. eISBN 978-3-540-46516-4. doi: 10.1007/978-3-540-46516-4.

23. Astashev V.K., Babitsky V.I., Kolovsky M.Z. *Dynamics and control of machines*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2000. 235 p. ISBN 978-3-642-53698-4. eISBN 978-3-540-69634-6. doi: 10.1007/978-3-540-69634-6.

24. Hendrickson C.T., Janson B.N. A common network flow formulation for several civil engineering problems. *Civil Engineering Systems*, 1984, vol. 1, iss. 4, pp. 195–203. doi: 10.1080/02630258408970343.

25. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoi teorii kolebanii i udara* [Fundamentals of the applied theory of oscillation and impact]. 4th ed. Leningrad, Politekhnik Publ., 1990. 272 p. ISBN 5-7325-0096-0.

26. Yablonskii A.A., Noreiko S.S. *Kurs teorii kolebanii* [Course of oscillations theory]. 5th ed., St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2007. 336 p. ISBN 978-5-94157-989-1.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Моделирование теплового и структурного состояния полого катода вакуумного плазмотрона

Ольга Дутова^{1, a, *}, Андрей Шишкин^{1, b}, Владимир Чередниченко^{2, c}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^a  <http://orcid.org/0000-0001-5366-8010>,  odutova@ngs.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-5431-0077>,  andrshi@itp.nsc.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-4844-5928>,  bm@skbterm.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.387.143 + 536.2 + 548.53

История статьи:

Поступила: 14 ноября 2017
 Рецензирование: 12 января 2018
 Принята к печати: 08 февраля 2018
 Доступно онлайн: 15 марта 2018

Ключевые слова:

Плазмотрон
 Катод
 Температурное поле
 Рекристаллизация
 Размер зерна

АННОТАЦИЯ

Введение. Дуговые плазмотроны широко используются в различных областях науки и техники. Ресурс непрерывной работы электродов определяет эффективность плазмотрона и является одной из его важнейших технологических характеристик. Теоретическое и экспериментальное исследование физико-механических процессов в материале катода направлено на повышение длительности его работы и является актуальной задачей. **Цель работы:** создание физико-математических моделей и численное исследование тепловых и рекристаллизационных процессов, происходящих в полом катоде вакуумного плазмотрона под воздействием электрической дуги. **Методы исследования.** Для исследования температурного поля катода при воздействии электрической дуги проводится совместное численное решение дифференциального уравнения Фурье с внутренним источником тепла, уравнения Лапласа для электрического потенциала и уравнения закона Ома. При работе плазмотрона в катоде формируются и растут зародыши новых зёрен. Наиболее существенными для рекристаллизационных процессов являются три взаимосвязанных между собой явления – это нагрев материала, зарождение и рост новых зёрен. На основе данных о температурном поле и параметрах активационных моделей процессов зарождения и роста зёрен в вольфраме получено распределение размера кристаллического зерна по объёму катода. Предложенные математические модели позволяют проводить численное моделирование различных режимов работы полого катода, оценивать изменение структуры материала в процессе его нагрева и могут быть использованы для исследования и повышения эксплуатационных характеристик полых катодов вакуумных плазмотронов. **Результаты и обсуждение.** Полученные решения показали, что нагрев катода характеризуется большими скоростями и быстрым выходом на стационарный режим. Нужно отметить резкое изменение температуры по длине катода в окрестности активной зоны (поверхности нагрева). Характерным признаком распределения температуры являются значительные осевые и радиальные градиенты температуры, которые могут приводить к большим термическим напряжениям в катоде. Результаты расчёта показали, что размер зерна увеличивается с уменьшением перегрева над температурой начала рекристаллизации. Это связано с тем, что с ростом перегрева скорость образования новых зёрен опережает скорость их роста, и зерно начинает уменьшаться в размере. Для исследованных значений плотности потока среднее по длине катода значение размера первично рекристаллизованного зерна находится в интервале 3,7...14 мкм. Время, необходимое для получения монокристаллической стенки полого катода в результате собирательной и/или вторичной рекристаллизации, составляет 1...32 ч. В результате полная рекристаллизация зерна в поперечном сечении вольфрамового катода может происходить за один цикл работы плазмотрона. Это означает, что электрофизические и тепловые характеристики катода существенно меняются в ходе его работы. Размер зерна также оказывает существенное влияние на сопротивление разрушающему воздействию термических напряжений.

Для цитирования: Дутова О.С., Шишкин А.В., Чередниченко В.С. Моделирование теплового и структурного состояния полого катода вакуумного плазмотрона // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 55–68. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-55-68.

Введение

В настоящее время дуговые плазмотроны широко используются в различных областях науки и техники, а также для решения новых электротехнологических задач [1]. Круг плазменно-термических процессов, включающих

*Адрес для переписки

Дутова Ольга Степановна, к.ф.-м. н., н.с.
 Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
 пр. Академика Лаврентьева, 1,
 630090, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: 8 (383) 333-10-96, e-mail: odutova@ngs.ru

их применение, все время увеличивается. Так, большой экономический эффект дает использование плазмотронов на теплоэлектростанциях для розжига пылеугольных котлов [2–5]. Активно ведутся исследования по использованию плазмотронов в технологиях по переработке техногенных отходов [6–9]. В силу этого типы используемых установок (аппаратов), их мощности, а также режимы эксплуатации отличаются большим многообразием [1, 10]. Все это делает актуальным совершенствование существующих и разработку новых конструкций плазмотронов.

Важнейшим элементом вакуумного плазмотрона является полый катод, определяющий все электрические, энергетические и эксплуатационные характеристики вакуумной плазменной установки [11–14]. Использование вакуумных плазмотронов с катодами в виде полузамкнутой полости позволило получить значительные плотности тепловых потоков на поверхности нагрева при низких рабочих напряжениях (30...100 В), а также возможность получения высокого КПД (до 80...90 %) в диапазоне давлений от 1 до 10^3 Па [12, 14]. Полый катод представляет собой цилиндрическую трубку, через которую подается газ в камеру низкого давления. Открытый конец трубки направлен в сторону анода. Длина катодной трубки должна составлять несколько ее внутренних диаметров.

Процессы теплообмена в катодном узле достаточно сложны. Экспериментальное изучение процессов в полном катоде трудоемко, и возможно только косвенное измерение физических величин, определяющих протекание процессов внутри полости. Тепловое состояние катода формируется под воздействием плазмы на его внутреннюю поверхность, является следствием процессов, происходящих в ней, и, следовательно, сильно зависит от ее физических параметров.

Ресурс работы электродуговых нагревателей газов определяется скоростью разрушения электродов [12–14]. Механизм эрозии материала электродов зависит от многих факторов – используемого материала, условий охлаждения, давления в разрядной камере и в немалой степени от параметров дугового разряда. Поэтому теоретическое и экспериментальное исследование физико-механических процессов в материале электрода плазмотрона, направленное на повы-

шение длительности их работы, является актуальной задачей.

Цель настоящей работы: создание физико-математических моделей и численное исследование тепловых и рекристаллизационных процессов, происходящих в полном катоде вакуумного плазмотрона под воздействием электрической дуги.

Методика исследований

Физико-математическое моделирование процессов нагрева полых катодов

Взаимодействие плазмы с твердым телом определяется не только процессами, происходящими на его поверхности, но и изменениями физических характеристик в объеме материала. Для катодов дугового разряда поле температур в объеме материала и на его поверхности является одной из основных величин, характеризующих их работоспособность. С одной стороны, плотность эмиссионного тока и эрозия зависят от поверхностного распределения температуры, а с другой – возникающие из-за неравномерности нагрева катода температурные напряжения могут привести к его разрушению еще до оплавления поверхности контакта с дугой. Кроме того, механическому разрушению катода в ходе эксплуатации может способствовать ухудшение его электрофизических и механических характеристик, связанное с изменением структуры металла под воздействием высоких температур, термоциклирования и рекристаллизации.

В работах [15–18] показано, что положение зоны привязки тока к катоду (активной зоны) определяется сложной взаимосвязью электродинамических и газодинамических процессов, протекающих в катоде. Активная зона локализована в узком кольце, ширина (z_1, z_2) которого вдоль оси катода z увеличивается с ростом тока. Из экспериментов известно [12, 16], что увеличение тока разряда приводит к росту максимума температуры катода и перемещению его по оси z с незначительными изменениями ширины активной зоны.

Рассмотрим теплообмен в полном катоде, который представляет собой цилиндрическую трубку с внутренним и внешним радиусами R_1 и R_2 соответственно. Длина L катодной трубки

должна составлять несколько ее внутренних диаметров. Материал электрода – вольфрам. За счет взаимодействия плазмы с внутренней поверхностью формируется кондуктивный тепловой поток, определяющий в целом температурное поле катода. Систематическая обработка большого числа экспериментов [1–4, 12, 15–16, 19–20] показала, что зависимость суммарного теплового потока $q_{\Sigma} = q_i + q_{re} - q_{em}$ от координаты z можно задать в виде функции распределения Гаусса $q_{\Sigma}(z) = q_{\max} \exp[-(z - z_{\max})^2/\sigma_1]$. Здесь q_i , q_{re} , q_{em} – плотности потоков, переносимые ионами, обратными электронами и электронами эмиссии; z_{\max} – координата максимума теплового потока q_{\max} , через которую проходит ось симметрии; σ_1 – расстояние от оси симметрии до точки перегиба.

Вследствие независимости параметров тепловых потоков, формы и материала катода от угловой координаты уравнение теплопроводности можно представить в цилиндрических координатах в двумерном приближении [12, 21]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + j_0^2(r, z) \rho(T) = c(T) d(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где c , d , λ , ρ – удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности, удельное сопротивление материала; $j_0(r, z)$ – распределение плотности тока в катоде, которая определяется из решения уравнения Лапласа, характеризующего распределение электрического потенциала φ в стенке катода:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = 0. \quad (2)$$

По найденному распределению $\varphi(r, z)$ плотность тока j_0 определяется по формуле

$$j_0 = \frac{1}{\rho(T)} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Граничные условия к уравнению (1) следующие:

на внутренней поверхности:

$$-\lambda \frac{\partial T(R_1, z)}{\partial r} = q_{\Sigma}(z), \quad 0 \leq z \leq L;$$

на внешней поверхности – излучение по закону Стефана–Больцмана:

$$-\lambda \frac{\partial T(R_2, z)}{\partial r} = -\varepsilon(T) \sigma T^4(R_2, z), \quad 0 \leq z \leq L,$$

где ε – степень черноты материала; σ – постоянная Стефана–Больцмана;

на торцевой поверхности катода учитываются потери излучением:

$$-\lambda \frac{\partial T(r, 0)}{\partial z} = -\varepsilon(T) \sigma T^4(r, 0), \quad R_1 \leq r \leq R_2;$$

на границе с катододержателем предполагается идеальный тепловой контакт:

$$T(r, L) = T_{ch}, \quad R_1 \leq r \leq R_2,$$

где T_{ch} – температура катододержателя.

Начальное условие:

$$T(r, z, t) = T_0.$$

Граничные условия к уравнению (2) следующие:

на внутренней поверхности в зоне привязки тока к катоду:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi(R_1, z)}{\partial r} = j_{\Sigma}(z), \quad 0 \leq z \leq L;$$

на внешней поверхности:

$$\frac{\partial \varphi(R_2, z)}{\partial r} = 0, \quad 0 \leq z \leq L;$$

на торце и на границе с катододержателем:

$$\frac{\partial \varphi(r, 0)}{\partial z} = 0, \quad \varphi(r, L) = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2.$$

Для решения задачи методом конечных разностей применялась схема второго порядка аппроксимации по пространственным координатам и первого – по времени [22]. Полученные разностные уравнения решались методом прогонки.

Расчеты проводили для тепловых потоков с параметрами:

а) $q_{\max} = 2,5$ МВт/м², $z_{\max} = 0,02027$ м, $\sigma_1 = 0,0004$;

б) $q_{\max} = 3,5$ МВт/м², $z_{\max} = 0,02027$ м, $\sigma_1 = 0,00022$. При расчетах принимали, что теплофизические свойства материала катода (вольфрам) зависят от температуры.

Размеры катода: $R_1 = 22,5$ мм, $R_2 = 27,5$ мм, $L = 70$ мм.

Зависимость роста зерна от температуры в материале полого катода

Поликристалл состоит из большого числа зерен с различно ориентированными кристаллическими решетками. В межзеренных границах (МЗГ) нарушена правильность расположения атомов, повышена концентрация примесей. В соответствии с длиной волны электрона в металле рассеяние электронов в том числе происходит на точечных дефектах, которых особенно много в МЗГ. Поэтому площадь МЗГ, а следовательно, и размер зерна представляют для нас наибольший интерес, так как оказывают существенное влияние на электросопротивление и теплопроводность материала катода.

Повышение температуры стимулирует начало процесса рекристаллизации. Рекристаллизация зависит от чистоты металла, содержания легирующих элементов, способа, скорости и температурного интервала деформации, так как все эти факторы определяют характер структуры, сформировавшейся при деформации, и скорости протекающих при рекристаллизации процессов. Обзор механизмов образования зародышей рекристаллизации приведен в работе [23]. Из экспериментальных данных однозначно следует, что зарождение центров рекристаллизации происходит на границах зерен или блоков. На границе, где происходит зарождение нового зерна, требуется высокая степень деформации $\epsilon_d \geq 0,43$. Скорость роста первых центров рекристаллизованных зерен увеличивается с 10^{-15} до 10^{-10} см/с, а энергия активации ΔH_G – с 360 до 753 кДж/моль при переходе от монокристаллического вольфрама к вольфраму дугового вакуумного переплава (ДВП). Температура начала рекристаллизации для нелегированного вольфрама $T_R = 1373 \dots 1573$ К. Вторичная рекристаллизация начинается при 2273...2373 К [24, 25]. Для легированного вольфрама эти числа на 300...600 К выше. В работе [26] приводятся значения для $\Delta H_G = 473,5$ кДж/моль и энергии активации самодиффузии $E_D = 640,6$ кДж/моль для ДВП-вольфрама. Также отмечается, что скорость миграции межзеренных границ в чистом вольфраме в ≈ 10 раз выше, чем в легированном.

При работе катода плазмотрона происходит процесс формирования и роста зародышей новых зерен. Температурная зависимость параме-

тров N – скорости образования зародышей недеформированного зерна и G – скорости их роста может быть выражена с помощью уравнений [27]

$$G = K_G \exp(-\Delta H_G / RT); \quad (4)$$

$$N = K_N \exp(-\Delta H_N / RT), \quad (5)$$

где K_G, K_N – предэкспоненциальные множители, соответствующие гипотетическим скоростям роста зерен и зародышеобразования при $T \rightarrow \infty$ соответственно; ΔH_G – энергия активации в процессах роста зерен; ΔH_N – энергия активации в процессах зарождения зёрен; R – универсальная газовая постоянная.

Рост зёрен высокой степени чистоты в изотермических условиях обычно описывается параболическим законом [27]:

$$D^2 - D_0^2 = K_0 \exp(-\Delta H / RT) \tau, \quad (6)$$

где D_0 и D – средние значения начального и текущего диаметров зерен; K_0 – постоянный коэффициент; ΔH – энергия активации; τ – время. Так как средняя линейная скорость перемещения границ зерен G как в изотермических, так и в неизотермических условиях равна $0,5(dD/dT)$, то в случае нагрева с постоянной скоростью b скорость роста зерен выражается формулой

$$G = 0,5b(dD / dt), \quad (7)$$

и может определяться непосредственным дифференцированием зависимости $D = f(\tau)$, где τ – время изотермической выдержки.

В соответствии с уравнением (6) линейная скорость роста зерен может быть выражена формулой

$$\begin{aligned} G &= 0,5(dD / dt) = \\ &= 0,25(K_0/D) \exp(-\Delta H / RT). \end{aligned} \quad (8)$$

По данным [26], в уравнении (4) $K_G = 3 \cdot 10^6$ м/с для чистого и $2,3 \cdot 10^5$ м/с – для легированного W. Скорость образования зародыша при рекристаллизации [$\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$] в соответствии с уравнением (5) имеет активационный механизм, поэтому для расчета по аналогии можно воспользоваться формулой для скорости гетерогенного зародышеобразования [28], предполагая, что скрытая теплота образования экви-

валентна в данном случае энергии активации первичной рекристаллизации:

$$N = \frac{16\pi n'}{a^4} \left(\frac{\gamma T_R \mu}{\rho \Delta H_G \Delta T} \right)^2 D_w \exp \times \\ \times \left[-16\pi \gamma^3 \frac{(T_R \mu / \rho \Delta H_G \Delta T)^2}{k_B (T_R + \Delta T)} \right], \quad (9)$$

где $n' = 10^{16} \varepsilon_d = 0,43 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$ – поверхностная плотность дислокаций в дорекристаллизационном (деформированном) зерне, поскольку максимальная плотность дислокаций в сильно деформированном зерне составляет $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ [24]; $a = 0,31649 \text{ нм}$ – постоянная решетки вольфрама; $\gamma = 2,9 \text{ Дж/м}^2$ – энергия поверхности [29]; $\mu = 0,183 \text{ кг/моль}$ – молярная масса W; $\rho = 19,263 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность вольфрама; ΔT – температура перегрева над T_R ; $D_w = 0,04 \exp \times (-5,4 \text{ эВ} / k_B T) + 46 \exp(-6,9 \text{ эВ} / k_B T)$, $\text{см}^2/\text{с}$ – коэффициент самодиффузии W [30]; k_B – постоянная Больцмана.

Средний радиус зерна в направлении рекристаллизации в соответствии с (8):

$$r(\Delta T(\tau)) = \int_0^{\tau_R} G(\Delta T(\tau)) d\tau. \quad (10)$$

Число зёрен на поверхности S за время полной первичной рекристаллизации τ_R :

$$Z(\Delta T(\tau_R)) = S \int_0^{\tau_R} N(\Delta T(\tau)) d\tau. \quad (11)$$

В то же время число зерен на поверхности после рекристаллизации:

$$Z(\Delta T(\tau_R)) \approx \frac{S}{\pi r^2}. \quad (12)$$

Подставляя уравнение (10) в (12) и приравнявая к (11), получаем интегральное уравнение для нахождения τ_R :

$$\frac{1}{\pi \left(\int_0^{\tau_R} G(\Delta T(\tau)) d\tau \right)^2} = \int_0^{\tau_R} N(\Delta T(\tau)) d\tau, \quad (13)$$

которое в приближении слабой зависимости ΔT от τ в результате быстрого установления стационарного распределения температуры можно записать так:

$$\frac{1}{\pi (G(\Delta T) \tau_R)^2} = N(\Delta T) \tau_R, \quad (14)$$

откуда

$$\tau_R = (p G^2 N)^{-1/3}, \quad (15)$$

$$D(\Delta T) = 2G(\Delta T) \tau_R = 2 \left(\frac{G}{\pi N} \right)^{1/3}. \quad (16)$$

Время рекристаллизации, вычисляемое по формуле (14), должно быть ограничено сверху ресурсом работы плазмотрона (500 ч) и снизу минимальным временем диффузии τ_D в сфере с радиусом, равным a : $\tau_D(T) = (2a)^2/D(T)$.

Результаты и их обсуждение

Распределение температур по объему катода

Нагрев катода характеризуется большими скоростями и достаточно быстрым выходом на стационарный режим. Уже с момента времени $t \sim 50 \dots 55 \text{ с}$ температура всех точек изменяется незначительно (рис. 1). Рис. 2 дает представление о стационарном тепловом состоянии катода. Можно отметить резкое изменение температуры по длине катода в окрестности активной зоны (нагреваемой поверхности) и плавное изменение в остальных частях конструкции. Перепад температуры по толщине катода $\delta = R_2 - R_1$ не превышает $\sim 100 \dots 200 \text{ К}$. Как показано на рис. 1 и 2, в материале катода возникают большие осевой и радиальный градиенты температуры.

Отсюда следует, что, катод находится не только под действием больших тепловых нагрузок, но и значительных термомеханических напряжений. При воздействии дуги на поверхность катода уже в начале процесса нагрева происходит интенсивное объемное расширение металла в зоне дугового воздействия, причем интенсивность и величина расширения определяются скоростью и температурой нагрева. Увеличению объема препятствуют холодные слои, окружающие область нагрева, в результате чего в зоне температурного влияния развиваются сжимающие напряжения, величина которых тем больше, чем выше температура нагрева металла. Растягивающие напряжения могут превышать предел прочности и способствовать формирова-

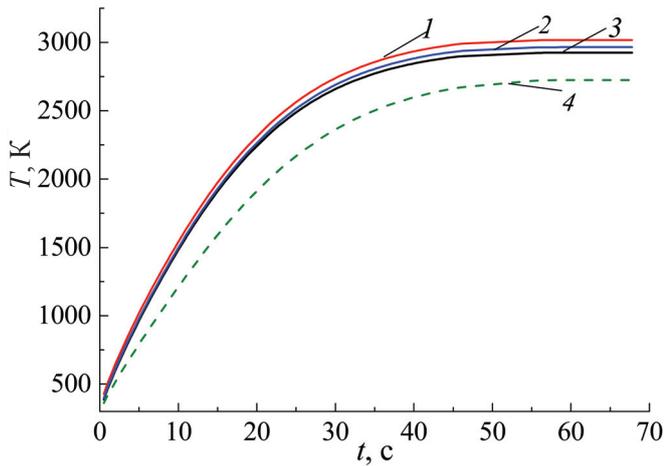


Рис. 1. Изменение температуры от времени в сечениях катода $z = z_{\max}$ (1–3) и $z = L/2$ (4) при $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$:
 1 – $r = R_1$; 2 – $r = R_1 + \delta/2$; 3 – $r = R_2$; 4 – $r = R_1$

Fig. 1. Temperature history for cathode cross-sections $z = z_{\max}$ (1–3) and $z = L/2$ (4) at $q_{\max} = 2.5 \text{ MW/m}^2$:
 1 – is $r = R_1$; 2 – is $r = R_1 + \delta/2$; 3 – is $r = R_2$; 4 – is $r = R_1$

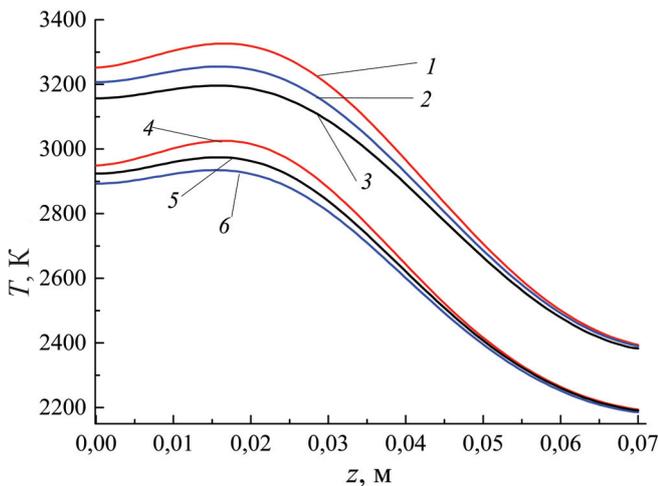


Рис. 2. Распределение температуры по длине катода на момент времени $t = 55 \text{ с}$ при $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$ (1–3) и $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$ (4–6):
 1, 4 – $r = R_1$; 2, 5 – $r = R_1 + \delta/2$; 3, 6 – $r = R_2$

Fig. 2. Temperature distribution along the length of the cathode at time $t = 55 \text{ s}$ at $q_{\max} = 3.5 \text{ MW/m}^2$ (1–3) and $q_{\max} = 2.5 \text{ MW/m}^2$ (4–6):
 1, 4 – are $r = R_1$; 2, 5 – are $r = R_1 + \delta/2$; 3, 6 – are $r = R_2$

нию микротрещин. В дальнейшем все это может вызвать изменения в распределении температуры (повышение температуры поверхности, ее испарение, увеличение эрозии).

Сопоставление положения зоны привязки тока с распределением температуры по поверх-

ности показывает, что максимум температуры стенки катода находится в зоне привязки тока, а длина высокотемпературной зоны значительно превосходит ее длину.

Результаты расчета первичной и вторичной рекристаллизации

Наиболее существенными для определения первичной рекристаллизации являются три взаимосвязанных между собой процесса: процесс нагрева материала катода, процесс зарождения и процесс роста недеформированного зерна. Результаты расчёта представлены на рис. 3 и 4. При малых перегревах до $\Delta T = 500 \text{ К}$ над $T_R = 1423 \text{ К}$ размер зерна увеличивается (рис. 3) из-за низких значений N (рис. 4) и ограничения времени первичной рекристаллизации сверху (рис. 5). Число зародышей рекристаллизации очень мало и времени хватает для собирательной и/или вторичной рекристаллизации и получения монокристаллической по толщине стенки вольфрамового катода. Дальнейший перегрев вызывает увеличение N , превышение скорости ее изменения над скоростью изменения G и соответствующее уменьшение среднего размера зерна D .

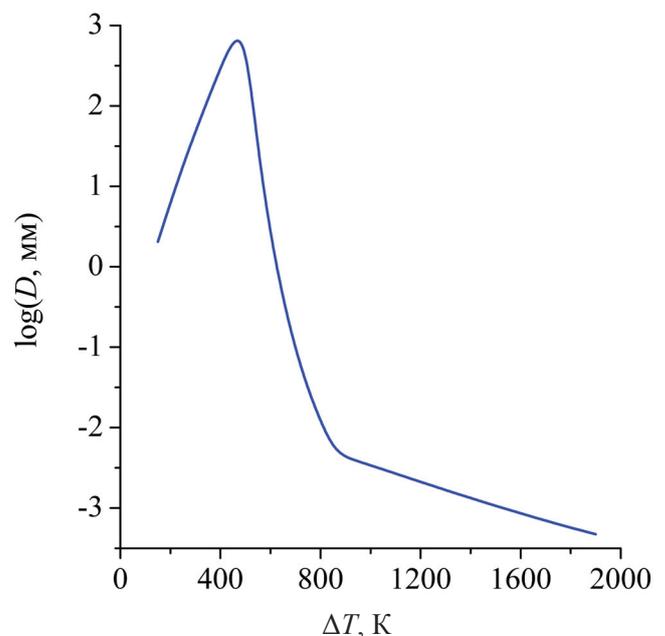


Рис. 3. Зависимость размера рекристаллизованного зерна от перегрева

Fig. 3. Dependence of the size of recrystallized grain on superheating

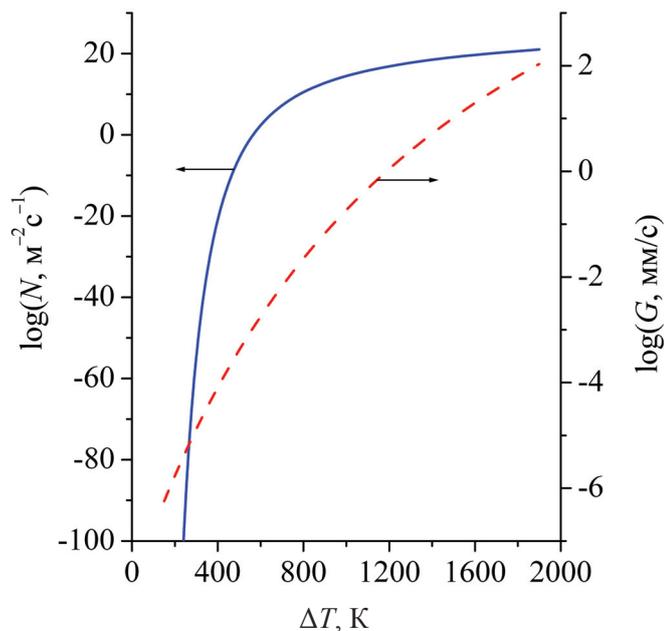


Рис. 4. Зависимость скоростей образования и роста зерна от перегрева
 Fig. 4. Dependence of grain formation and grain growth rates on superheating

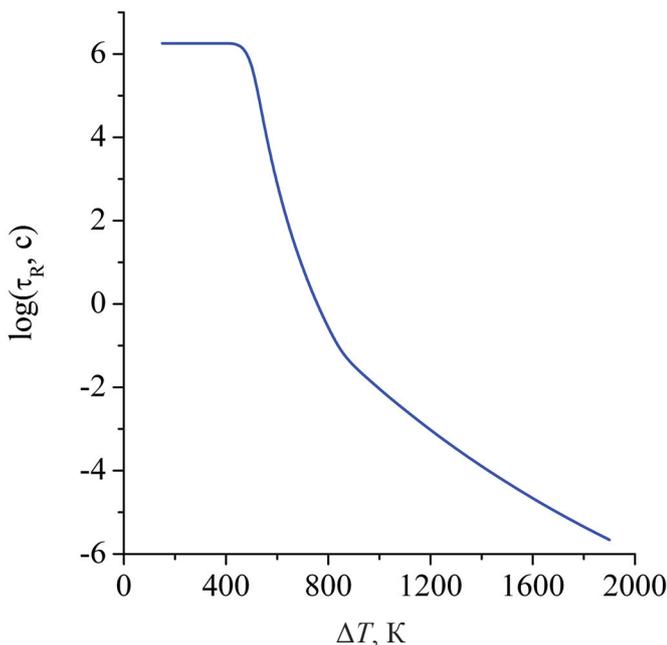


Рис. 5. Зависимость времени окончания первичной рекристаллизации от перегрева
 Fig. 5. Dependence of the end of primary recrystallization on superheating

На рис. 6 показано распределение среднего размера рекристаллизованного зерна D по радиусу полого катода для различных значений z , рассчитанное для $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$ и $t = 54 \text{ с}$ (см.

рис. 1 и 2). Видно, что изменение D по радиусу незначительно по сравнению с его изменением по длине катода. Поэтому на рис. 7 показано распределения роста зерна по длине активной зоны катода для радиуса, отвечающего середине стенки катода.

Из-за высоких скоростей образования зародышей рекристаллизации N зерно уменьшается на более горячих участках катода и увеличивается на более холодных (см. рис. 2 и 3), где скорость роста рекристаллизованного зерна $G > N$ (см. рис. 4). Следует отметить, что средний размер зерна после первичной рекристаллизации, получаемый в рамках уравнений (4), (9), (16), очень чувствителен к параметрам модели. В качестве значений параметров для расчета (представлены выше) мы взяли значения, полученные в исследованиях разных авторов [24, 29, 30]. Такой набор параметров мог оказаться неоптимальным для материала конкретного катода. Для сравнения на рис. 8 представлен пример фотографии излома катода плазмотрона на длине 50 мм.

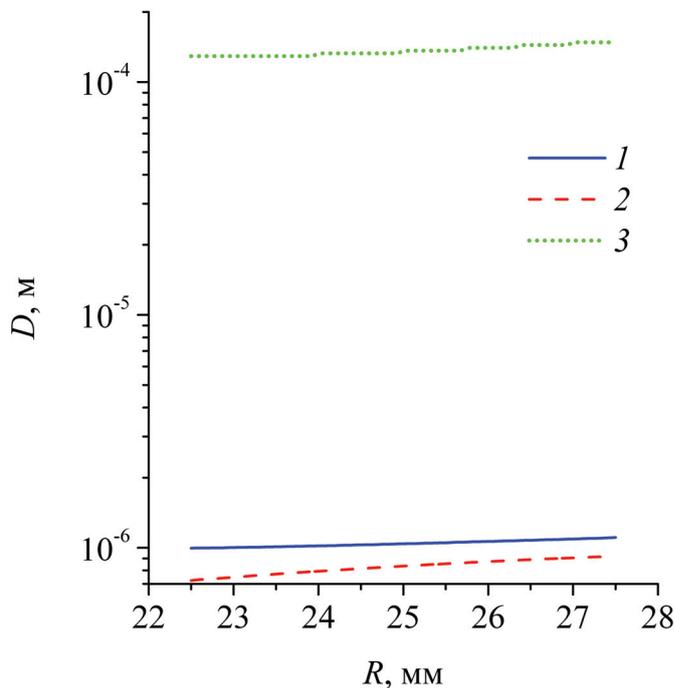


Рис. 6. Распределение размера рекристаллизованного зерна по радиусу катода при $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$:
 1 – при $z = 0 \text{ мм}$; 2 – при $z = 20 \text{ мм}$; 3 – при $z = 70 \text{ мм}$
 Fig. 6. Distribution of the size of the recrystallized grain along the radius of the active zone of the cathode at $q_{\max} = 3.5 \text{ MW/m}^2$:
 1 – is for $z = 0 \text{ mm}$; 2 – is for $z = 20 \text{ mm}$; 3 – is for $z = 70 \text{ mm}$

Фотографии сделаны с использованием оптического микроскопа «ЛОМО». Средний размер зерна на длине 50 мм составил 10 мкм. Отклонение расчета от эксперимента (см. рис. 7) составляет 2,5...3 раза. В реальных условиях работы плазматрона электрод может многократно нагре-

ваться и охлаждаться, что не учтено в сделанных расчетах. Время одного цикла работы плазматрона может превысить время первичной рекристаллизации (см. рис. 5) для отдельных участков катода (см. рис. 2), что приведет к росту зерна в результате собирательной и/или вторичной рекристаллизации [25]. Естественно, чем меньше размер зерна после первичной рекристаллизации (см. рис. 7), тем больше движущая сила собирательной и/или вторичной рекристаллизации. С учетом того, что меньший размер зерна и меньшее время первичной рекристаллизации соответствуют более высоким температурам, собирательная и/или вторичная рекристаллизация в этих областях будет протекать с повышенной скоростью. В результате вариация среднего размера зерна по длине катода будет существенно уменьшена. Для плотности потока тепла при $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$ расчет показывает среднее по длине катода значение размера первично рекристаллизованного зерна 3,7 мкм, а при $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$ – 14 мкм. Эти значения хорошо согласуются с рис. 8. При длительной работе плазматрона собирательная и/или вторичная рекристаллизация приводят к образованию монокристаллической по толщине стенки полого катода [12], пример показан на рис. 9.

Время собирательной рекристаллизации τ_{CR} , необходимое для получения монокристаллической стенки, может быть рассчитано по формуле (6). В этом случае следует принять, что $D_0 = D(\tau_R)$, $D_{\max} = \delta$, $K_0 = 4K_G(D_0 D_{\max})^{0,5}$, $K_G = K_{\text{GCR}} = 0,079 \text{ м/с}$, $\Delta H = \Delta H_{\text{CR}} = 385,2 \text{ кДж/моль}$ [25].

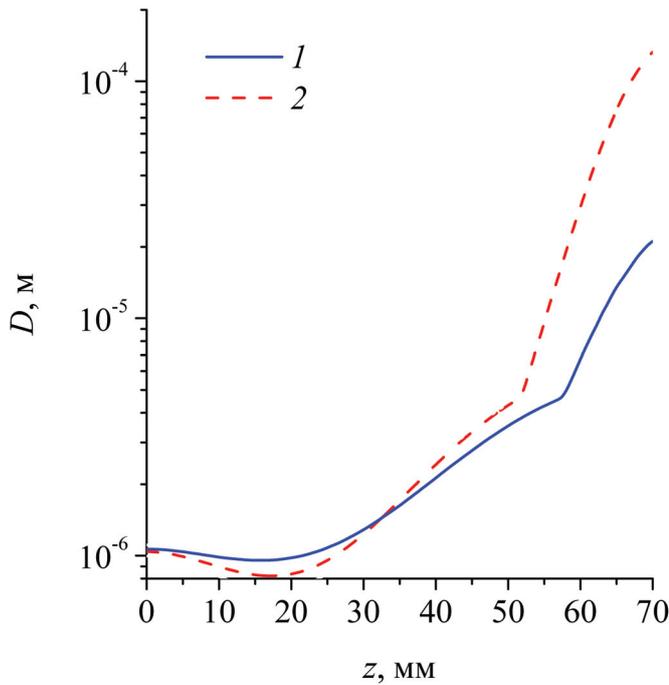


Рис. 7. Распределение размера рекристаллизованного зерна по длине активной зоны катода при $r = R_1 + \delta/2$: 1 – для $q_{\max} = 2,5 \text{ МВт/м}^2$, $t = 75 \text{ с}$; 2 – для $q_{\max} = 3,5 \text{ МВт/м}^2$, $t = 54 \text{ с}$

Fig. 7. Distribution of the size of the recrystallized grain along the length of the cathode at $r = R_1 + \delta/2$: 1 – is for $q_{\max} = 2.5 \text{ MW/m}^2$, $t = 75 \text{ s}$; 2 – is for $q_{\max} = 3.5 \text{ MW/m}^2$, $t = 75 \text{ s}$

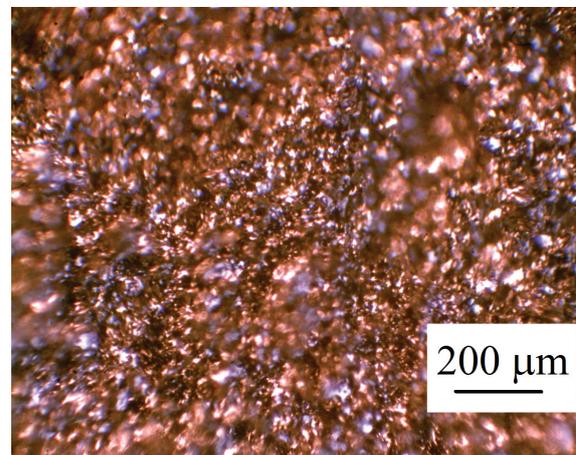
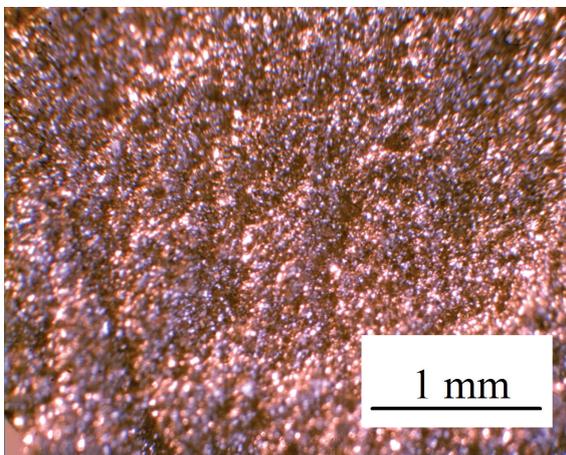


Рис. 8. Фотография излома катода плазматрона на длине 50 мм
Fig. 8. Photo of the plasmatron cathode fracture at a length of 50 mm

Это время получается много больше времени ресурса работы плазмотрона и не соответствует экспериментальным данным, представленным на рис. 9. Полученные результаты экспериментов (см. работу [25]) показывают, что из-за наличия примесей в вольфраме значительно чаще возникает вторичная рекристаллизация, скорости которой существенно больше. В этом случае $K_G = K_{GSR} = 63$ м/с, $\Delta H = \Delta H_{SR} = 360,1$ кДж/моль [25]. Распределение τ_{SR} по длине активной зоны катода, рассчитанное по уравнению (6), показано на рис. 10.

Видно, что полная рекристаллизация зерна в вольфрамовом катоде может происходить за один цикл работы плазмотрона. Это означает, что электрофизические характеристики катода могут существенно меняться в ходе его работы. В легированном вольфраме процессы рекристаллизации идут со скоростями в 10 раз меньшими [25, 26], что может на порядок увеличить τ_{SR} . При относительно быстром охлаждении катода разница температур по его длине остается существенной, и возникающие термические напряжения могут вызвать новый процесс рекристаллизации катода в следующем цикле работы плазмотрона.

С учетом сделанных при расчетах предположений и неоптимизированного набора параме-

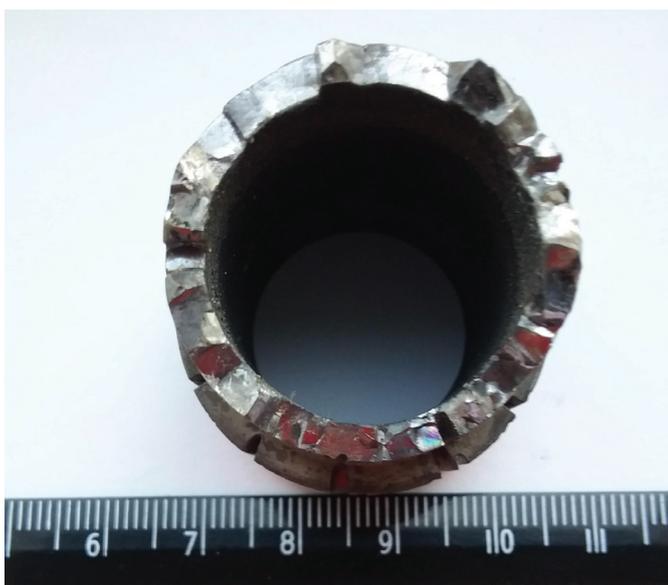


Рис. 9. Фотография излома катода плазмотрона с монокристаллической стенкой

Fig. 9. Photo of the plasmatron cathode fracture with a single crystal wall

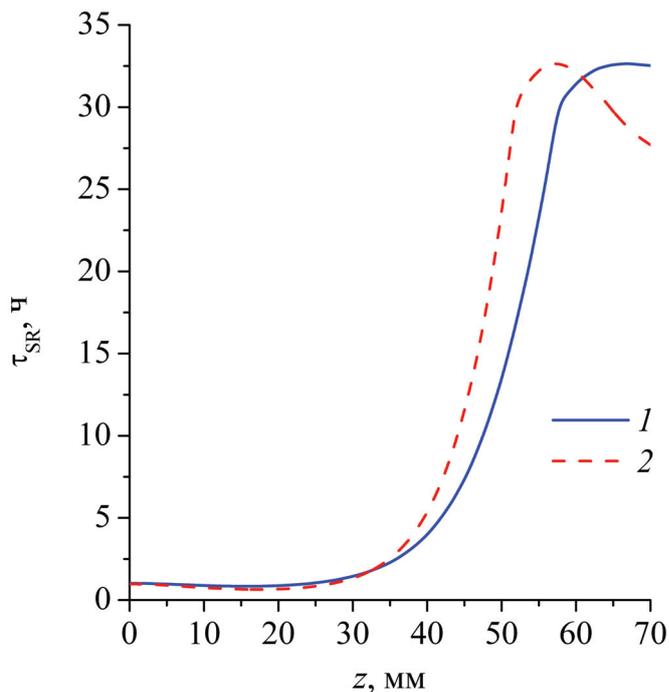


Рис. 10. Распределение максимального времени вторичной рекристаллизации по длине активной зоны катода при $r = R_1 + \delta/2$:

1 – для $q_{\max} = 2,5$ МВт/м², $t = 75$ с; 2 – для $q_{\max} = 3,5$ МВт/м², $t = 54$ с

Fig. 10. Distribution of the maximum time of the secondary recrystallization along the length of the cathode active zone at $r = R_1 + \delta/2$:

1 – is for $q_{\max} = 2.5$ MW/m², $t = 75$ s; 2 – is for $q_{\max} = 3.5$ MW/m², $t = 75$ s

тров модели для материала конкретного катода сравнение с имеющимися экспериментальными данными показывает, что полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными.

Заключение

Предложены математические модели, на основе которых проведено численное моделирование различных режимов работы полого катода, получено пространственное изменение температуры в объеме катода при его нагреве под воздействием электрической дуги и оценено изменение структуры материала. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что данные модели можно использовать для исследования и повышения эксплуатационных характеристик полых катодов вакуумных плазмотронов.

Список литературы

1. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: проблемы и перспективы / Г.Ю. Даутов, А.Н. Тимошевский, Б.А. Урюков и др.; отв. ред. В.М. Фомин, И.М. Засыпкин. – Новосибирск: Наука, 2004. – 464 с. – (Низкотемпературная плазма; т. 20).
2. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / М.Ф. Жуков, Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов, В.Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука, 1995. – 304 с.
3. *Peregudov V.S.* Optimization of the process of plasma ignition of coal // *High Temperature*. – 2009. – Vol. 47, N 2. – P. 181–186. – doi: 10.1134/S0018151X09020059.
4. Pulverized coal plasma gasification / R. Kalinenko, A. Kuznetsov, A. Levitsky, V. Messerle, Yu. Mirokhin, L. Polak, Z. Sakipov, A. Ustimenko // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 1993. – Vol. 13, N 1. – P. 141–167. – doi: 10.1007/BF01447176.
5. *Blackburn P.R.* Ignition of pulverized coal with arc-heated air // *Journal of Energy*. – 1980. – Vol. 4, N 3. – P. 98–99. – doi: 10.2514/3.62464.
6. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system / V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, A.S. Askarova, A.O. Nagibin // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2010. – Vol. 17, N 3. – P. 435–444. – doi: 10.1134/S0869864310030145.
7. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment / K. Moustakas, D. Fatta, S. Malamis, K. Haralambous, M. Loizidou // *Journal of Hazardous Materials*. – 2005. – Vol. 123, N 1–3. – P. 120–126. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.038.
8. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review / E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, A.R. Vocaccini // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 161, iss. 2–3. – P. 614–626. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.017.
9. Плазмотермическая переработка твердых отходов / В.П. Лукашов, С.П. Ващенко, Г.И. Багрянцев, Х.С. Пак // *Экология и промышленность России*. – 2005. – № 11. – С. 4–9.
10. Плазмотроны. Исследования. Проблемы / М.Ф. Жуков, А.Н. Тимошевский, С.П. Ващенко, И.М. Засыпкин, В.П. Лукашов, В.С. Перегудов, Б.И. Михайлов, Т.С. Мельникова, Б.А. Поздняков. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. – 203 с.
11. *Delcroix J.L., Trindade A.R.* Hollow cathode arcs // *Advances in Electronics and Electron Physics*. – 1974. – Vol. 35. – P. 87–190. – doi: 10.1016/S0065-2539(08)60281-4.
12. *Чередниченко В.С., Юдин Б.И.* Вакуумные плазменные электропечи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 586 с. – (Современные электротехнологии; т. 10).
13. *Ferreira C.M., Delcroix J.L.* Theory of the hollow cathode arcs // *Journal of Applied Physics*. – 1978. – Vol. 49, N 8. – P. 2380–2395. – doi: 10.1063/1.325126.
14. *Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г.* Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 508 с.
15. *Чередниченко В.С.* Сильноточные вакуумные дуги с полым катодом. Тепловое поле катода // *Известия СО АН СССР. Серия технических наук*. – 1987. – № 7, вып. 2. – С. 91–96.
16. *Чередниченко В.С., Галкин С.Г., Косинов В.А.* Сильноточные дуги с полым катодом // *Генерация потоков электродуговой плазмы*. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1987. – С. 306–322.
17. Highly ionized hollow cathode discharge / L.M. Lidsky, S.D. Rothleder, D.J. Rose, S. Yoshikawa, C. Michelson, R.J. Mackin // *Journal of Applied Physics*. – 1962. – Vol. 33, N 8. – P. 2490–2497. – doi 10.1063/1.1729002.
18. *Гужков В.В., Козлов Н.П., Хвесьюк В.И.* Экспериментальное исследование баланса токов и энергии в полым катодом // *IV Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам: тезисы докладов*. – М.: ВНИИЦ, 1978. – С. 261–262.
19. *Чередниченко В.С., Косинов В.А.* Дуговой разряд с полым катодом // *Известия СО АН СССР. Серия технических наук*. – 1980. – № 13, вып. 3. – С. 22–30.
20. *Еременко Г.П., Юдин Б.И., Чередниченко М.В.* О взаимодействии плазмы с внутренней поверхностью полого катода вакуумного плазматрона // *Автоматизированные электротехнологические установки: сборник научных трудов*. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – С. 29–34.
21. Низкотемпературная плазма. Т. 11. Математическое моделирование катодных процессов / А.М. Зимин, И.П. Назаренко, И.Г. Паневин, В.И. Хвесьюк. – Новосибирск: Наука, 1993. – 194 с.
22. *Самарский А.А.* Введение в численные методы. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
23. *Кондратьев Н.С., Трусов П.В.* Механизмы образования зародышей рекристаллизации в металлах при термомеханической обработке // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2016. – № 4. – С. 151–174.
24. *Савицкий Е.М., Поварова К.Б., Макаров П.В.* Металловедение вольфрама. – М.: Металлургия, 1978. – 257 с.
25. *Засимчук Е.Э., Исайчев В.И.* Кинетика первичной, вторичной и собирательной рекристаллизации в вольфрамовой проволоке // *Металлофизика*. – Киев: Наукова думка, 1970. – Вып. 31. – С. 56–60.

26. *Klopp W.D., Raffo P.L.* Effects of purity and structure on recrystallization, grain growth, ductility, tensile, and creep properties of arc-melted tungsten. – Washington: National aeronautics and space administration, 1964. – 50 p. – (NASA technical note; NASA TN D-2503).

27. *Горелик С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Наука, 1967. – 389 с.

28. Низкотемпературная плазма. Т. 12. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их

применение для модифицирования металлов и сплавов / В.П. Сабуров, А.Н. Черепанов, М.Ф. Жуков, Г.В. Галевский, Г.Г. Крушенко, В.Т. Борисов. – Новосибирск: Наука, 1995. – 344 с.

29. *Самсонов Г.В.* Свойства элементов. – М.: Металлургия, 1976. – 312 с.

30. Self-diffusion in tungsten / J.N. Mundy, S.J. Rothman, N.Q. Lam, H.A. Hoff, L.J. Nowicki // *Physical Review B*. – 1978. – Vol. 18, N 12. – P. 6566–6575. – doi 10.1103/PhysRevB.18.6566.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Modeling of the Thermal and Structural States of Hollow Cathode of Vacuum Plasmatron

Olga Dutova^{1, a,*}, Andrey Shishkin^{1, b}, Vladimir Cherednichenko^{2, c}

¹ Kutateladze Institute of Thermophysic SB RAS, 1, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0001-5366-8010>, odutova@ngs.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-5431-0077>, andrshi@itp.nsc.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-4844-5928>, bm@skbterm.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 November 2017

Revised: 12 January 2018

Accepted: 08 February 2018

Available online: 15 March 2018

Keywords:

Plasmatron

Cathode

Temperature field

Recrystallization

Grain size

ABSTRACT

Introduction. Arc plasmatrons are widely used in various fields of science and technology. The resource of continuous work of electrodes determines the efficiency of plasmatron and is one of its most important technological characteristics. A theoretical and experimental study of physical and mechanical processes in cathode material is focused on increasing the duration of its running time and is a relevant objective. **The purpose of the work** is the creation of physical and mathematical models and numerical study of thermal and recrystallization processes occurring in the hollow cathode of a vacuum plasmatron under the influence of an electric arc. **Experimental Technique.** To study the temperature field of a cathode under the action of an electric arc, the Fourier differential equation with an internal heat source, Laplace equation for the electric potential, and Ohm's law equation were solved jointly. When the plasmatron is operating, new nuclei are formed and grow in the cathode. Three interrelated phenomena are most important for recrystallization: material heating, new grain nucleation and growth. The distribution of crystalline grain size over the cathode volume was calculated based on the temperature field data and activation model parameters of grain nucleation and growth for tungsten. The proposed mathematical models allow simulating the various modes of hollow cathode operation, evaluating the change in the structure of a material during its heating, and can be used to study and improve the performance characteristics of the hollow cathodes of vacuum plasmatrons. **Results and Discussion.** The obtained solutions showed that the high heating rates and rapid output to stationary mode characterize the cathode heating. It should be noted there is a sharp change in temperature along the cathode length in the area of the active zone (heating surface). The temperature distribution shows the considerable axial and radial temperature gradients, which can lead to large thermal stresses in the cathode. Calculation showed when the superheating over the temperature of recrystallization starts decreasing, the grain size increases. This is due to the fact that when the superheating grows, the nucleation rate outstrips the rate of grain growth, and the grain size decreases. For the investigated flux density values, the size of the primary recrystallized grain, average along the cathode length, is in the range of 3.7–14 μm. The time required to obtain a single-crystal wall of the hollow cathode due to collective and/or secondary recrystallization is 1–32 hours. As a result, complete recrystallization of the grain in the cross-section of tungsten cathode can occur in one cycle of plasmatron operation. This means that the electro-physical and thermal characteristics of the cathode change significantly during its operation. Also the grain size has a significant effect on the resistance to the destructive effects of thermal stresses.

For citation: Dutova O.S., Shishkin A.V., Cherednichenko V.S. Modeling of the thermal and structural states of hollow cathode of vacuum plasmatron. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 55–68. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-55-68. (In Russian).

References

1. Fomin V.M., Zasyplin I.M., eds. *Generatsiya nizkotemperaturnoi plazmy i plazmennye tekhnologii: problemy i perspektivy* [Generation of low-temperature plasma and plasma technologies: problems and prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 464 p.

* Corresponding author

Dutova Olga S., Ph.D. (Physics and Mathematics), Scientific associate
 Kutateladze Institute of Thermophysic SB RAS,
 1, Ac. Lavrentieva ave.,
 630090, Novosibirsk, Russian Federation
 Tel: 8 (383) 333-10-96, e-mail: odutova@ngs.ru

2. Zhukov M.F., Karpenko E.I., Peregodov V.S., Messerle V.E. *Plazmennaya bezmazutnaya rastopka kotlov i stabilizatsiya goreniya pyleugol'nogo fakela* [Plasma without oil firing of boilers and stabilization of combustion of a pulverized-coal torch]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 304 p.
3. Peregodov V.S. Optimization of the process of plasma ignition of coal. *High Temperature*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 181–186. doi: 10.1134/S0018151X09020059.
4. Kalinenko R., Kuznetsov A., Levitsky A., Messerle V., Mirokhin Yu., Polak L., Sakipov Z., Ustimenko A. Pulverized coal plasma gasification. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1993, vol. 13, no. 1, pp. 141–167. doi.org/10.1007/BF01447176.
5. Blackburn P.R. Ignition of pulverized coal with arc-heated air. *Journal of energy*, 1980, vol. 4, no. 3, pp. 98–99. doi: 10.2514/3.62464
6. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Askarova A.S., Nagibin A.O. Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 435–444. doi: 10.1134/S0869864310030145.
7. Moustakas K., Fatta D., Malamis S., Haralambous K., Loizidou M. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, vol. 123, no. 1–3, pp. 120–126. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.038.
8. Gomez E., Amutha Rani D., Cheeseman C.R., Deegan D., Wise M., Boccaccini A.R. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 161, iss. 2–3, pp. 614–626. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.017.
9. Lukashov V.P., Vashchenko S.P., Bagryantsev G.I., Pak Kh.S. Plazmotermicheskaya pererabotka tverdykh otkhodov [Plasma-thermal processing of solid waste products]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2005, no. 11, pp. 4–9.
10. Zhukov M.F., Timoshevskii A.N., Vashchenko S.P., Zasyplin I.M., Lukashov V.P., Peregodov V.S., Mikhailov B.I., Mel'nikova T.S., Pozdnyakov B.A. *Plazmotrony. Issledovaniya. Problemy* [Plasma torches. Research. Problems]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1995. 203 p.
11. Delcroix J.L., Trindade A.R. Hollow cathode arcs. *Advances in electronics and electron physics*, 1974, vol. 35, pp. 67–190. doi: 10.1016/S0065-2539(08)60281-4.
12. Cherednichenko V.S., Yudin B.I. *Vakuumnye plazmennye elektropечи* [Vacuum plasma electric furnaces]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 586 p.
13. Ferreira C.M., Delcroix J.L. Theory of the hollow cathode arcs. *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, no. 8, pp. 2380–2395. doi: 10.1063/1.325126.
14. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. *Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Plasma electrotechnological installations]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 508 p.
15. Cherednichenko V.S. Sil'notochnye vakuumnye dugi s polym katodom. Teplovoe pole katoda [High-current vacuum arcs with a hollow cathode. The thermal field of a cathode]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. A series of technical sciences*, 1987, no. 7, iss. 2, pp. 91–96.
16. Cherednichenko V.S., Galkin S.G., Kosinov V.A. Sil'notochnye dugi s polym katodom [High-current arcs with hollow cathode]. *Generatsiya potokov elektrodugovoi plazmy* [Generation of electric arc plasma flows]. Novosibirsk, Institute of Thermophysics SB AS USSR Publ., 1987, pp. 306–322.
17. Lidsky L.M., Rothleder S.D., Rose D.J., Yoshikawa S., Michelson C., Mackin R.J. Highly ionized hollow cathode discharge. *Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 33, no. 8, pp. 2490–2497. doi: 10.1063/1.1729002.
18. Guzhkov V.V., Kozlov N.P., Khvesyuk V.I. [Experimental study of the balance of currents and energy in a hollow cathode]. *IV Vsesoyuznaya konferentsiya po plazmennym uskoritelyam i ionnym inzhektoram: tezisy dokladov* [4th All-Union Conference on Plasma Accelerators and Ion Injectors: abstracts]. Moscow, VNTITs Publ., 1978, pp. 261–262. (In Russian).
19. Cherednichenko V.S., Kosinov V.A. Dugovoi razryad s polym katodom [Arc discharge with a hollow cathode]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. A series of technical sciences*, 1980, no. 13, iss. 3, pp. 22–30.
20. Eremenko G.P., Yudin B.I., Cherednichenko M.V. O vzaimodeistvii plazmy s vnutrennei poverkhnost'yu pologo katoda vakuumnogo plazmotrona [On the interaction of plasma with the inner surface of the hollow cathode of a vacuum plasmatron]. *Avtomatizirovannye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Automated electrotechnological installations]. Novosibirsk, Novosibirsk Electrotechnical Institute Publ., 1991, pp. 29–34.

21. Zimin A.M., Nazarenko I.P., Panevin I.G., Khvesyuk V.I. *Nizkotemperaturnaya plazma*. T. 11. *Matematicheskoe modelirovanie katodnykh protsessov* [Low temperature plasma. Vol. 11. Mathematical modeling of cathode processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993. 194 p.
22. Samarskii A.A. *Vvedenie v chislennye metody* [Introduction to numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 288 p.
23. Kondrat'ev N.S., Trusov P.V. Mekhanizmy obrazovaniya zarodyshei rekristallizatsii v metallakh pri termomekhanicheskoi obrabotke [Nucleation recrystallization mechanisms in metals at thermomechanical processing]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 151–174.
24. Savitskii E.M., Povarova K.B., Makarov P.V. *Metallovedenie vol'frama* [Metallurgy of tungsten]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 257 p.
25. Z asimchuk E.E., Isaichev V.I. Kinetika pervichnoi, vtorichnoi i sobiratel'noi rekristallizatsii v vol'framovoi provoloke [Kinetics of primary, secondary and collective recrystallization in a tungsten wire]. *Metallofizika* [Metallophysics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1970, iss. 31, pp. 56–60.
26. Klopp W.D., Raffo P.L. *Effects of purity and structure on recrystallization, grain growth, ductility, tensile, and creep properties of arc-melted tungsten*. NASA TN D-2503. Washington, National aeronautics and space administration, 1964. 50 p.
27. Gorelik S.S. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 389 p.
28. Saburov V.P., Cherepanov A.N., Zhukov M.F., Galevskii G.V., Krushenko G.G., Borisov V.T. *Nizkotemperaturnaya plazma*. T. 12. *Plazmokhimicheskii sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primenenie dlya modifitsirovaniya metallov i splavov* [Low temperature plasma. Vol. 12. Plasma-chemical synthesis of ultradisperse powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. 344 p.
29. Samsonov G.V. *Svoistva elementov* [Properties of elements]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 312 p.
30. Mundy J.N., Rothman S.J., Lam N.Q., Hoff H.A., Nowicki L.J. Self-diffusion in tungsten. *Physical Review B*, 1978, vol. 18, no. 12, pp. 6566–6575. doi: 10.1103/PhysRevB.18.6566.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Модель формирования состава многослойного покрытия при осаждении из плазмы

Сергей Шанин^{a, *}, Егор Ефременков^b

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

^a  <http://orcid.org/0000-0002-9563-2830>,  shanin_s@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0001-6617-9152>,  ephrea@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.1:621.359:533.9:519.876

История статьи:

Поступила: 06 декабря 2017
 Рецензирование: 23 декабря 2017
 Принята к печати: 15 февраля 2018
 Доступно онлайн: 15 марта 2018

Ключевые слова:

Плазменное напыление
 Осаждение покрытия
 Перекрестные эффекты
 Связанная модель

Финансирование:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

АННОТАЦИЯ

Современная техника эксплуатируется, как правило, в условиях высоких механических нагрузок и повышенных температур, что, в свою очередь, приводит к необходимости создания новых материалов, имеющих повышенные физико-механические свойства. Для повышения эксплуатационных свойств деталей машин все большее распространение получают методы магнетронного и вакуумно-дугового нанесения покрытий из тугоплавких материалов. Математическое моделирование является хорошей альтернативой подробных экспериментальных исследований, позволяющих изучить отдельные явления на разных стадиях роста покрытия и дать прогноз относительно изменения состава и макроскопических свойств покрытия при варьировании технологических условий. Это, в свою очередь, позволяет оптимизировать технологический процесс. **Цель работы:** определение степени влияния перекрестных эффектов, а также взаимного влияния процессов переноса на формирование состава многослойного покрытия при осаждении из плазмы на подложку. **В работе исследована** связанная математическая модель формирования состава многослойного покрытия при осаждении из плазмы титана, хрома и азота. В модели учитываются влияние градиента напряжений на потоки тепла и масс, термодиффузия и диффузионная теплопроводность. **Методами исследования** являются вычислительные методы. **Результаты и обсуждение.** Теоретически исследовано влияние перекрестных эффектов, а также взаимного влияния процессов переноса в формировании состава многослойного покрытия, осаждаемого из плазмы. Показано, что состав плазмы влияет на эволюцию состава покрытия. Определено, что учет переноса массы и тепла за счет градиента напряжений оказывает ощутимое влияние на состав покрытия. Обнаружено, что для выбранных систем термодиффузия и диффузионная теплопроводность оказывают влияние на распределение концентраций только на начальной стадии процесса осаждения покрытия.

Для цитирования: Шанин С.А., Ефременков Е.А. Модель формирования состава многослойного покрытия при осаждении из плазмы // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 69–79. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-69-79.

Введение

Современная техника эксплуатируется, как правило, в условиях высоких механических нагрузок и повышенных температур [1, 2], что приводит к необходимости создания новых материалов, имеющих повышенные физико-механические свойства. Кроме того, новые материалы востребованы в различных передаточных механизмах [3], где кроме увеличения прочно-

сти очень важным является вопрос повышения антифрикционных свойств. Наиболее перспективными материалами для нанесения покрытий служат тугоплавкие химические соединения типа нитридов, оксидов, карбидов [4–6]. Повышенная коррозионная стойкость, твердость, износостойкость, делают использование этих соединений в современном материаловедении актуальным. Эксплуатационные характеристики материалов, такие как усталостная прочность, износо- и коррозионная стойкость и другие, зависят от физико-механических свойств поверхностного слоя. Для увеличения ресурса работы изделий достаточно поверхностного модифицирования материала за счет нанесения покрытия

*Адрес для переписки

Шанин Сергей Александрович, к.ф.-м.н., доцент
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет
 пр. Ленина, 30,
 634050, г. Томск, Россия
 Тел.: 8 (983) 230-20-99, e-mail: shanin_s@mail.ru

на основе соединений тугоплавких металлов. Такие покрытия широко применяются в современной технике. Особое место в поверхностной модификации детали занимают многослойные покрытия. Использование многослойных покрытий из антифрикционных и износостойких материалов связано с возможностью получения композитных структур, обладающих высокими антифрикционными свойствами при сохранении на необходимом уровне износостойкости и прочностных свойств [7, 8]. Метод ионно-плазменного напыления является одним из перспективных способов, позволяющих наносить широкий спектр многослойных покрытий. В настоящее время активно ведется работа по изучению структур и свойств покрытий, полученных методом ионно-плазменного осаждения [9–11].

Математическое моделирование является хорошей альтернативой подробных экспериментальных исследований, которые позволяют изучить отдельные явления на разных стадиях роста покрытия и дать прогноз относительно изменения состава и макроскопических свойств покрытия при варьировании технологических условий, что дает возможность оптимизировать технологический процесс.

Теоретические работы в этой области, как правило, описывают отдельные стадии процесса осаждения покрытий [12], сводят связанные явления к термическому [13, 14] или диффузионному [15] описанию процесса, напряжениям в окрестности отдельно взятых зародышей и т. д. Довольно редко встречаются связанные модели роста покрытий. Модели, оценивающие напряжения в диффузионной зоне по распределениям температуры и концентрации, полученных в рамках несвязанных моделей, не решают проблемы. В моделях механики растущих тел [16–17] не берутся во внимание химические и физические процессы, которые являются причиной возникновения остаточных напряжений, а также необратимых деформаций. В этой связи построение связанной модели, учитывающей совместно протекающие процессы деформирования, массопереноса, теплопереноса и кинетических явлений, представляется актуальной задачей.

Основной целью настоящей работы является определение степени влияния перекрестных эффектов, а также взаимного влияния процессов

переноса на формирование состава многослойного покрытия при осаждении из плазмы на подложку.

Методика исследований

Математическая модель формирования состава покрытия разделена на две подзадачи. Первая подзадача – теплодиффузионная, которая с учетом перекрестных эффектов, таких как диффузионная теплопроводность и термодиффузия, описывает процесс нанесения покрытия, диффузию осаждаемых химических элементов, формирование химических соединений. Вторая подзадача – механическая, служит для описания в процессе осаждения покрытия напряженно-деформированного состояния образца. Эти подзадачи взаимосвязаны, поскольку учитываются напряжения, зависящие от изменения состава и температуры, а также влияния напряжений на процессы переноса. Модель учитывает также то, что в процессе нанесения многослойных покрытий изменяется состав плазмы в соответствии с условиями эксперимента.

Образец изготовлен из железа и представляет собой цилиндр (с внутренним и внешним радиусами R_1 и R_2), который в процессе осаждения покрытия вращается с постоянной угловой скоростью вокруг своей оси. На его поверхности растет покрытие за счет осаждения хрома (Cr), азота (N) и титана (Ti), находящихся в окружающей плазме. Многослойность покрытия достигается за счет того, что тугоплавкие металлы поступают в плазму не одновременно, а поочередно (рис. 1).

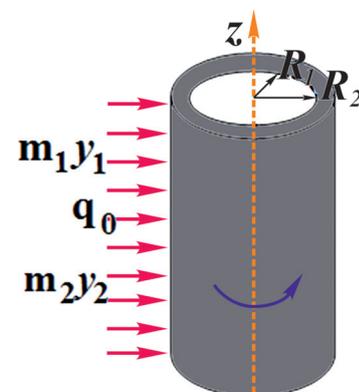


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи

Fig. 1. Illustration to the problem statement

В растущем покрытии возможны образования химических соединений: нитридов хрома, железа и титана. Остановимся на трех химических реакциях: $4\text{Fe} + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{N}$; $\text{Cr} + 0.5\text{N}_2 \rightarrow \text{CrN}$; $\text{Ti} + 0.5\text{N}_2 \rightarrow \text{TiN}$.

Поскольку хром и титан поступают в плазму поочередно, то осаждаться на подложку одновременно могут только три элемента (Me – тугоплавкий металл, N – азот и Fe – основа), которые принимают участие в процессе диффузии, и образовываться два химических соединения, диффузионный перенос которых можно не учитывать. В первом приближении иные химические соединения, которые имеются на диаграммах состояния, не учитываются.

На распределения концентраций осаждаемых элементов и химических соединений в условиях осаждения покрытия оказывают влияние внутренние механические напряжения, возникающие из-за градиентов концентраций и температуры, диффузия и теплопроводность, а также перекрестные эффекты: диффузионная теплопроводность и термодиффузия.

Система уравнений, необходимая для определения состава осаждаемого покрытия, должна включать в себя уравнения теплопроводности, диффузии, неразрывности движения, а также определяющие соотношения (выражения для скоростей реакций, потоков, соотношения, связывающие деформации и напряжения с концентрациями и температурой).

Полагаем, что химические соединения являются неподвижными, а деформации незначительны. Перейдем от уравнений движения к уравнениям равновесия.

Из семи концентраций (четырёх чистых веществ и трёх химических соединений) независимы только шесть, так как

$$\sum_{k=1}^7 C_k = 1,$$

где через C_k обозначены массовые концентрации N, Cr, Ti, Fe, Fe₂N, CrN, TiN.

С учетом всех допущений получим систему уравнений:

$$\rho C_\sigma \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_q + \sum_{i=1}^3 Q_i^\sigma \phi_i, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial C_k}{\partial t} = -\nabla \mathbf{J}_k + r_k, \quad k = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial C_k}{\partial t} = r_k, \quad k = 5 \dots 7, \quad (3)$$

где \mathbf{J}_k – потоки подвижных компонентов; \mathbf{J}_q – поток тепла; T – температура; ρ – плотность; Q_i^σ – тепловыделение в реакции; r_k – источники компонентов в химических реакциях; t – время; ϕ_i – скорости химических реакций; C_σ – теплоемкость при постоянстве напряжений.

Соотношения для потоков запишутся в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= -\rho D_{11} \nabla C_1 - \rho D_{12} \nabla C_2 - \\ & - \rho D_{13} \nabla C_3 - \rho D_1^T \nabla T + B_1 \nabla \sigma_{kk}^e, \\ \mathbf{J}_2 &= -\rho D_{21} \nabla C_1 - \rho D_{22} \nabla C_2 - \\ & - \rho D_{23} \nabla C_3 - \rho D_2^T \nabla T + B_2 \nabla \sigma_{kk}^e, \\ \mathbf{J}_3 &= -\rho D_{31} \nabla C_1 - \rho D_{32} \nabla C_2 - \\ & - \rho D_{33} \nabla C_3 - \rho D_3^T \nabla T + B_3 \nabla \sigma_{kk}^e, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_q = -\lambda \nabla T - A_1 \nabla C_1 - A_2 \nabla C_2 - A_3 \nabla C_3 + A_q \nabla \sigma_{kk}^e$$

с двадцатью коэффициентами переноса ($\sigma_{kk}^e = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ – первый инвариант тензора упругих напряжений), зависящими от температуры и состава.

Коэффициенты $C_{\sigma e}$ связаны с коэффициентами термодиффузии соотношениями

$$S_{T1} = \frac{D_{T1}}{D_{11}}, \quad S_{T2} = \frac{D_{T2}}{D_{22}}, \quad S_{T3} = \frac{D_{T3}}{D_{33}}$$

и

$$\begin{aligned} D_{kj} &= D_{kk}^0 \left[g_{kj} - g_{kn} + \frac{C_k m_k}{C_n m_n} (g_{nn} - g_{nj}) \right] = \\ &= D_{kk}^0 f_{kj}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$g_{jk} = \delta_{jk} + \frac{C_j}{C_k} \frac{\partial \ln \gamma}{\partial \ln C_k},$$

D_{kj} – парциальные диффузионные коэффициенты.

Для изотропного материала феноменологические коэффициенты в уравнении для потока тепла и коэффициенты переноса массы под

действием напряжений определяются соотношением:

$$\begin{aligned} \frac{D_{kk}^0 m_k C_k}{RT} (\alpha_{ij}^k - \alpha_{ij}^n) &= \\ &= \frac{D_{kk}^0 m_k C_k}{RT} (\alpha_k - \alpha_n) = B_k C_k, \end{aligned}$$

где

$$B_k = \frac{D_{kk}^0 m_k}{RT} (\alpha_k - \alpha_n),$$

α_k – коэффициенты концентрационного расширения.

Поскольку в результате химических превращений при нагреве свойства изменяются, то теплоемкость, плотность, коэффициенты переноса в общем случае являются функциями температуры и состава. В состав покрытия входят химические элементы (Fe, Ti, N, Cr) и их соединения (Fe_2N , CrN, TiN), поэтому теплофизические характеристики являются функциями состава:

$$\begin{aligned} \lambda(C_i) &= \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i, & C_\sigma(C_i) &= \sum_{i=1}^n C_{\sigma i} C_i, \\ \rho(C_i) &= \sum_{i=1}^n \rho_i C_i. \end{aligned}$$

На внутренней поверхности цилиндра отсутствуют потоки масс. Эту поверхность также считаем теплоизолированной. Тогда

$$\mathbf{J}_1|_{r=R_1} = 0, \quad \mathbf{J}_q|_{r=R_1} = 0. \quad (6)$$

На границе подложка – растущее покрытие равны потоки массы и химические потенциалы осаждаемых элементов:

$$\mathbf{J}_k^S = \mathbf{J}_k^C, \quad g_k^S = g_k^C, \quad (7)$$

а также равны потоки тепла и температуры:

$$\mathbf{J}_q^S = \mathbf{J}_q^C, \quad T^S = T^C, \quad (8)$$

где верхний индекс C – к растущему покрытию; S – относится к подложке.

Условия на растущем покрытии учитывают нагрев за счет потерь кинетической энергии частицами, потери тепла излучением и поступление массы. Например, для потока тепла и потока азота имеем

$$-\mathbf{J}_q = q_0 \frac{d\xi}{dt} - \sigma\varepsilon (T^4 - T_w^4), \quad (9)$$

$$-\mathbf{J}_1 = m_1 y_1 \frac{d\xi}{dt},$$

где $q_0 = k \sum_{i=1}^3 \frac{V_i^2}{2} m_i y_i$; V_i – скорости ионов; T_w – температура стенок вакуумной камеры; y_i – концентрации осаждаемых элементов.

Покрытие растет по закону сохранения импульса:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\alpha_1 y_1 V_1 + \alpha_2 y_2 V_2 + y_3 V_3}{y_1 + y_2 + y_3}. \quad (10)$$

В реальном процессе осаждения многослойного покрытия скорости и концентрации осаждаемых химических элементов у поверхности подложки в различные моменты времени могут отличаться от заданных. Это может быть связано с различными факторами: неоднородная структура катода, колебание напряжения на установке, примеси в камере и т. д.

Чтобы учесть вероятность появления таких событий, в граничных условиях введены коэффициенты α_i , которые представляют собой случайные числа в диапазоне от m_1 до m_2 , меняющиеся каждые t_k секунды:

$$a_i = \text{rand}(m_1 \dots m_2), \quad t = t_k. \quad (11)$$

Температура подложки в начальный момент времени равна T_0 , толщина покрытия равна нулю.

Механическую часть модели можно представить как задачу о механическом равновесии полого цилиндра, свободного от воздействия внешних сил.

Механическая задача представлена в [18] и решалась явным конечноразностным методом. Термодиффузионная часть модели решалась численно при помощи разработанного алгоритма.

Использованные в расчетах физические параметры представлены в табл. 1, при составлении которой использованы данные [19, 20]

Скорости химических реакций зависят от концентраций в соответствии с законом действующих масс, а от температуры – по закону Аррениуса.

Параметры химических реакций, необходимые для расчетов, были определены методами химической термодинамики [21] и представлены в табл. 2.

Свойства химических веществ и соединений
Properties of chemical substances and compounds

Параметры	Cr	N	Fe	Ti	TiN	CrN	Fe ₂ N	Размерность
λ	93,9	0,026	80,1	21,9	36,2	69,3	67,3	Вт/(м · К)
ρ	7,19	0,8	7,87	4,54	4,93	5,9	6,68	$\times 10^3$, кг/м ³
C_p	23,3	29,1	25,14	25,1	34,23	53,4	98,45	Дж/(мол · К)
m	51,9	14	55,84	47,8	59,89	66	125,6	$\times 10^{-3}$, кг/мол
E	185	0,14	190	232	280	250	217	ГПа
ν	0,3	0,24	0,28	0,26	0,29	0,3	0,3	
α_T	3,6	2	4	2,8	3,2	3,7	3,8	$\times 10^{-6}$, К ⁻¹

Таблица 2 трида железа, что приводит к уменьшению

Table 2 скорости образования нитрида хрома. Пока

Кинетические параметры реакций
Kinetic parameters of reactions

Образующееся химическое соединение	Энергия активации	Пред-экспонент	Теплота реакции, кДж/моль
Fe ₂ N	$2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{11}$	-51,8
CrN	$1,7 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	85,43
TiN	21406	$2,46 \cdot 10^{14}$	11,64

Результаты и их обсуждение

В расчетах определяются распределения концентраций элементов и химических соединений в последовательные моменты времени, рассчитывается температура, а также напряжения и деформации для разных вариантов модели. Условия в плазме варьируются.

Распределения концентраций в прилегающей части подложки и в покрытии в различные моменты времени показаны на рис. 2, а–е. Поскольку покрытие и подложка имеют высокую теплопроводность и размер подложки незначителен (толщина подложки 2 мм), то температура быстро выравнивается и изменяется только со временем.

В начальной стадии процесса осаждения в плазме присутствует хром, вследствие чего в покрытии формируется нитрид хрома ($t < 1200$ с). По мере проникания железа в покрытие посредством диффузии начинается образование ни-

трида хрома. Пока покрытие тонкое, за счет роста температуры ускоряется образование Fe₂N. В дальнейшем излучение препятствует росту температуры, кроме того, ионам приходится преодолевать все большее расстояние, и скорость образования Fe₂N замедляется, т. е. непосредственно слой твердого продукта реакции приводит к ее торможению. Во временном интервале t [1200, 2400] состав плазмы меняется, на подложку вместо хрома начинают поступать ионы титана, что приводит к образованию нитрида титана (рис. 2, б). Поскольку в этот промежуток времени хром в составе плазмы отсутствует, то его концентрация и, как следствие, концентрация нитрида хрома на этом участке равны нулю (рис. 2 в, г). Повторная смена плазмы происходит в момент времени ($t > 2400$ с). Так как азот присутствует в плазме постоянно, то его концентрация все время возрастает.

Распределения напряжений вдоль радиуса при различных концентрациях осаждаемых элементов у поверхности покрытия представлены на рис. 3, а–в. Механические напряжения при этом увеличиваются. Поскольку в процессе нанесения покрытия смена осаждаемых тугоплавких металлов осуществлялась два раза, покрытие состоит из трех слоев, отличающихся между собой составом и, как следствие, коэффициентами термического расширения и модулями упругости – угловые и осевые напряжения имеют характерные изгибы (рис. 3, б, в).

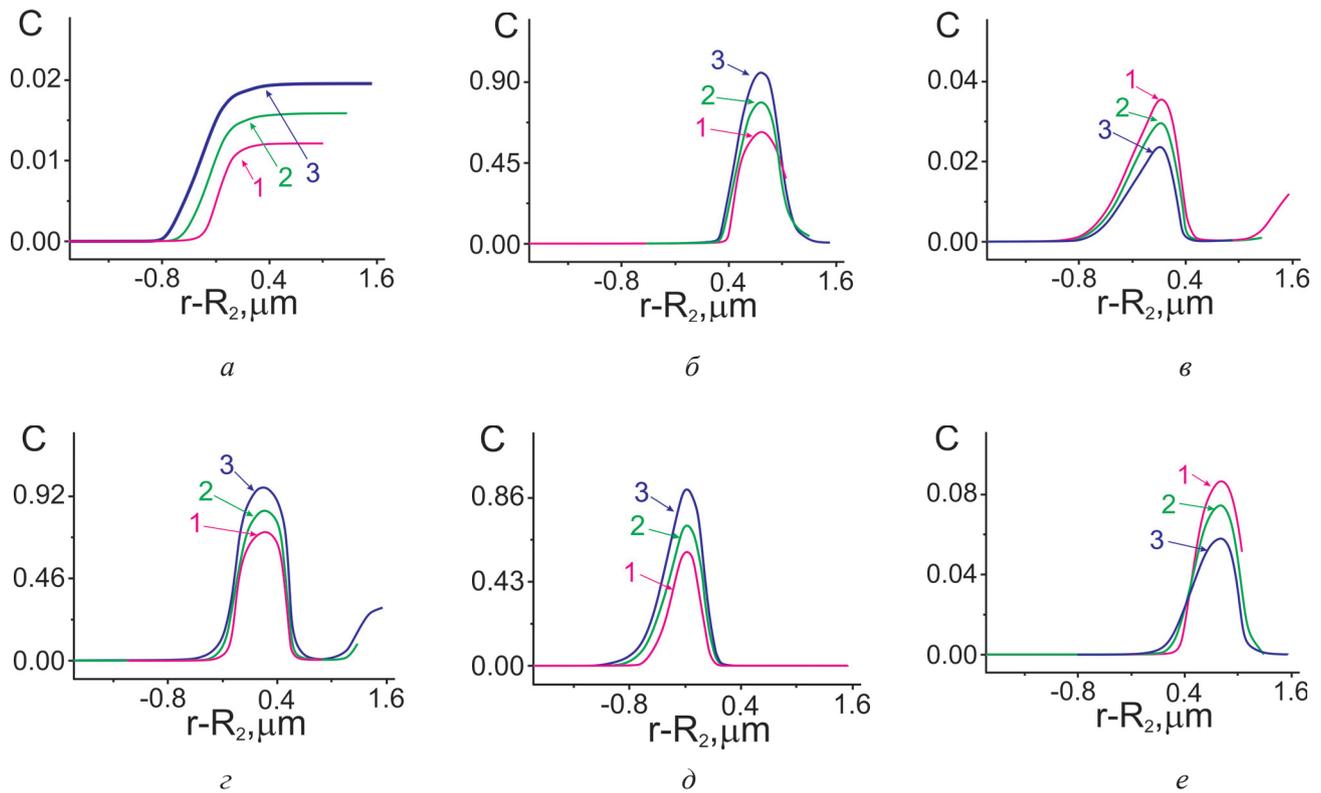


Рис. 2. Распределение концентрации: N (а), TiN (б), Cr(в), CrN (г), Fe_2N (д), Ti (е) вдоль радиуса в различные моменты времени:

1 – $t = 1200$ с; 2 – $t = 2400$ с; 3 – $t = 2800$ с

Fig. 2. Distribution of the concentrations of N (a), TiN (b), Cr(v), CrN (g), Fe_2N (d), Ti (e) along the radius at different moments of time:

1 – $t = 1200$ s; 2 – $t = 2400$ s; 3 – $t = 2800$ s

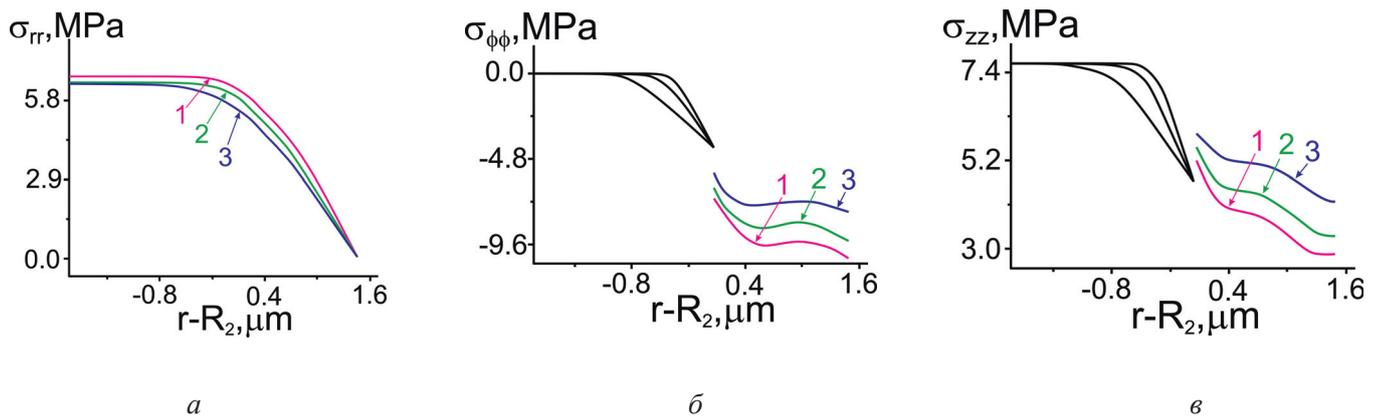


Рис. 3. Распределение радиальных (а), угловых (б), осевых (в) напряжений вдоль радиуса в момент времени $t = 2800$ с при различных составах плазмы:

1 – $y_1 = 0,1, y_2 = 0,16, y_3 = 0,2$; 2 – $y_1 = 0,2, y_2 = 0,32, y_3 = 0,4$; 3 – $y_1 = 0,3, y_2 = 0,48, y_3 = 0,6$

Fig. 3. Distribution of radial (a), angular (b), axial (v) stresses along the radius at the time $t = 2800$ s for different plasma compositions:

1 – $y_1 = 0,1, y_2 = 0,16, y_3 = 0,2$; 2 – $y_1 = 0,2, y_2 = 0,32, y_3 = 0,4$; 3 – $y_1 = 0,3, y_2 = 0,48, y_3 = 0,6$

Увеличение концентрации ионов хрома и титана приводит к увеличению концентрации химических элементов в покрытии и, как следствие, к увеличению концентрации химических соединений (рис. 4). С неоднородным составом связаны и неоднородные свойства покрытия по его толщине, что на рисунках не показано.

Численное исследование показало, что значения концентраций химических элементов и их соединений, напряжений, а также размеры области образования химических соединений зависят от того, какие явления учитываются. Подробный анализ показал, что учет перекрестных диффузионных потоков приводит к сужению области образования нитрида железа по сравнению с расчетом, где перекрестные потоки не учитываются. Скорость образования нитрида

железа уменьшается вследствие того, что проникновению железа в покрытие препятствуют перекрестные диффузионные потоки.

Для выбранных систем градиент температуры незначителен, поскольку основа и покрытие имеют высокую теплопроводность и малые размеры, вследствие чего влияние термодиффузии и диффузионной теплопроводности на температуру и распределение концентраций ощутимо только на начальной стадии процесса осаждения покрытия.

Более значительным будет влияние диффузионной теплопроводности и термодиффузии при осаждении покрытий, в состав которых входят нитриды и карбиды тугоплавких металлов, на полимеры и керамику, поскольку они имеют низкую по сравнению с покрытием теплопроводность.

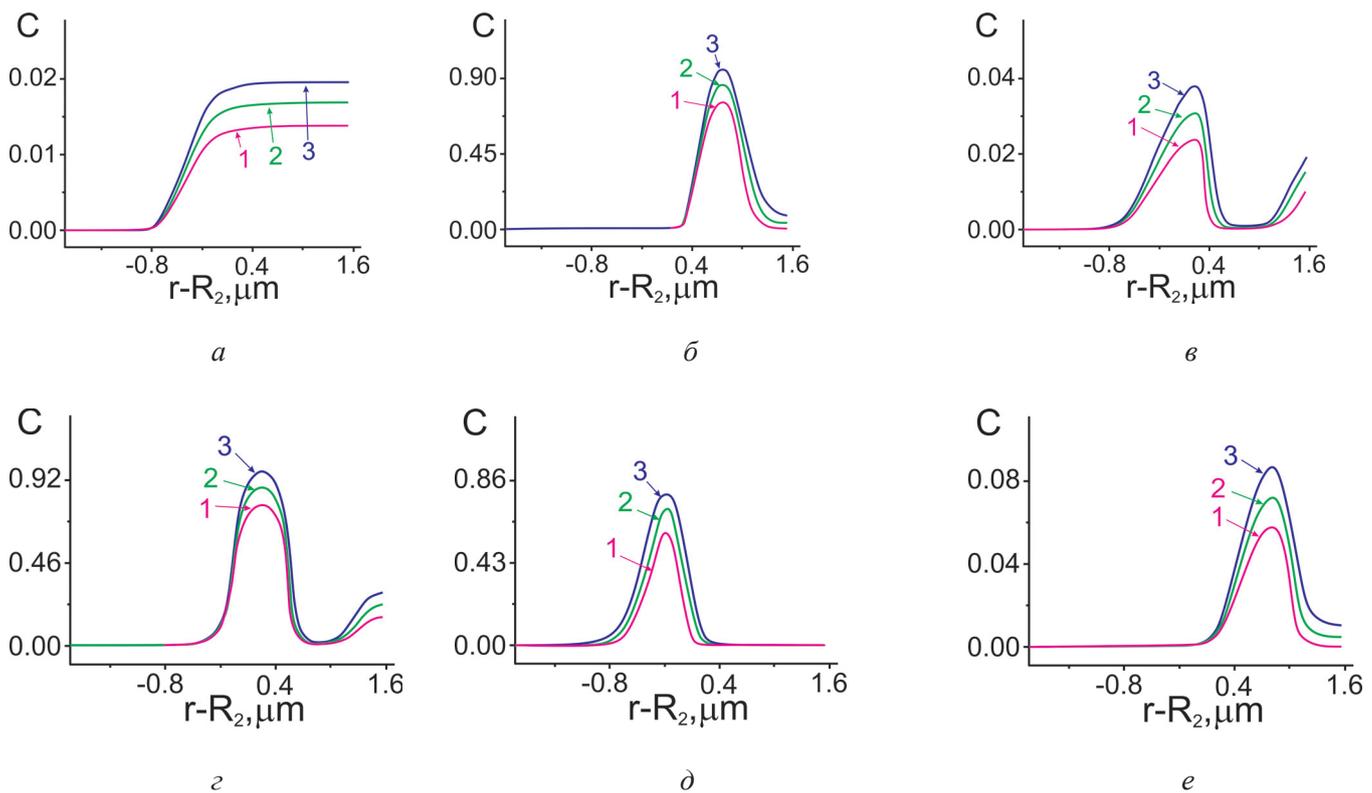


Рис. 4. Распределение концентрации: N (а), TiN (б), Cr(в), CrN (г), Fe₂N (д), Ti (е) вдоль радиуса в момент времени $t = 2800$ с при различных составах плазмы:

$$1 - y_1 = 0.1, y_2 = 0.16, y_3 = 0.2; 2 - y_1 = 0.2, y_2 = 0.32, y_3 = 0.4; 3 - y_1 = 0.3, y_2 = 0.48, y_3 = 0.6$$

Fig. 4. The distribution of the concentrations of N (a), TiN (b), Cr (c), CrN (d), Fe₂N (e), Ti (f) along the radius at the moment of time $t = 2800$ s for different plasma compositions:

$$1 - y_1 = 0.1, y_2 = 0.16, y_3 = 0.2; 2 - y_1 = 0.2, y_2 = 0.32, y_3 = 0.4; 3 - y_1 = 0.3, y_2 = 0.48, y_3 = 0.6$$

Выводы

В работе сформулирована модель роста многослойного покрытия при осаждении из плазмы азота, титана и хрома. Теоретически исследовано влияние перекрестных эффектов, а также взаимного влияния процессов переноса в формировании состава многослойного покрытия, осаждаемого из плазмы. Показано, что состав плазмы влияет на эволюцию состава покрытия. Определено, что учет переноса массы и тепла за счет градиента напряжений оказывает ощутимое влияние на состав покрытия.

Обнаружено, что для выбранных систем термодиффузия и диффузионная теплопроводность оказывают влияние на распределение концентраций только на начальной стадии процесса осаждения покрытия.

Посредством представленной модели можно предварительно определить химический состав покрытия.

Модель может быть модифицирована для более полной реакционной схемы и иных комбинаций материала подложки и осаждаемых элементов.

Список литературы

1. *Fan W., Bai Y.* Review of suspension and solution precursor plasma sprayed thermal barrier coatings // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, iss. 13. – P. 14299–14312. – doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.063.
2. *Bobzin K.* High-performance coatings for cutting tools // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2017. – Vol. 18. – P. 1–9. – doi: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.
3. *Ephremenkova E.A., Kobza E.E., Efremenkova S.K.* Force analysis of double pitch point cycloid drive with intermediate rolling elements and free retainer // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 756. – P. 29–34. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.29.
4. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings / *Santecchia E., Hamouda A.M.S., Musharavati F. E. Zalnezhad, M. Cabibbo, S. Spigarelli* // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41, iss. 9. – P. 10349–10379. – doi: 10.1016/j.ceramint.2015.04.152.
5. Corrosion resistance of CrN and CrCN/CrN coatings deposited using cathodic arc evaporation in Ringer's and Hank's solutions / *A. Gilewicz, P. Chmielewska, D. Murzynski, E. Dobruchowska, B. Warcholinski* // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 299. – P. 7–14. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.069.
6. Corrosion protection of steel with multilayer coatings: improving the sealing properties of physical vapor deposition CrN coatings with Al₂O₃/TiO₂ atomic layer deposition nanolaminates / *J. Leppäniemi, P. Sippola, M. Broas, J. Aroma, H. Lipsanen, J. Koskinen* // *Thin Solid Films*. – 2017. – Vol. 627. – P. 59–68. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.02.050>.
7. *Yang Y.H., Wu F.B.* Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 308. – P. 108–114. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.
8. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering / *E. Contreras, Y. Galindez, M.A. Rodas, G. Bejarano, M.A. Gómez* // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 332. – P. 214–222. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.
9. *Пузряков А.Ф.* Теоретические основы плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
10. Microstructural design and properties of supersonic suspension plasma sprayed thermal barrier coatings / *W. Fan, Y. Bai, J.R. Li, Y. Gao, H.Y. Chen, Y.X. Kang, W.J. Shi, B.Q. Li* // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 699. – P. 763–774. – doi: 10.1016/j.jallcom.2016.12.356.
11. Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding / *M.I. Bashir, M. Shafiq, M. Naeem, M. Zaka-ul-Islam, J.C. Díaz-Guillén, C.M. Lopez-Badillo, M. Zakauallah* // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 327. – P. 59–65. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.015.
12. Simulation of phase transformation kinetics in thin films under a constant nucleation rate / *M. Moghadam, E. Pang, T. Philippe, P. Voorhees* // *Thin Solid Films*. – 2016. – Vol. 612. – P. 437–444.
13. Prediction of the properties of PVD/CVD coatings with the use of FEM analysis / *A. Śliwa, J. Mięka, K. Gołombek, T. Tański, M. Bonek* // *Applied Surface Science*. – 2016. – Vol. 388. – P. 281–287.
14. *Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G.* Mathematical modelling of thin-film polymer heating during obtaining of nanostructured ion-plasma coatings // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 201. – P. 630–638. – doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.677.
15. Monte Carlo simulation of the PVD transport process for alloys / *E. Lugscheider, K. Bobzin, N. Papenfuß-Janzen, D. Parkot* // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200. – P. 913–915.
16. *Ali R., Sebastiani M., Bemporad E.* Influence of Ti–TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 75. – P. 47–56.

17. Experimental and modeling study on the role of Ar addition to the working gas on the development of intrinsic stress in TiN coatings produced by filtered vacuum-arc plasma / V.V. Vasylyev, A.I. Kalinichenko, E.N. Reshetnyak, G. Taghavi Pourian Azar, M. Ür-gen, V.E. Strel'nitskij // *Thin Solid Films*. – 2017. – Vol. 642. – P. 207–213. – doi: 10.1016/j.tsf.2017.08.033.

18. *Knyazeva A.G., Shanin S.A.* Modeling of evolution of growing coating composition // *Acta Mechanica*. – 2016. – Vol. 227, iss. 1. – P. 75–104. – doi: 10.1007/s0070.

19. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

20. Термодинамические свойства неорганических веществ: справочник / У.Д. Верятин, В.П. Маширев, Н.Г. Рябцев, В.И. Тарасов, Б.Д. Рогозкин, И.В. Коробов; под общ. ред. А.П. Зефирова. – М.: Атомиздат, 1965. – 460 с.

21. *Каранетьяну М.Х.* Химическая термодинамика. – М.: Химия, 1975. – 584 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Model of the Formation of the Multilayer Coating Composition During Plasma-assisted Deposition

Sergey Shanin ^{a, *}, Egor Efremenkov ^b

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <http://orcid.org/0000-0002-9563-2830>, shanin_s@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0001-6617-9152>, ephrea@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 December 2017
Revised: 23 December 2017
Accepted: 15 February 2018
Available online: 15 March 2018

Keywords:

Plasma spraying
Coating deposition
Cross-effects
Related model

Funding:

The work is carried out within the framework of the TPU competitive recovery program among the world's leading research centers.

ABSTRACT

Introduction. A modern technical equipment is working in the conditions of high temperature and stress. The technology development demands to create new material with specific properties. Magnetron and vacuum-arc methods of coatings formation using high-melting-point materials have wide expansion for the improvement of detail performance properties. Mathematical modeling is a good alternative to detailed experimental research, allowing to study individual phenomena at different stages of coating formation and to predict the composition and macroscopic properties of the coating change with varying technological conditions. And this, in turn, allows optimizing the technological process. **The purpose of the work:** to determine the degree of influence of cross effects, as well as the mutual influence of the transfer processes on the formation of the multilayer coating composition when plasma-assisted deposition to the substrate. Mathematical modeling of the coating growth process taking into account combination of physical and chemical stages is conducted. **Methods of research** are computational methods. In the paper, coupled model of formation of multilayer coating on the surface of cylindrical detail by plasma-assisted deposition is presented. The model considers such effects, as thermal diffusion, diffusion thermal conductivity, the mass transfer by action of stress gradient and formation of chemical compounds. **Results and Discussion.** The influence of cross-effects, as well as the mutual influence of the transport processes in the formation of the multilayer coating deposited from the plasma, is theoretically investigated. It is shown that the composition of the plasma affects the evolution of the coating composition. It is determined that taking into account the mass and heat transfer due to the stress gradient has a noticeable effect on the coating composition. It is found that for the selected systems, thermal diffusion and diffusion thermal conductivity affect the distribution of concentrations only at the initial stage of the coating deposition process.

For citation: Shanin S.A., Efremenkov E.A. Model of the formation of the multilayer coating composition during plasma-assisted deposition. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 69–79. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-69-79. (In Russian).

References

1. Fan W., Bai Y. Review of suspension and solution precursor plasma sprayed thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, iss. 13, pp. 14299–14312. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.063.
2. Bobzin K. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, vol. 18, pp. 1–9. doi: 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.
3. Ephremenkov E.A., Kobza E.E., Efremenkova S.K. Force analysis of double pitch point cycloid drive with intermediate rolling elements and free retainer. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 756, pp. 29–34. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.756.29.
4. Santecchia E., Hamouda A.M.S., Musharavati F., Zalnezhad E., Cabibbo M., Spigarelli S. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, iss. 9, pp. 10349–10379. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.04.152.

* Corresponding author

Shanin Sergey A., Ph.D. (Physics and Mathematics),
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Avenue,
634050, Tomsk, Russian Federation,
Tel.: 8 (983) 230-20-99, e-mail: shanin_s@mail.ru



5. Gilewicz A., Chmielewska P., Murzynski D., Dobruchowska E., Warcholinski B. Corrosion resistance of CrN and CrCN/CrN coatings deposited using cathodic arc evaporation in Ringer's and Hank's solutions. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 299, pp. 7–14. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.069.
6. Leppaniemi J., Sippola P., Broas M., Aromaa J., Lipsanen H., Koskinen J. Corrosion protection of steel with multilayer coatings: improving the sealing properties of physical vapor deposition CrN coatings with Al₂O₃/TiO₂ atomic layer deposition nanolaminates. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 627, pp. 59–68. doi: 10.1016/j.tsf.2017.02.050.
7. Yang Y.H., Wu F.B. Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 308, pp. 108–114. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.
8. Contreras E., Galindez Y., Rodas M.A., Bejarano G., Gómez M.A. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 332, pp. 214–222. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.
9. Puzryakov A.F. *Teoreticheskie osnovy plazmennogo napyleniya* [Theoretical foundations of plasma spraying]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 360 p. (In Russian).
10. Fan W., Bai Y., Li J.R., Gao Y., Chen H.Y., Kang Y.X., Shi W.J., Li B.Q. Microstructural design and properties of supersonic suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 699, pp. 763–774. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.12.356.
11. Bashir M.I., Shafiq M., Naeem M., Zaka-ul-Islam M., Díaz-Guillén J.C., Lopez-Badilloe C.M., Zakaulaha M. Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 327, pp. 59–65. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.015.
12. Moghadam M., Pang E., Philippe T., Voorhees P. Simulation of phase transformation kinetics in thin films under a constant nucleation rate. *Thin Solid Films*, 2016, vol. 612, pp. 437–444.
13. Śliwa A., Miłkuła J., Gołombek K., Tański T., Bonek M. Prediction of the properties of PVD/CVD coatings with the use of FEM analysis. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 388, pp. 281–287.
14. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of thin-film polymer heating during obtaining of nanostructured ion-plasma coatings. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 201, pp. 630–638. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.677.
15. Lugscheider E., Bobzin K., Papenfuß-Janzen N., Parkot D. Monte Carlo simulation of the PVD transport process for alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 200, pp. 913–915.
16. Ali R., Sebastiani M., Bemporad E. Influence of Ti–TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion. *Materials & Design*, 2015, vol. 75, P. 47–56.
17. Vasylyev V.V., Kalinichenko A.I., Reshetnyak E.N., Taghavi Pourian Azar G., Ürgen M., Strel'nitskij V.E. Experimental and modeling study on the role of Ar addition to the working gas on the development of intrinsic stress in TiN coatings produced by filtered vacuum-arc plasma. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 642, pp. 207–213. doi: 10.1016/j.tsf.2017.08.033.
18. Knyazeva A.G., Shanin S.A. Modeling of evolution of growing coating composition. *Acta Mechanica*, 2016, vol. 227, iss. 1, pp. 75–104. doi: 10.1007/s0070.
19. Grigor'ev I.S., Meilikhov E.Z., eds. *Fizicheskie velichiny* [Physical magnitudes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p.
20. Veryatin U.D., Mashirev V.P., Ryabtsev N.G., Tarasov V.I., B.D. Rogozkin, Korobov I.V. *Termodinamicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv* [Thermodynamic properties of inorganic substances]. Moscow, Atomizdat Publ., 1965. 460 p.
21. Karapet'yants M.Kh. *Khimicheskaya termodinamika* [Chemical thermodynamics]. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 584 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Оформление статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» должно соответствовать по стилю и содержанию требованиям журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules. Статьи, не соответствующие этим требованиям, отклоняются и не рассматриваются редакционным советом. Кроме того, текст работы должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;
- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь структуру **IMRAD (Introduction, Methods, Results And Discussion)**:

- название (*Title*);
- аннотация (*Abstract*);
- введение (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements / Funding*);
- список литературы (*References*).

ЗАГЛАВИЕ

Название должно отражать основную идею выполненного исследования и быть по возможности кратким.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны имя и фамилия автора (ов). Ниже – полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов обязательно указываются его уникальный идентификационный код *ORCID (Open Researcher and Contributor ID)* и электронная почта (*e-mail*). Если отсутствует *ORCID*, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Указывается индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Для англоязычной части статьи УДК указывать не надо.

Ключевые слова

Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний) должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

АННОТАЦИЯ (РЕФЕРАТ)

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200...250 слов. **Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!** Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ

Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подход, данные или анализ). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию обозначенной проблемы. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

МЕТОДЫ / МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.
2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и прочее; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации, перечисленные выше, актуальны также и для теоретической, и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без выявления причинно-следственных связей не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел, для того чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов, а также для упорядочения и интерпретации результатов. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и обозначить перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации. Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать 15–17 %. Если работа была издана и на русском и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в *References* лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе *BSI* (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>). Правила оформления англоязычного блока статьи представлены на сайте журнала в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest**»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

*Редакция и редакционный совет журнала
«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)»*

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в авторском резюме не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, и избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее 100–250 слов (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из 9 последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на базе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic

planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to "interactive strategic management" which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiological aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ¹H or ³¹P spectroscopy) are related to several pathophysiological indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ¹³C-glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ³¹PMR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiological and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.

2. Кратко излагая основные факты работы, помните следующие моменты:

– следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

– не включать несущественные детали;

– вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение, а также имейте в виду, что вы пишете для международной аудитории;

– текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;

– необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. "The study tested", но не "It was tested in this study" (частая ошибка российских аннотаций);

– стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства

(<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

На сайте издательства также приведены примеры рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5>

[rtkb73ae013ofk4g8nrv1](http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые Авторы, внимательно ознакомьтесь с правилами оформления статьи на сайте журнала!

ШАБЛОН ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Синим цветом обозначены пояснения относительно того, что именно и как должно быть написано в данном разделе / подразделе.

После внесения соответствующих правок в разделы статьи необходимо удалить **синие подсказки**. В шаблон следует поместить все материалы и данные, которые, по вашему мнению, должны быть напечатаны в журнале (в том числе рисунки и таблицы). Заполненный шаблон статьи следует сохранить на компьютере и загрузить на сайт журнала.

Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$

(Заглавие статьи на русском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Елена Корниенко^{1, a, *}, Виктор Кузьмин^{2, b}, Александр Сивков^{3, c}

(Полный список авторов с указанием Ф.И.О. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienko_ee@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71 *(Указывается индекс универсальной десятичной классификации)*

История статьи:

Поступила: 1 июня 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Рецензирование: *(Дата указывается редакцией)*

Принята к печати: *(Дата указывается редакцией)*

Доступно онлайн: *(Дата указывается редакцией)*

Ключевые слова:

Плазменное напыление,

Карбид бора,

$V_4C-Ni-P$,

Покрытие.

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

АННОТАЦИЯ

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **200...250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Для цитирования: Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Сивков А.А. Структурные особенности плазменных покрытий $V_4C-Ni-P$ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 30–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50.

(Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале.

Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

***Адрес для переписки**

Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

Основная часть статьи

1. Введение

До двух страниц краткий обзор литературы по проблеме исследования, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована **цель** и **задачи** исследований.

2. Методика исследований

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

3. Результаты и их обсуждение

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации по набору текста

Текст набирается в русифицированном редакторе Microsoft Word. Формат оригиналов – А4. Старайтесь использовать только следующие шрифты: Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв. Размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст статьи.

Не используйте более одного пробела – применяйте абзацные отступы и табуляцию.

Не заканчивайте строку нажатием клавиши «Enter» – используйте ее только для начала нового абзаца.

Реализуйте возможности, предоставляемые текстовым редактором: автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т.п.

Не набирайте кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами, и наоборот.

Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев.

Недопустимо тире «—» заменять дефисом «-».

В тексте и формулах (в том числе в индексах) латинские буквы набираются курсивом, а греческие и русские – прямым шрифтом.

Десятичные цифры в русскоязычных текстах набираются через запятую (0,5), а в англоязычных – через точку (0.25 вместо 0,25).

Рекомендации по набору формул

Формулы, структурные химические формулы и схемы располагаются по месту в тексте статьи.

Знаки *, ', ±, одиночные буквы греческого алфавита, одиночные наклонные или полужирные буквы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения, цифры в тексте, а также простые математические или химические формулы (например, $a^2 + b^2 = c^2$, H_2SO_4) должны набираться в текстовом режиме **без использования редактора формул**.

Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться с использованием редактора формул (Microsoft Equation). Набор формул из составных элементов, где часть формулы – таблица, часть – текст, часть – внедренная рамка, не допускается.

Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения. Их принудительное ручное изменение для отдельных символов или элементов формул не допускается!

Рекомендации по набору таблиц

Таблицы располагаются в тексте рукописи.

Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать ее **название (на русском и на английском языке!)**.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения. Например: t , °C; V , об.%; HV, МПа и т.п.

Сокращения слов в таблицах не допускаются.

Создавайте таблицы, используя возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы, набранные вручную с помощью пробелов или табуляций, не могут быть использованы.

Таблица
Table

Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия
The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

№ участка / No area	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0.08	86.55	13.03	0.3	0.02
2	57.71	22.73	8.22	2.12	9.22
3	40.37	44.53	10.23	2	2.87
4	49.65	25.69	13.10	3.23	8.33
5	44.26	26.06	7.35	9.36	12.97

Сокращения и аббревиатуры

Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

Сокращения из нескольких слов разделяются пробелами (760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр.), за исключением общеупотребительных (и т.д.; и т.п.; т.е.) и аббревиатур (РФА, КПД и т.п.).

Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: ИК-спектроскопия, ПЭ-пленка, ЖК-состояние, Na^+ -форма, ОН-группа, но группа ОН.

Размерности

Размерности отделяются от цифры пробелом (17,5 моль/м³ (17.5 mol/m³); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с², 20 °C, 50 %, 10 ‰), кроме угловых градусов (90°).

Точка после размерностей не ставится (с – секунда, г – грамм, сут – сутки, град – градус). В сложных размерностях обязательно указывается знак умножения (·): Н·м/с или кг/(с·м·Па).

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней: Дж·моль⁻¹·К⁻¹ или $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, так и скобок: $J/(mol \cdot K)$ или $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$, если это облегчает их прочтение.

Главное условие – соблюдение единообразия одинаковых размерностей по статье.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (10, 15 и 45 мин; от 18 до 20 мм; 30–40 Дж/моль), за исключением угловых градусов: 5°–10°, а не 5–10°.

Размерности переменных пишутся через запятую (E , Дж/моль или E , J/mol), а подлогарифмических величин – в квадратных скобках, без запятой: $\ln t$ [мин].

Точки и пробелы

Точка не ставится после названия статьи, списка авторов, списка организаций, заголовков и подзаголовков, названий таблиц и подрисуночных подписей.

Точка после сокращений не ставится в подстрочных индексах ($T_{\text{пл}}$ – температура плавления).

Ссылки на рисунки и таблицы набираются с пробелами (рис. 5, табл. 2).

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 300 К), (а).

Между знаком номера или параграфа и числом должен быть пробел (№ 1; § 5.5).

Числа с буквами в обозначениях набирают без пробелов (IVd; 1.3.14a; рис. 1,а).

В географических координатах широты отделяются пробелами: 56,5 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °E.

В географических названиях после точки ставится пробел: р. Енисей, г. Новосибирск.

Требования к иллюстрациям

Иллюстрации и подписи к ним располагаются в тексте рукописи.

Иллюстрации нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (**на русском и на английском языке!**).



Рис. 1. Внешний вид частиц порошка $B_4C-Ni-P$

Fig. 1. The particles of $B_4C-Ni-P$ powder

Общие технические требования:

иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку) либо 17–17,5 см (на две колонки);

надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому для фотографий желательно предоставить второй вариант без текста и всех обозначений, для остальных иллюстраций – располагать надписи на иллюстрации так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

на фотографиях (например, структур) обязательно должны быть указаны размерные метки;

для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки;

графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;
- толщина линий должна быть не меньше 0,5 pt;

- векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как «Noise» «Black&white noise» «Top noise»;

- для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

Штриховые иллюстрации и полутоновые иллюстрации:

- должны иметь разрешение не ниже 300 dpi;

комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4. Выводы

Выводы по результатам работы, описанным в данной статье, должны быть лаконичным.

Список литературы

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области.

Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации.

Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.

Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте.

Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий.

Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности.

Ссылки на неопубликованные работы недопустимы.

Самоцитирование не должно превышать 15–17 %.

Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языке, то в Списке литературы и в References лучше давать ссылку на переводную работу.

В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5-2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Финансирование

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Конфликт интересов

Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем авторы статьи считают его значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Англоязычный блок статьи

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Elena Kornienko^{1, a, *}, **Viktor Kuz'min**^{2, b}, **Alexander Sivkov**^{3, c}

(Полный список авторов с указанием Ф.И.О. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, kornienko_ee@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, vikuzmin57@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указывается его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.)

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 June 2017 (Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)

Revised: (Дата указывается редакцией)

Accepted: (Дата указывается редакцией)

Available online: (Дата указывается редакцией)

Keywords:

Plasma spraying

Boron carbide

B₄C-Ni-P

Coating

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

ABSTRACT

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **не менее 250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

For citation: Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Sivkov A.A. Structure Features of B₄C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 30–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50. (in Russian)

(Авторами указывается примерная ссылка на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта)

* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью Ф.И.О., степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

References

(Список используемой литературы на английском языке подготавливается согласно правилам, представленным на сайте журнала)

Funding (Финансирование)

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Conflicts of Interest (Конфликт интересов)

(Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т.д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «The author declare no conflict of interest».)

Acknowledgements (Выражение признательности)

(Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).)

Сведения для РИНЦ

Раздел МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

(Авторам указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹Корниенко Елена Евгеньевна, ²Кузьмин Виктор Иванович, ³Сивков Александр Анатольевич

¹Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

Корниенко Е.Е. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Кузьмин В.И. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Сивков А.А. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru

Структурные особенности плазменных покрытий В₄С-Ni-P

Аннотация

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200...250 слов). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

УДК 621.793.71

Ключевые слова:

плазменное напыление, карбид бора, В₄С-Ni-P, покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева – Дмитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed В₄С / Н. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // Coating Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 1216-1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

(Список литературы оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50%) долей зарубежных источников.)

Финансирование статьи:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Дата поступления: 01.06.2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже, чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Раздел MATERIAL SCIENCE

(Авторам указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹Kornienko Elena E., ²Kuz'min Viktor I., ³Sivkov Alexander A.

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Kornienko E.E. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Kuz'min V.I. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Sivkov A.A. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Keywords:

Plasma praying, Boron carbide, B₄C-Ni-P, Coating



Кафедры:

Инженерной графики (ИГ)
Материаловедения в машиностроении (ММ)
Проектирования технологических машин (ПТМ)
Технологии машиностроения (ТМС)
Химии и химической технологии (ХХТ)

Научная деятельность:

выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:

- создания новых материалов с уникальными свойствами;
- исследования структурных превращений в металлических материалах;
- технологий производства керамики и керамических композитов;
- исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода каталитическим разложением углеводородов при давлениях выше атмосферного;
- исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон;
- управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической обработки на одном технологическом оборудовании;
- технологий плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- разработки технологических процессов лазерной и плазменной резки, поверхностной термообработки, сварки, маркировки, а также электрохимической и ультразвуковой обработки;
- разработки опытных образцов установок и модернизации существующего оборудования электрофизических методов обработки.

Производственная деятельность:

- содействие в конструкторско-технологической подготовке производства;
- проектирование технологических процессов;
- услуги по плазменной и лазерной резке материалов;
- услуги гибки листового и трубного проката;
- определение механических свойств, химического состава и структуры материалов;
- услуги механической, термической обработки материалов;
- проектирование и изготовление технологического оборудования с подготовкой требуемой конструкторской документации в NX, SolidWorks, AutoCAD, Компас;
- проведение инженерного анализа конструкторских задач и технологических процессов в программных комплексах ANSYS, SYSWELD, APM WinMachine для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях;
- услуги плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- технологический аудит предприятий;
- установление причин разрушения деталей машин.

Образовательные услуги:

- курсы повышения квалификации и обучающие семинары для сотрудников предприятий;
- обучение работе на станках с ЧПУ, лазерных и плазменных комплексах.

Центры, лаборатории:

Учебный центр современных металлообрабатывающих технологий «DMG-НГТУ».
Научно-образовательный центр «Сварочные технологии» - «НГТУ- «Kjellberg Finsterwalde».
Научно-образовательный центр «Нанотехнологии».
Научно-образовательный центр «Лазерные и плазменные технологии».
Научно-образовательный центр в области машиностроения «НГТУ-ИТПМ СО РАН».
Учебно-научная лаборатория «Термическая обработка материалов».
Учебно-научная лаборатория «Плазменные покрытия».
Центр прототипирования.

Адрес:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, НГТУ, МТФ, V-278.

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

Сайт факультета: <http://www.mtf.nstu.ru/>

e-mail: mtf@corp.nstu.ru

Декан МТФ: к.т.н., доцент **Янпольский Василий Васильевич**



РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др.)	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

С 2015 г. опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор - *Digital Object Identifier (DOI)*. Метаданные каждой работы обязательно регистрируются в международном реестре научно-информационных материалов *CrossRef*.

Журнал индексируется в зарубежных базах данных и агрегаторах:

- Emerging Sources Citation Index (ESCI) Web of Science Core Collection;
- EBSCO (core) в базе «Applied Science & Technology Source Ultimate»;
- Ulrich's Periodicals Directory;
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

Журнал представлен:

- сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- база данных eLibrary.ru, журнал индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- реферативный журнал и база данных ВИНТИ;

- электронно-библиотечная система издательства «ЛАНЬ»;
- национальный цифровой ресурс «РУКОНТ».

График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

 +7 (383) 346-17-75

 metal_working@mail.ru



МЕРОПРИЯТИЯ

С 2014 г. научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

- Инновационные технологии в машиностроении
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты
- Материаловедение в машиностроении
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении

Официальный сайт конференции:

 <http://machine-building.conf.nstu.ru/>

