

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук,
президент Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

Байбурин В. Б., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Безъязычный В. Ф., д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)
Бодров В. Н., д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)
Бребельс А., PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)
Буренин А. А., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)
Голованчиков А. Б., д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ
Гринберг Б. А., д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)
Гуревич Л. М., д-р техн. наук, доцент ВолгГТУ
Добрушин Л. Д., д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)
Злотин С. Г., д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)
Иванов А. М., д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)
Иващенко Н. А., д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, МВТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Королев А. В., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Кузьмин С. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)
Лысак В. И., академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Марков В. А., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет МГТУ им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия)
Мертен Клеменс, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik (г. Штутгарт, Германия)
Навроцкий А. В., д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ
Нижегородцев Р. М., д-р экон. наук, главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)
Пай В. В., д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)
Полянчиков Ю. Н., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Пустовойт В. Н., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)
Русинов В. Л., чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета (ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)
Рыбин В. В., чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет (г. Санкт-Петербург, Россия)
Трюэль Жан-Луи, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция, вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»
Тхай Куанг Винь, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)
Федянов Е. А., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Фролов В. А., д-р техн. наук, проф., «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)
Шарипов В. М., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МАМИ, г. Москва, Россия)
Шаховская Л. С., д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ
Шеин А. Г., д-р физ.-мат. наук, проф. ВолгГТУ
Щербаков М. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Яковлев И. В., д-р техн. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)

Серия
«ПРОГРЕССИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Полянчиков Ю. Н., д.т.н., проф.

Сердобинцев Ю. П., д.т.н., проф.
(зам. председателя)

Безъязычный В. Ф., д.т.н. проф.
(РГАТУ им. П. А. Соловьева,
г. Рыбинск)

Схиртладзе А. Г., д.т.н. проф.
(МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)

Мухин А. В., д.т.н. проф.
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

Бржозовский Б. М., д.т.н. проф.
(СГТУ, г. Саратов)

Королев А. В., д.т.н. проф.
(СГТУ, г. Саратов)

Шумячер В. М., д.т.н., проф. ректор
(ВГИСИ, филиал ВолГАСУ,
г. Волжский)

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.

Ханов Г. В., д.т.н., проф.

Тескер Е. И., д.т.н., проф.

Благовещенская М. М., д.т.н., проф.
проректор (МГУПП, г. Москва)

Пашков Е. В., д.т.н., проф. первый
проректор (СевНТУ, г. Севастополь)

Попов В. И., д.т.н., проф.
(МГУПП, г. Москва)

Сердобинцев С. П., д.т.н., проф.
(КТУ, г. Калининград)

Плотников А. Л., д.т.н., проф.

Крайнев Д. В., к.т.н., доц.
(ответственный секретарь)

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.

Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
80811(ОК+ЭК). По вопросам
подписки обращаться
в издательство.

Тел. издательства ВолГТУ:

(8442) 24-84-06

Факс (8442) 24-84-06

otr@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 12 (207) Декабрь 2017

УЧРЕДИТЕЛЬ:

**ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»**

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.

Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00

E-mail: president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,
на отдельные статьи – сохраняется за автором**

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического
университета» категорически запрещена без оформления договора
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского
государственного технического университета» обязательна*

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

Editorial board:

Baiburin V. B., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Bezyazychny V. F., D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov (Rybinsk, Russia)

Bodrov V. N., D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

Brebels A., PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

Burenin A. A., Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

Golovanchikov A. B., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Grinberg B. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)

Gurevich L. M., D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

Dobrushin L. D., D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

Zlotin S. G., D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Ivanov A. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

Ivashchenko N. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Korolev A. V., D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Kuzmin S.V., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Kurayev A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

Lysak V. I., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Markov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Merten K., D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

Navrotskiy A. V., D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Polyanchikov Y. N., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Pustovoit V. N., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Rusinov V. L., Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Rybin V. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Russia)

Thai Quang Vinh, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

Truel J.-L., D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club “Kondratiev Circle”

Fedyanov E. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Frolov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., “MATI Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky” (Moscow, Russia)

Sharipov V. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University “MAMI” (Moscow, Russia)

Shakhovskaya L. S., D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

Sheyin A. G., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof. of VSTU

Yakovlev I. V., D. Sc. (Economy), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

SERIES
«ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING»

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees

Editorial board:

Chairman

Polyanchikov Y.N., D. Sc.
(Engineering), Prof.

Serdobintsev Y.P., D. Sc.
(Engineering), Prof. (Vice-chairman)

Bez'yazychniy V.F., D. Sc.
(Engineering), Prof. (RSATU
named after P.A. Solovyov, Rybinsk)

Skhirtladze A.G., D. Sc.
(Engineering), Prof.
(MSTU STANKIN, Moscow)

Mukhin A.V., D. Sc. (Engineering),
Prof. (Bauman MSTU, Moscow)

Brzhozovsky B. M., D. Sc.
(SSTU, Saratov)

Korolev A.V., D. Sc., Prof.
(SSTU, Saratov)

Shumyacher V.M., D. Sc.
(Engineering), Prof., Rector
(Volzhski affiliate of VSUACE,
Volzhski)

Sidyakin Y.I., D. Sc. (Engineering), Prof.
Khanov G.V., D. Sc. (Engineering), Prof.

Tesker E.I., D. Sc. (Engineering), Prof.

Blagoveschenskaya M.M., D. Sc.
(Engineering), Prof., Vice-rector
(MSUFP, Moscow)

Pashkov E.V., D. Sc. (Engineering),
Prof., First vice-rector
(SEVNTU, Sevastopol)

Popov V.I., D. Sc. (Engineering),
Prof. (MSUAB, Moscow)

Serdobintsev S.P., D. Sc.
(Engineering), Prof.
(KSTU, Kaliningrad)

Plotnikov A.L., D. Sc. (Engineering), Prof.
Kraynev D.V. (executive secretary),
Cand. Sc., Ass. Prof.

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by subscription.
Index of the journal in the catalogue of
the Agency «Rospechat» for the Rus-
sian Federation – 80811(OK+ЭК).
Concerning subscription turn to the
editorial office.

Tel. Of VSTU editorial office:

(+7 8442) 24-84-06
Fax: (+7 8442) 24-84-06
otr@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 12 (207) December 2017

FOUNDER:

FSBEI of Higher Professional Education
«Volgograd State Technical University»

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00

E-mail: president@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication,
IT and Mass Communications (Roscomnadzor)
Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of
Volgograd State Technical University

*The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – to authors.*

*Reprint from the journal «Izvestia VSTU» is strongly forbidden without conclusion of an
agreement in accordance with the legislation of the RF
When reprinting the materials, the citation to the journal «Izvestia VSTU» is obligatory*

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Алексейчук В. И. 48
Андронов Т. В. 87
Антонов Н. М. 75
Банников А. И. 48
Барабанов В. Г. 59, 91
Борозенец В. Н. 77
Быченко Д. М. 45
Веткасов Н. И. 7
Ветлицын Н. Ю. 33
Воронцова А. Н. 12
Гаврилов Д. П. 51
Грачев С. С. 54
Гришанкова Н. С. 87
Даниленко М. В. 31
Дубовова Д. С. 18
Егоров Н. И. 33
Еплов П. Е. 79
Имандинов Ш. А. 14
Капитанов А. В. 59
Капустин А. И. 7
Карлов В. И. 63, 69
Киселев Е. С. 14
Ковалев А. А. 45
Кожевникова А. А. 18
Козловцева Н. В. 59
Крайнев Д. В. 18
Красильников Р. В. 12
Крутикова А. А. 28
Крылов Е. Г. 59
Крыхтин Ю. И. 63, 69
Кулагин Р. Н. 83
Лебедь Н. И. 75
Макаров А. М. 75, 83, 87
Макарова О. А. 48
Марков Д. О. 77
Мартынов В. В. 21
Матлахов В. П. 42
Назаров М. В. 14
Нигметзянов Р. И. 25
Новиков А. Е. 75
Носенко В. А. 28, 31
Павлов А. С. 79
Переладов А. Б. 39, 54
Петрухин А. В. 77
Плешакова Е. С. 21
Плотников А. С. 79
Полянчиков Ю. Н. 33
Полянчикова М. Ю. 33
Рупасов И. А. 39
Сапунов В. В. 7
Свиридова В. Г. 12
Селифонов В. С. 42
Сидякин Ю. И. 28
Солодков В. А. 45
Сотников Д. В. 83
Сундуков С. К. 25
Тихонова Ж. С. 18, 79
Фатюхин Д. С. 25
Хандожко В. А. 42
Харькин О. С. 83
Хорошевский М. Д. 87
Шведкой Д. А. 91
Шевченко К. А. 77

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Веткасов Н. И., Капустин А. И., Сапунов В. В.</i> Формирование фазового состава, структурных параметров и физико-механических свойств композиционных гранул в процессе механического легирования алюминия аллотропными формами углерода.....	7
<i>Воронцова А. Н., Красильников Р. В., Свиридова В. Г.</i> Концептуальный подход к разработке системы управления рисками при контроле качества продукции в механическом цехе машиностроительного завода.....	12
<i>Киселев Е. С., Имандинов Ш. А., Назаров М. В.</i> Особенности обеспечения качества нежестких алюминиевых заготовок при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний.....	14
<i>Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Кожевникова А. А., Дубовова Д. С.</i> Оперативная диагностика как средство повышения надежности функционирования систем ЧПУ.....	18
<i>Мартынов В. В., Плевакова Е. С.</i> Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента.....	21
<i>Нигметзянов Р. И., Сундуков С. К., Фатяхин Д. С.</i> Влияние частоты колебаний на эффективность ультразвукового упрочнения.....	25
<i>Носенко В. А., Крутикова А. А., Сидякин Ю. И.</i> Повышение эффективности шлифования с использованием импрегнаторов, выделяющих в зоне резания активные газовые среды.....	28
<i>Носенко В. А., Даниленко М. В.</i> Динамическая теоретико-вероятностная модель силы резания при шлифовании.....	31
<i>Полянчикова М. Ю., Полянчиков Ю. Н., Егоров Н. И., Ветлицын Н. Ю.</i> Определение упругих характеристик однокомпонентного абразивного инструмента.....	33
<i>Рупасов И. А., Переладов А. Б.</i> Разработка нейросетевого ядра системы автоматизированного проектирования шлифовальных операций.....	39
<i>Селифонов В. С., Хандожко В. А., Матлахов В. П.</i> Стенд для параметризации и настройки сервоприводов станков с числовым программным управлением.....	42
<i>Солодков В. А., Ковалев А. А., Быченко Д. М.</i> Особенности стружкообразования при врезании с использованием твердых смазок.....	45
<i>Алексеичук В. И., Макарова О. А., Банников А. И.</i> Поверхность, получаемая при обработке цилиндрической щеткой.....	48
Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Гаврилов Д. П., Барабанов В. Г.</i> Разработка системы управления криогенным насосным агрегатом.....	51
<i>Грачев С. С., Переладов А. Б.</i> Применение средств автоматизированного проектирования шлифовальных операций при изготовлении деталей трубопроводной арматуры.....	54

<i>Крылов Е. Г., Барабанов В. Г., Козловцева Н. В., Капитанов А. В.</i> Формирование ветвящихся и итеративных алгоритмов при интеллектуальном планировании действий в реконфигурируемых системах.....	59
<i>Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.</i> Повышение долговечности и надежности работы в масле фрикционных устройств гидромеханической трансмиссии транспортной гусеничной машины.....	63
<i>Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.</i> Разработка заготовок дисков трения с бронзовым на основе БрАЖ(SiC) покрытием для надежной работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин.....	69
<i>Лебедь Н. И., Антонов Н. М., Макаров А. М., Новиков А. Е.</i> Результаты исследований автоматизированного роторного измельчителя плодоовощного сырья.....	75
<i>Петрухин А. В., Марков Д. О., Шевченко К. А., Борозенец В. Н.</i> Новые технологии реализации человеко-машинного интерфейса для управления автоматизированными системами.....	77
<i>Плотников А. Л., Тихонова Ж. С., Еплов П. Е., Павлов А. С.</i> Физические основы использования величины термоЭДС естественной термодпары для оперативной оценки свойств контактных пар «быстрорежущий инструмент – стальная заготовка».....	79
<i>Сотников Д. В., Кулагин Р. Н., Харькин О. С., Макаров А. М.</i> Автоматизированная система расчета основных параметров компенсационного стабилизатора напряжения.....	83
<i>Хорошевский М. Д., Макаров А. М., Гришанкова Н. С., Андронов Т. В.</i> Лабораторный стенд для изучения микропроцессорной системы управления параллельной работой шаговых двигателей.....	87
<i>Шведкой Д. А., Барабанов В. Г.</i> Разработка системы автоматического поддержания температуры в тепличном помещении.....	91
К сведению авторов.....	95

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.763

Н. И. Веткасов¹, А. И. Капустин², В. В. Сапунов³

ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГРАНУЛ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ АЛЛОТРОПНЫМИ ФОРМАМИ УГЛЕРОДА*

Ульяновский государственный технический университет

E-mail: nppwt@ulstu.ru¹; antak1949@mail.ru²; sapunov_vv@mail.ru³

В статье представлены результаты экспериментального исследования процесса механического легирования порошка алюминия ПАД-1 техническим углеродом К 354, кристаллическим графитом ГЛ-1 и одностенными углеродными нанотрубками TUBALL, обеспечивающего формирование фазового состава, структурных параметров и, в конечном счете, физико-механических свойств получаемых композиционных гранул. Приведены структурные характеристики и микротвердость исходного порошка алюминиевого ПАД-1 и получаемых композиционных гранул. Показано сходство механизма образования упрочняющих фаз при механическом легировании матричного алюминия аморфным углеродом и кристаллическим графитом.

Дано общее описание разработанной авторами технологии и примененной оригинальной конструкции механического реактора для механического легирования алюминиевого матричного порошка ПАД-1 техническим углеродом К 354, кристаллическим графитом ГЛ-1 и одностенными углеродными нанотрубками TUBALL.

Дана оценка эффективности авторской технологии механического легирования по достигаемому уровню микротвердости композиционных гранул, их фазовому составу и микроструктуре.

Представлены и проанализированы результаты рентгено-фазового анализа композиционных гранул, легированных техническим углеродом К 354, графитом ГЛ-1 и одностенными углеродными нанотрубками TUBALL.

Сделан вывод о возможности повышения эффективности легирования за счет проведения предварительной гомогенизации смеси «ПАД-УНТ».

Ключевые слова: алюминий; технический углерод; графит; одностенные углеродные нанотрубки; механическое легирование; композиционный материал; микротвердость; рентгено-фазовый анализ.

N. I. Vetkasov¹, A. I. Kapustin², V. V. Sapunov³

THE FORMATION OF PHASE COMPOSITION, STRUCTURAL PARAMETERS AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE GRANULES IN THE PROCESS OF MECHANICAL ALLOYING OF ALUMINIUM ALLOTROPIC FORMS OF CARBON

Ulyanovsk State Technical University

The paper presents the results of an experimental study of the process of mechanical alloying of aluminum powder PAD-1 with carbon K 354, crystalline graphite GL-1 and single-walled carbon nanotubes TUBALL, which provides the formation of the phase composition, structural parameters and ultimately the physico-mechanical properties of the resulting composite pellets. The structural characteristics and microhardness of the initial powder of aluminum PAD-1 and the resulting composite granules are given. The similarity of the mechanism of formation of strengthening phases during mechanical alloying of matrix aluminum by amorphous carbon and crystalline graphite is shown.

A general description of the technology developed by the authors and the original mechanical design used for mechanical alloying of aluminum matrix powder PAD-1 with carbon K 354, crystalline graphite GL-1 and single-walled carbon nanotubes TUBALL is given.

The efficiency of the author's technology of mechanical alloying is estimated at the achieved microhardness level of composite granules, their phase composition and microstructure.

The results of X-ray analysis of composite granules doped with K 354 technical carbon, GL-1 graphite and single-walled carbon nanotubes TUBALL are presented and analyzed.

A conclusion is made about the possibility of increasing the efficiency of doping by conducting preliminary homogenization of the "PAD-CNT" mixture.

Keywords: aluminum; technical carbon; graphite; single-walled carbon nanotubes; mechanical alloying; composite material; microhardness; X-ray analysis.

В настоящее время при создании ряда изделий в судостроении, авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности находят широкое применение высокопрочные, легкие композиционные материалы (КМ), армированные стекловолокном, асбестовыми, углеродными, джутовыми, керамическими, неорганическими, органическими, металлическими и другими материалами. Многообразии матричных материалов и схем их армирования позволяет целенаправленно регулировать прочность, жесткость и другие физико-механические свойства путем подбора состава и соотношения компонентов и структуры КМ, важнейшим преимуществом которых является возможность создания из них элементов конструкций с заранее заданными эксплуатационными свойствами [1–7].

Наиболее востребованными в последнее время КМ являются материалы с уникальными физико-механическими свойствами на основе алюминия, механически легированного (МЛ) различными аллотропными формами углерода [1–4].

Эффективное применение механического легирования порошкового алюминия для получения новых разновидностей дисперсно-упрочненных композиционных материалов, обладающих высокими физико-механическими свойствами, возможно при условии поиска, разработки и внедрения новых технических решений и методов совершенствования технологии МЛ порошков алюминия, обеспечивающей синтез композиционных гранул с высокими физико-механическими характеристиками. Обеспечение требуемых стабильных значений физико-механических характеристик композиционных гранул является обязательным условием гарантированного получения качественного готового КМ.

В статье представлены результаты исследования процессов МЛ алюминия тремя аллотропными формами углерода, обеспечивающих формирование фазового состава, структурных параметров и, в конечном счете, физико-механических свойств получаемых композиционных гранул.

В качестве объекта исследований выбраны композиционные гранулы на основе алюминиевого порошка марки ПАД-1 (СТО 22436138-006-2006), легированного техническим углеродом марки К 354 (ГОСТ 7885), графитом кристаллическим литейным ГЛ-1 (ГОСТ 5279) и одностенными углеродными нанотрубками TUBALL 01RW01 ТУ 2166-001-91735575-2014 (производитель ООО «ОКС и AL.ru», г. Новосибирск).

Механическое легирование порошка алюминия в исследованиях проводили на лабораторном механическом реакторе (МР) оригинальной конструкции вибрационного типа с двумя внутренними виброэлементами, закрепленными на единой горизонтальной оси, создающими вибросиловые воздействия на шаровые помольные тела в двух взаимно перпендикулярных направлениях с фазовым сдвигом 30° . МР оснащен устройством отбора проб шихты (пробоотборником), позволяющим производить отбор и анализ шихты в любой момент времени процесса МЛ.

Исследование структурных параметров, структурно-зависимых характеристик и фазового состава композиционных гранул проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. В качестве исследуемых параметров были выбраны: полуширина рентгеновской линии β_{111} , параметр текстуры J_{111}/J_{200} , размер кристаллитов D , относительная микродеформация кристаллической решетки $\Delta a/a$ [8, 9].

За основную характеристику физико-механических свойств получаемых в процессе МЛ композиционных гранул приняли микротвердость HV . Микротвердость композиционных гранул однозначно определяет эффективность процесса МЛ и пригодность гранул для изготовления качественных КМ, отвечающих задаваемым требованиям. Это обусловлено тем, что на основе результатов измерения микротвердости композиционных гранул может быть дана достоверная оценка предела текучести при растяжении готовых алюминиевых КМ, полученных механическим легированием, по формуле [8]:

$$\sigma_T = HV/(3,0 \pm 0,1),$$

где σ_T – предел текучести КМ, МПа; HV – микротвердость, МПа.

Микротвердость композиционных гранул измеряли на микротвердомере «TUKON 1102». Проводили статистическую обработку результатов измерений по восьми – десяти отпечаткам пирамидки.

Основной целью проводимых исследований являлась оценка эффективности МЛ порошка ПАД-1 техническим углеродом К 354, кристаллическим графитом ГЛ-1 и одностенными нанотрубками «TUBALL», в части синтеза композиционных гранул с высокой микротвердостью, развитой мелкокристаллитной наноразмерной структурой и требуемым фазовым составом.

Контролю микротвердости и рентгеноструктурному анализу (в Си – излучении) подвергались композиционные гранулы после МЛ, гранульные брикеты после холодной формовки при давлении 600 МПа, а также композиционные гранулы и брикеты после термической обработки в среде аргона при температурах 400 °С и 530 °С.

Гранульные брикеты формовались в форме таблеток диаметром 20 мм и высотой до 10 мм.

На первом этапе исследовали структурные характеристики и микротвердость исходного порошка ПАД-1. Для этого порошок (как в дальнейшем и композиционные гранулы) омоноличивали эпоксидной смолой, формируя таблетки-моноблоки диаметром 20 мм и высотой до 10 мм, пригодные для выполнения шлифов и проведения контроля микротвердости. При этом, на основании результатов собственных исследований и с учетом опыта зарубежных исследователей [7, 8], с целью получения композиционных гранул с большей микротвердостью, в качестве исходного матричного порошка использовали фракцию ПАД-1 размером до 30 мкм.

Исследования показали, что среднее значение микротвердости исходного порошка алюминия составила 254 МПа. Насыпная плотность порошка составляла 1,3 г/см³. Рентгенографическими исследованиями исходного порошка ПАД-1 были зарегистрированы следующие значения его структурных характеристик: полуширина рентгеновской линии $\beta_{111} = 0,206$, параметр текстуры $J_{111}/J_{200} = 2,62$, размер кристаллитов $D = 93,33$ нм, относительная микродеформация кристаллической решетки $\Delta a/a = 1,27 \cdot 10^{-3}$. Дифрактограмма порошка соответствовала дифрактограмме химически чистого алюминия (с минимальным содержанием примесей).

Исследования эффективности примененной технологии МЛ показали следующее.

Применение разработанной авторами базовой технологии МЛ матричного порошка алюминия ПАД-1 углеродом обеспечивает получение композиционных гранул непосредственно после МЛ с микротвердостью не менее чем в 2,8 раза выше, чем и у исходного порошка алюминия при легировании УНТ, в 3,5 раза – при легировании графитом и в 4 раза – при легировании техническим углеродом.

При этом после МЛ достигалось значительное уменьшение размеров кристаллитов у композиционных гранул по сравнению с исходным порошком, что свидетельствует об эффективно-

сти примененного процесса МЛ в части формирования внутренней мелкокристаллитной наноразмерной структуры композиционных гранул, с развитой и высокоактивной в силу насыщенности кристаллографическими дефектами разного характера, поверхностью. Именно на этой поверхности происходит образование и сосредоточение молекул упрочняющих фаз (Al_4C_3 и Al_2O_3) количество которых возрастает при последующих термомеханических обработках.

Дифрактограммы синтезированных в процессе МЛ исходного порошка ПАД-1 техническим углеродом К 354 (5 % масс.) композиционных гранул до термообработки, после термообработки при 400 °С (30 ч) и после термообработки при 530 °С (3 ч) приведены на рис. 1.

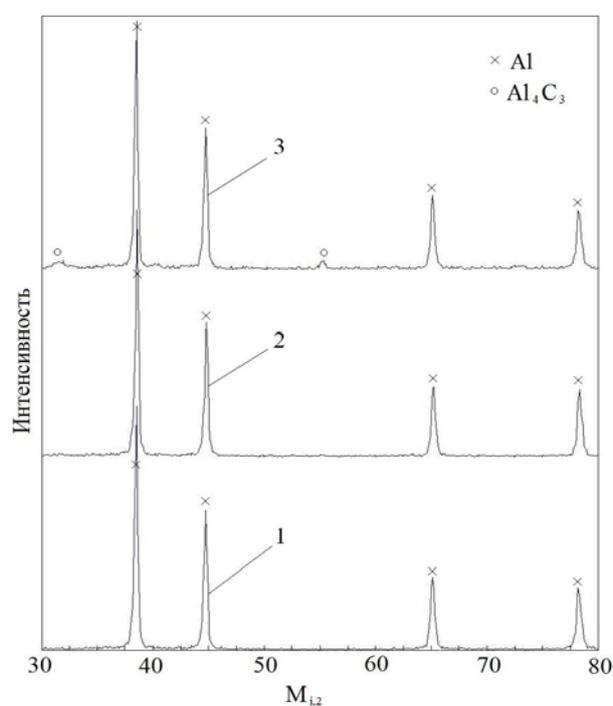


Рис. 1. Дифрактограммы (получены при шаге 0,1 град и экспозиции 1с) образцов скомпактированных из механически легированных композиционных гранул с содержанием аморфного углерода 5 %:

1 – образец после МЛ, до термообработки; 2 – образец после термообработки при 400 °С (30 ч); 3 – образец после термообработки при 530 °С (3 ч)

Из дифрактограммы (рис. 1, поз. 1) видно, что фазовый состав композиционных гранул, не прошедших термическую обработку, соответствует фазовому составу исходного порошка алюминия.

Дифрактограмма композиционных гранул после термообработки при 400 °С (сняты при большем разрешении) приведена на рис. 2. На дифрактограмме образца после термообработки

при температуре 400 °С появились слабые рефлексы, характерные для карбида алюминия и свидетельствующие о появлении «зародышей» этого химического соединения (рис. 2).

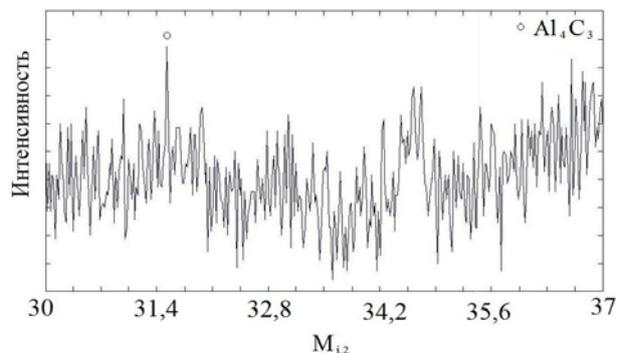


Рис. 2. Дифрактограмма образца-компакта после термообработки при 400 °С, полученная при шаге 0,02 град и экспозиции 3 с

После термообработки при температуре 530 °С интенсивность данных рефлексов (рис. 1, поз. 3) существенно увеличивалась, что говорит, в частности, о выводе из твердого раствора части аморфного углерода, участвующего в образовании упрочняющих наноразмерных дисперсоидов карбида алюминия. Эти атомы освобожденного углерода начинают участвовать не только в укрупнении уже образовавшихся частиц карбида алюминия, но в образовании новых карбидов, повышая их количество в объеме композиционных гранул. Во время термообработки происходит рост уже образовавшихся «зародышей» карбидов алюминия, возникших в результате синтеза композиционных гранул в процессе МЛ, а также образование и рост новых карбидов Al_4C_3 [3, 10–12].

Анализ изменения основных информативных структурных характеристик композиционных гранул показал [8, 9]:

- после МЛ по сравнению с их значениями для гранул из исходного порошка алюминия – увеличение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,206 до 0,307 и соответствующее уменьшение размера нанокристаллитов D с 93,63 до 37,65 нм;

- после термообработки при 400 °С в течение 30 часов по сравнению с их значениями для гранул после МЛ – уменьшение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,307 до 0,283 с соответствующим увеличением размера нанокристаллитов D с 37,65 до 40,28 нм;

- после дополнительной термообработки этих же гранул при 530 °С по сравнению с их, полученными после термообработки при 400 °С –

уменьшение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,283 с соответствующим увеличением размера нанокристаллитов D с 40,28 до 42,88 нм.

Дифрактограммы образца, скомпактированного из шихты с графитом ГЛ-1 до проведения процесса МЛ, а также образцов из композиционных гранул, синтезированных в процессе МЛ исходного порошка ПАД-1 графитом литьевым ГЛ-1 (5 % масс.) приведены на рис. 3.

На дифрактограмме образца, скомпактированного из исследуемой шихты, содержащей 5 % графита, до проведения процесса МЛ присутствовала четкая линия графита (рис. 3. поз. 1).

На дифрактограмме образца, скомпактированного из композиционных гранул, полученных после МЛ этой же шихты, линия графита исчезла (рис. 3, поз. 2).

На дифрактограмме этого же компакта после термической обработки появились рефлексы упрочняющей фазы Al_4C_3 (рис. 3, поз. 3), что указывает на практически полную аморфотизацию графита в процессе МЛ с образованием аморфного углерода в композиционных гранулах.

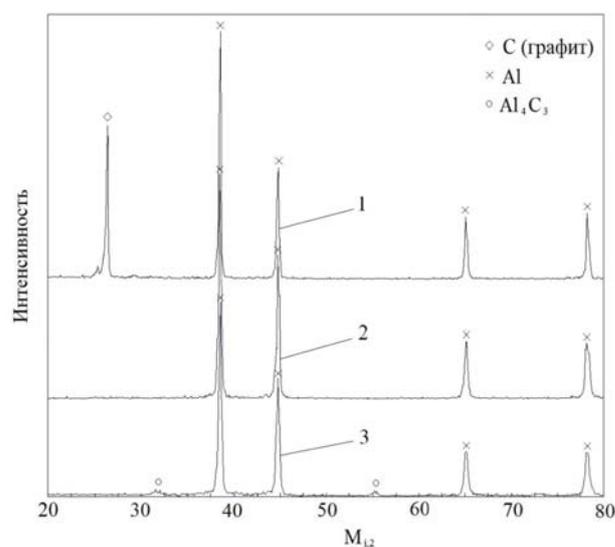


Рис. 3. Дифрактограммы образцов, скомпактированных из механически легированных композиционных гранул с содержанием графита 5 %:

1 – образец, скомпактированный из шихты до проведения процесса МЛ; 2 – образец, скомпактированный из композиционных гранул, полученных после МЛ; 3 – образец из композиционных гранул после термической обработки при 530 °С

Анализ изменения основных информативных структурных характеристик этих композиционных гранул показал:

- после МЛ по сравнению с их значениями для гранул из исходного порошка алюминия – увеличение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,206 до 0,349 и соответствующее умень-

шение размера нанокристаллитов D с 93,63 до 20,6 нм;

– после термообработки этих же гранул (в составе компакта) при 530 °С по сравнению с их значениями для гранул после МЛ – уменьшение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,349 до 0,315 с соответствующим увеличением размера нанокристаллитов D с 20,6 до 36,22 нм.

На дифрактограммах образцов с УНТ отмечено отсутствие рефлексов карбида алюминия как непосредственно после МЛ, так и после термической обработки, что свидетельствует о сохранности нанотрубок (отсутствии или незначительной их аморфотизации при легировании в исследованном процессе МЛ).

При этом имеет место следующее:

– после МЛ по сравнению с их значениями для гранул из исходного порошка алюминия – увеличение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,206 до 0,299 и соответствующее уменьшение размера нанокристаллитов D с 93,63 до 37,21 нм;

– после термообработки этих же гранул (в составе компакта) при 530 °С по сравнению с их значениями для гранул после МЛ – уменьшение полуширины рентгеновской линии β_{111} с 0,299 до 0,266 с соответствующим увеличением размера нанокристаллитов D с 37,21 до 47,82 нм.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно отметить, что разработанный процесс МЛ матричного порошка алюминия ПАД-1 обеспечивает синтез композиционных гранул с микротвердостью, превышающей микротвердость исходного порошка не менее чем в 4 раза при легировании техническим углеродом, в 3 раза при легировании графитом и в 2,8 раза при легировании УНТ, с мелкокристаллической наноразмерной структурой, содержащей, в случае легирования техническим углеродом и графитом, упрочняющие наноразмерные дисперсоиды карбида алюминия Al_4C_3 .

Относительно низкий уровень микротвердости композиционных гранул упрочненных УНТ, вероятно, связан с влиянием неравномерного распределения нанотрубок в массиве обрабатываемой смеси. Для повышения эффективности легирования УНТ необходимо решить задачу разработки процесса предварительной гомогенизации смеси «ПАД-УНТ» непосредственно перед МЛ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бунаков, Н. А. Получение композитного материала из алюминия с углеродными нанотрубками методами порошковой металлургии / Н. А. Бунаков, В. Н. Голованов, Д. В. Козлов, С. Н. Потапов, Е. С. Климов // Физико-математические методы и информационные технологии в естественных, технике и гуманитарных науках : сб. матер. междунар. науч. е-симпозиума / под ред. доц. А. Б. Чебоксарова. – Киров: МЦНИП, 2015. – С. 25–37.
2. Бунаков, Н. А. Композиционный материал на основе алюминия с добавлением многостенных углеродных нанотрубок: получение, структура, свойства / Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов, В. Н. Голованов, Е. С. Климов, М. С. Ефимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – Пенза: Пензенский государственный университет. – 2016. – № 2 (38). – С. 134–146.
3. Шалунов, Е. П. Синтез дисперсоидов при реакционном механическом легировании порошкового алюминия углеродом / Е. П. Шалунов, М. А. Шведов, И. В. Архипов // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 165–172.
4. Типикина, И. И. Микронапряжения в механически легированном сплаве AL-15 мас. % (NI-LN) / И. И. Типикина, Ю. В. Кузьмич, С. А. Котов, И. Г. Колесникова, С. В. Ганин // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья баренц-региона в технологии строительных и технических материалов : матер. V Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2013. – С. 169–170.
5. Кузьмич, Ю. В. Механически легированный сплав Al-Ni-Ln / Ю. В. Кузьмич, Б. М. Фрейдин, И. Г. Колесникова, В. И. Серба, В. Т. Калинин, Я. А. Пахомовский // Перспективные материалы. – 2008. – № 1. – С. 39–45.
6. Zhu, X.; Zhao, Y.G.; Wu, M.; Wang, H.Y.; Jiang, Q.C. Effect of Initial Aluminum Alloy Particle Size on the Damage of Carbon Nanotubes during Ball Milling. *Materials* 2016, 9, 173.
7. Farhad Ostovan, Khamirul Amin Matori, Meysam Toozandehjani, Arshin Oskoueian, Hamdan Mohamed Yusoff, Robiah Yunus, Azmah Hanim Mohamed Ariff, Hock Jin Quah, Way Foong Lim Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, Volume 166, 15 September 2015, Pages 160-166.
8. Табаков, В. П. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента : учебное пособие / В. П. Табаков, С. Н. Григорьев, А. С. Верещака. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 196 с.
9. Пушаровский, Д. Ю. Рентгенография минералов / Д. Ю. Пушаровский. – М. : ЗАО «Геоинформмак», 2000. – 293 с.
10. Веткасов, Н. И. Экспериментальное исследование процесса механического легирования алюминия техническим углеродом / Н. И. Веткасов, А. И. Капустин, В. В. Сапунов // Теоретические и практические аспекты развития научной мысли в современном мире : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (15 мая 2017 г., г. Екатеринбург). В 4 ч. Ч. 2. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 18–21.
11. Вол, А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем / А. Е. Вол. – М. : Физматгиз, 1955. – 755 с.
12. Мондольфо, Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов ; пер. с англ. / Л. Ф. Мондольфо. – Металлургия, 1979. – 639 с.

УДК 65.0
ББК 65.290.2

А. Н. Воронцова, Р. В. Красильников, В. Г. Свиридова

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РИСКАМИ ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ
В МЕХАНИЧЕСКОМ ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: vorontsova@yandex.ru

Предложен концептуальный подход к разработке системы управления рисками. Данный подход был рассмотрен на примере контроля качества продукции в механическом цехе машиностроительного завода.

Ключевые слова: риск, качество, контроль, модель управления.

A. N. Vorontsova, R. V. Krasilnikov, V. G. Sviridova

**CONCEPTUAL APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF A RISK
MANAGEMENT SYSTEM FOR THE QUALITY CONTROL OF PRODUCTS
IN THE MACHINE SHOP OF ENGINEERING PLANT**

Volgograd State Technical University

Proposed conceptual approach to the development of the risk management system. This approach was considered on the example of quality control in the machine shop of engineering plant.

Keywords: risk, quality, control, management model.

Впервые четкая концепция на управление рисками в системе менеджмента качества сделана в последней версии стандарта ИСО 9001:2015. Эта концепция включается в требования, относящиеся к разработке, внедрению и поддержанию на заданном уровне системы управления качеством.

Данный стандарт определил дополнительное (по сравнению с предыдущими версиями) требование: «Процессы планирования и оценки рисков и возможностей». Данное требование подразумевает, что организация должна определить риски и потенциальные возможности, по которым должны быть предприняты действия, чтобы гарантировать, что система менеджмента качества может достигать ожидаемых результатов; предотвращать или уменьшать нежелательные последствия и обеспечить постоянное улучшение.

В рассматриваемой версии стандарта ИСО 9001:2015 риск определен как «влияние неопределенности на ожидаемый результат», а неопределенность рассматривается как «состояние, даже частичное, недостаточности информации, понимания или знания относительно события, его последствий или вероятности».

Международная организация по стандартизации ИСО разработала стандарт ГОСТ Р ИСО 31000:2010, в котором рассмотрены проблемы, связанные с инфраструктурой и процессом ме-

неджмента риска (или риск-менеджмента). Принципы, заложенные в стандарте, могут использоваться в любой организации, вне зависимости от ее размера и вида деятельности. Эти принципы применимы для любого вида риска и не зависят от природы и негативных или позитивных последствий реализации риска.

Схема процесса риск-менеджмента в стандарте включает действия: отражение ситуации, идентификация риска, его анализ, оценка, инструменты воздействия. Процесс предусматривает обмен информацией с внешними и внутренними заинтересованными лицами, а также мониторинг и пересмотр результатов.

Как известно, система менеджмента качества в международных стандартах серии ИСО 9000 базируется на процессном подходе управления и в стандарте ИСО 9001 (любой версии) перечисляются процессы управления. С позиций стандарта ИСО 31000 каждый из этих процессов несет в себе реальные и (или) потенциальные риски. Но для управления рисками потребовалось еще одно определение – операционный риск. Международное бизнес-сообщество сравнительно недавно сформулировало это определение: «Операционные риски – это риски, возникающие из-за неадекватности, нечетких процессов организации, сбоев, которые возникают в процессах, а также коллизий, возникающих из-за ошибок людей и систем, или из-за внешних событий».

Таким образом, процессный подход к управлению, ориентация на риски управления этими процессами, понятие операционного риска, разработка принципиальной модели риск-менеджмента позволяют объединить систему менеджмента качества с системой риск-менеджмента в единую систему управления организацией.

Процессный подход, заложенный в основу управления качеством в международных стандартах ИСО серии 9000, базируется на использовании цикла «Plan - Do - Check - Act», где Check трактуется как «постоянно контролируй-

те и измеряйте процессы и продукцию в сравнении с политикой, целями и требованиями на продукцию и сообщайте о результатах».

В соответствии с вышесказанным исследование рисков, связанных с контролем качества продукции, является актуальным. В качестве объектов исследования рассматривались технологический процесс и операция механической обработки детали. Ставилась задача разработать концептуальную систему управления рисками в системе менеджмента качества при контроле качества деталей в механическом цехе.



Управление рисками при метрологической дисциплине

В стандартах ИСО серии 9000 требования к контролю включают: контроль качества метрологического обеспечения и контроль качества продукции. В соответствии с этим, были установлены объекты управления рисками. Для процессов, связанных с метрологическим обеспечением, отнесены требования:

- обеспечение пригодности средств измерения для конкретного вида деятельности;
- постоянное соответствие целям применения.

Для контроля качества детали установлены объекты контроля качества на отдельных операциях и технологический процесс в целом:

– геометрические параметры;
 – физико-механические свойства и структура материала;
 – надежности системы контроля (операционная и технологического процесса в целом).

Дальнейшее исследование предполагает составление реестра рисков, их анализ и оценку, выбор действий по обработке рисков и разработку плана по управлению рисками в соответствии с поставленными задачами.

Например, при метрологическом обеспечении производства средствами измерений возникают риски, связанные с их пригодностью для конкретного вида измерений. Чаще всего это инвариантная задача, требующая метрологического анализа. В качестве инструмента для проведения анализа выбрана процедура метрологической экспертизы технологической документации.

Своевременно и качественно проведенная метрологическая экспертиза позволяет вовремя вскрыть и устранить метрологические ошибки на ранних стадиях подготовки и производства продукции. Данный инструмент используется также в условиях действующего производства, когда вносятся изменения в технологию, влияющие на качество, что находит отражение в изменениях, вносимых в конструкторскую и технологическую документацию.

Для машиностроительной продукции метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации представляет анализ и оценку технических решений по выбору параметров, подлежащих контролю, измерениям и испытаниям, установлению норм точности, обеспечению методами и средствами измерений процессов разработки, изготовления, испытания, эксплуатации и ремонта изделий. Состав документации, подвергаемой метрологической экспертизе устанавливает сама организация, на основании чего составляется реестр рисков и выбирается методика их оценки с целью выработки действий по обработке рисков.

Перечисленные предпосылки, позволили разработать концептуальную модель управления рисками при контроле качества деталей в механическом цехе, представленную на рисунке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования»
2. ГОСТ Р ИСО 31000:2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»
3. РМГ 63–2003 «Государственная система измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза».
4. *Воронцова, А. Н.* Управление контролем в системе менеджмента качества : учеб. / А. Н. Воронцова, Ю. Н. Поляничков, А. Г. Схиртладзе. «ТНТ», Старый Оскол, 2008. – 298 с.

УДК: 621.9.015

Е. С. Киселев¹, Ш. А. Имандинов², М. В. Назаров³

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА НЕЖЕСТКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ*

Ульяновский государственный технический университет

E-mail: kec.ulstu@mail.ru¹, flip01@mail.ru², traktorbek92@mail.ru³

Представлены результаты исследований по оценке возможностей снижения технологических остаточных напряжений и деформаций нежестких деталей из алюминиевых сплавов при их изготовлении фрезерованием. Установлено, что введение в зону обработки энергии ультразвукового поля позволяет уменьшить величину и глубину распространения остаточных напряжений в среднем на 30 %. Вследствие этого наблюдается существенное снижение деформаций тонкостенных алюминиевых заготовок после снятия их со станка. Одновременно отмечено положительное влияние ультразвука на увеличение упрочняющих составляющих фазового состава поверхностного слоя.

Путем проведения экспериментальных исследований по многофакторному плану выявлено влияние элементов режима резания на процесс формирования технологических остаточных напряжений. Как следует из анализа результатов, доминирующее значение имеет глубина резания. Переход на высокоскоростную обработку заготовок из алюминиевых сплавов не вносит принципиальных изменений в этот процесс. Изготовление нежестких тонкостенных деталей весьма чувствительно к изменениям глубины резания и меньше зависит от подачи.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, остаточные напряжения, фазовый состав, нежесткие детали, ультразвук, фрезерование.

© Киселев Е. С., Имандинов Ш. А., Назаров М. В., 2017

* Исследования проведены в рамках выполнения гранта РФФИ по проекту 16-47-732010 Р_ОФИ_М

E. S. Kiselev¹, S. A. Imandinov², M. V. Nazarov³

**QUALITY ASSURANCE FEATURES NON-RIGID ALUMINUM
BLANKS when MILLING with ULTRASONIC VIBRATIONS**

Ulyanovsk State Technical University

Presents the results of evaluation studies of technological possibilities for reducing residual stresses and deformations of soft parts of aluminium alloys milling in their manufacture. It has been established that the introduction of a processing zone energy ultrasound field reduces the amount and depth of distribution of residual stresses in an average of 30%. As a consequence, there has been a significant reduction of deformations of thin-walled aluminum blanks after removing them from the machine. At the same time pointed out the positive effect of ultrasound on the increasing strengthening components of phase composition of the surface layer. By conducting experimental research on many-factors plan revealed the influence of the elements on the cutting process of forming technology of residual stresses. As can be seen from the analysis of the results, the dominant value is depth of cut. The transition to high-speed processing products from aluminum alloys is not making fundamental changes in the this process manufacture of flexible thin-walled parts are very sensitive to changes in the cutting depth and less dependent on submission.

Keywords: aluminium alloys, residual stresses, phase composition, opportunistic, ultrasound parts, milling

Принято считать, что в силу значительно меньшей теплопроводности по сравнению с конструкционными углеродистыми и низколегированными сталями, основная опасность выхода за пределы допуска угловых размеров нежестких тонкостенных деталей наблюдается при их изготовлении из труднообрабатываемых сплавов и сталей. Однако в практике производства сложных по форме длинномерных нежестких алюминиевых деталей летательных аппаратов, несмотря на их высокую теплопроводность (одна из самых высоких среди металлов), после снятия их со станка по мере разгрузки заготовок при снятии прихватов наблюдается их коробление. Очевидно, что причинами этого являются высокие контактные температуры, значения которых приближаются к температуре плавления алюминиевых сплавов значительно ближе, чем при обработке заготовок из труднообрабатываемых сплавов. Вследствие возникающих термических и структурно-фазовых технологических остаточных напряжений (ТОН) и их последующей временной релаксации, детали теряют свою форму. Это приводит к необходимости выполнения многочисленных межоперационных правок, многократным термическим операциям или к дополнительной дробеструйной обработке. Все это вызывает существенное увеличение трудоемкости и себестоимости изготовления таких деталей на многоосевых обрабатывающих центрах несмотря на быстроедействие современных управляющих программ (УП) и ускоренные методы их подготовки (в том числе с использованием нейронных сетей). Учитывая, что основными причинами являются возникающие ТОН, при разработке УП необходимо предусматривать наличие мер, предотвращающие их возникно-

вание и уменьшающие их величину. К этим мерам относятся как рациональный выбор элементов режима резания, режущего инструмента и его траектории при съеме припуска, так и рациональный выбор техники подачи и состава СОЖ и использование других средств, снижающих трение, а значит и контактные температуры и силы в зоне резания. К последним относится введение в зону формообразования тонкостенных нежестких деталей энергии ультразвукового (УЗ) поля [1, 2]. Концерн DMG MORI совместно с фирмой SAUER для обработки заготовок из труднообрабатываемых (в том числе композиционных) материалов, титановых и алюминиевых сплавов в последние годы выпустил линейку продуктов ULTRASONIC 2-го поколения, включающую в себя 18 обрабатывающих центров. В этих станках УЗ-колебания накладываются на режущий инструмент, что до 30–40 % уменьшает силы резания, а следовательно, и контактные температуры в зоне резания. Такие станки находят широкое применение в аэрокосмической и автомобильной промышленности Северной Америки и Западной Европы [3]. Между тем УЗ-колебания в зону резания можно вводить не только через инструмент, но и через обрабатываемую заготовку. Это позволяет, с использованием несложной специальной оснастки, получить аналогичные результаты при механической обработке заготовок на технологическом оборудовании, не оснащенном УЗ-устройствами. При выполнении исследований в данной работе использовали устройство, представленное на рис. 1.

На первом этапе лабораторных исследований оценивали эффективность фрезерования с наложением УЗ-колебаний (частота колебаний 22 кГц, амплитуда – 6 мкм) заготовок из де-

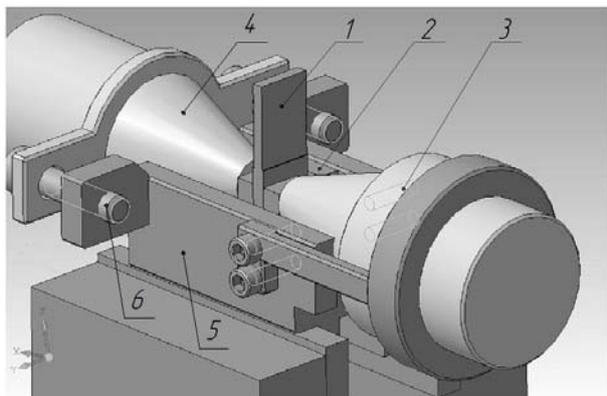


Рис. 1. Устройство для наложения УЗ-колебаний на заготовку на базе машинных тисков:
1 – заготовка; 2 – упор; 3 – отражатель; 4 – излучатель;
5 – кронштейн; 6 – винт

формируемых алюминиевых сплавов АК6 и Д16, широко используемых при изготовлении деталей и узлов летательных аппаратов и отличающихся друг от друга легирующими добавками и прочностными характеристиками. В качестве критериев для оценки эффективности использовали технологические остаточные напряжения и изменения фазового состава в поверхностном слое фрезеруемой концевой фрезой НАМ 458 ($d=8$ мм, число зубьев – 6, материал фрезы – твердый сплав без покрытия VHM) нежесткой заготовки. Остаточные напряжения оценивали неразрушающим методом с использованием измерительно-вычислительного комплекса СИТОН-АРМ.

Фазовый состав материала ПС обработанных образцов контролировали с помощью рентгеновского измерительного комплекса Рикор-7.

Заготовки фрезеровали на широкоуниверсальном фрезерном станке Optimum MT100 на следующем режиме: скорость резания – 40 м/мин; скорость подачи – 402 мм/мин; ширина фрезерования – 10 мм; глубина резания – 1 мм.

Некоторые результаты исследований представлены рис. 2 и 3.

Как показывает анализ результатов (рис. 2), введение в зону обработки нежестких и тонкостенных алюминиевых заготовок энергии УЗ-поля позволяет существенно уменьшить величину остаточных напряжений и изменить содержание фазового соотношения фракций Cu_2FeAl_7 и CuMgAl_2 . Изменение этих фаз свидетельствует о структурно-фазовых превращениях в поверхностном слое тонкостенных алюминиевых заготовок, являющихся, по-видимому, основной причиной возникновения остаточных напряжений. Фаза CuMgAl_2 является упрочняю-

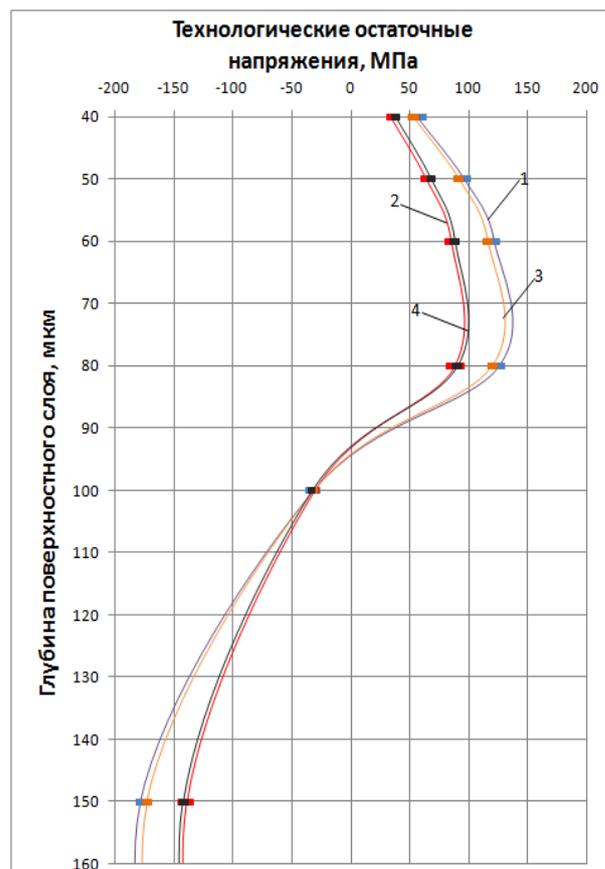


Рис. 2. Изменение ТОН при фрезеровании нежестких алюминиевых заготовок. Режим обработки: $V = 40$ м/мин, $t = 1$ мм, $S = 402$ мм/мин; 1 – сплав АК6, обработка без наложения УЗК; 2 – сплав АК6 обработка с наложением УЗК; 3 – сплав Д16, обработка без наложения УЗК; 4 – сплав Д16, обработка с наложением УЗК

щей. Увеличение этой фазы свидетельствует об изменении отношения количества магния к количеству кремния и увеличении прочностных характеристик поверхностного слоя. Фаза Cu_2FeAl_7 является одной из фаз, которые определяют содержание меди в сплаве. Медь, вступившая в реакцию с железом, ведет к разупрочнению поверхностного слоя. Оценка степени влияния этих фаз позволит определить какие явления (упрочнение или разупрочнение) происходят в поверхностном слое тонкостенных нежестких алюминиевых заготовок.

Из результатов исследований (рис. 3) следует, что наложение УЗ-колебаний на заготовку приводит на образцах из обоих алюминиевых сплавов к увеличению фазовой составляющей CuMgAl_2 и уменьшению – Cu_2FeAl_7 . Дальнейшие исследования выявили зависимость изменений ФС при фрезеровании нежестких алюминиевых заготовок от элементов режима резания: с увеличением глубины резания при малых значениях скорости подачи (230 мм/мин)

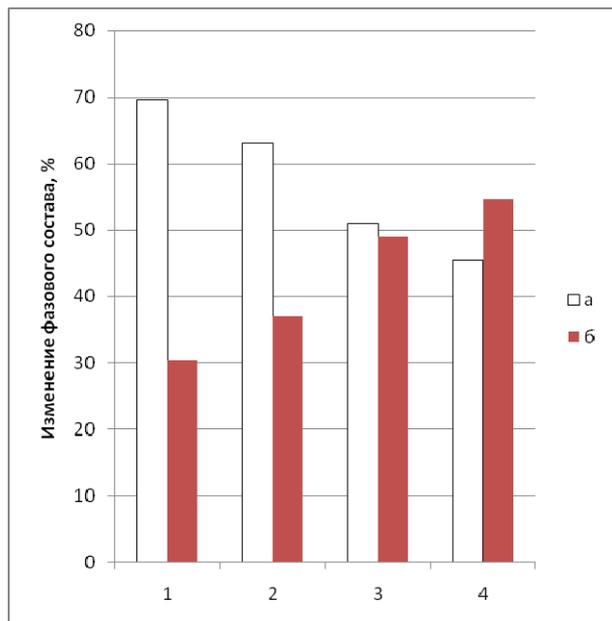


Рис. 3. Изменение ФС при фрезеровании жестких алюминиевых заготовок. Режим обработки:

$V = 40$ м/мин, $t = 1$ мм, $S = 402$ мм/мин; а – Cu_2FeAl_7 ; б – CuMgAl_2 ; 1 – сплав АК6, обработка без наложения УЗК; 2 – сплав АК6, обработка с наложением УЗК; 3 – сплав Д16, обработка без наложения УЗК; 4 – сплав Д16, обработка с наложением УЗК

увеличивается содержание фазы CuMgAl_2 и уменьшается содержание фазы Cu_2FeAl_7 . С увеличением почти вдвое скорости подачи (402 мм/мин) эти соотношения меняются на противоположные. Очевидно эти изменения связаны с соответствующими изменениями контактных температур в зоне контакта инструмента с заготовкой при изменениях элементах режима обработки. Однако несомненно, что и силовой фактор вносит существенный вклад в рассматриваемые процессы. Это объясняется тем, что при уменьшении минутной подачи, а следовательно, и подачи на зуб, увеличивается трение по задней поверхности инструмента. Поэтому возможно возникновение существенно больших отжатий в контактной зоне при условии, если величина снимаемого припуска на зуб приблизится к радиусу при вершине зуба (гарантированное увеличение наклепа). При этом, каждый участок пути инструмента величиной равной подаче на зуб, разогревается уже дважды (т. к. по нему проходят два зуба вместо одного), тем самым увеличивается время нагрева материала заготовки. Это может оказать влияние в структурно-фазовые превращения поверхностного слоя изготавливаемой детали.

На втором этапе исследований многофакторными экспериментами оценивали влияние элементов режима резания на величину остаточных напряжений на глубинах поверхностного слоя в 80 мкм (область растягивающих ТОН) и 150 мкм (область сжимающих ТОН).

Полученные уравнения регрессии в кодированных переменных имеют вид:

$$y_{80} = 126,5 - 8,75x_1 + 4x_2 + 6x_3;$$

$$y_{150} = 177,88 + 8,875x_1 - 4,5x_2 - 6,5x_3,$$

где X_1 , X_2 , X_3 – кодированные значения, соответственно, скорости резания, скорости подачи и глубины резания.

Анализ данных уравнений регрессии позволяет оценить степень влияния каждого из элементов режима резания на величину ТОН в тонкостенных жестких алюминиевых заготовках. Наибольшее влияние (наибольшая величина коэффициента регрессии) оказывает скорость резания. Наименьшее – скорость подачи. Таким образом, увеличение скорости резания (при постоянных значениях скорости минутной подачи) позволяет уменьшить величину ТОН. Однако на практике, как правило, с увеличением скорости резания (числа оборотов шпинделя) сохраняют постоянными значения подачи на оборот. Это приводит к увеличению ТОН (меньшее значение коэффициента регрессии при X_2).

Таким образом, выполненные исследования позволяют оценить влияние на процесс формирования ТОН не только ультразвуковых колебаний, но и элементов режима резания. Все это крайне необходимо учитывать при разработке управляющих программ для современных станков с ЧПУ и обрабатывающих центров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киселев, Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля / Е. С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
2. Киселев, Е. С. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. – М.: РАН, 2008. – 250 с.
3. www.dmgmori.com. ULTRASONIC 20 linear. Гибкая интеграция технологии в станки DMG MORI. ULTRASONIC mobile BLOCK. ULTRASONIC 2-го поколения

УДК 621.9.015

*Д. В. Крайнев¹, Ж.С. Тихонова², А. А. Кожевникова³, Д. С. Дубовова⁴***ОПЕРАТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЧПУ****Волгоградский государственный технический университет**E-mail: krainevdv@mail.ru¹, tihonova-ganna@rambler.ru²,
alla-aka-78@ya.ru³, dina.arttz@yandex.ru⁴

Рассмотрены основные направления повышения эффективности лезвийной обработки. Представлены основные способы диагностики процесса резания, где в качестве перспективных способов предлагается использовать сигнал естественной термопары термоЭДС, метод виброакустической диагностики. В статье приведены результаты компьютерного моделирования исследования теплофизических процессов в зоне резания.

Ключевые слова: пластическое деформирование, теплопроводность, поверхностный слой, лезвийная обработка, компьютерное моделирование, твердотельная модель, оперативная диагностика, математическая модель.

*D. V. Krainev¹, Zh. S. Tikhonova², A. A. Kozhevnikova³, D. S. Dubovova⁴***ON-LINE DIAGNOSTICS AS A MEANS OF IMPROVING
THE RELIABILITY OF CNC SYSTEMS****Volgograd State Technical University**

The basic directions of increase of efficiency of blade processing. Presents the main methods of diagnosis of the cutting process, where the promising methods proposed to use the natural signal of the thermocouple thermoelectric power, the method of vibroacoustic diagnostics torque measurement. The article presents the results of computer simulation studies of thermophysical processes in the cutting zone.

Keywords: plastic deformation, thermal conductivity, surface layer, cutting edge processing, computer modeling, solid model, rapid diagnostics, mathematical model.

Лезвийная обработка металлов по-прежнему является доминирующим методом формообразования деталей машин. Совершенствование механизмов и машин, ужесточение требований к эксплуатационным характеристикам поверхностей, а также применение новых материалов определяет необходимость повышения эффективности процессов резания.

Существенные сложности, в данном случае, представляют выбор, назначение и поддержание оптимальных режимов обработки, что затрудняется значительными колебанием свойств как обрабатываемого материала, так и режущего инструмента. Все это ведет к отклонению от заданных эксплуатационных характеристик поверхностей деталей машин, а значит, снижает производительность и эффективность обработки [1].

Кроме того, следует отметить, что в настоящее время при разработке технологических операций недостаточное внимание уделяется всем характеристикам обрабатываемой поверхности. В процессе механической обработки учитываются, по большей части, геометриче-

ские параметры, а также параметры шероховатости поверхности.

Характеристики же поверхностного слоя обрабатываемой заготовки оказывают существенное влияние как на закономерности процесса резания, так и на его результаты, что подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований.

Так, исходная поверхность заготовки из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т была подвергнута пластической деформации (накатыванию) с различными усилиями.

Измерения теплопроводности поверхностного слоя обрабатываемой детали на приборе КИЦ-02Ц позволили установить, что такое воздействие привело к изменению теплопроводности продеформированных слоев. А значит можно говорить об ином перераспределении температурных полей в процессе резания по сравнению с исходными условиями.

Кроме того, проведенные рентгеноструктурные исследования позволили установить изменения в структуре вещества, текстуре, а также величине внутренних напряжений (табл. 1).

Таблица 1

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов поверхностного слоя стали аустенитного класса 12X18H10T, подвергнутого пластическому деформированию

Образец	Физическое уширение рентгеновских линий $\beta \cdot 10^{-3}$, рад		Размер блока мозаики Д, А	Относительная деформация решетки $\langle \epsilon \rangle \cdot 10^{-3}$	Уровень микронапряжений σ_2 , МПа
I (участок)	4,9	12,3	400	0,0028	560
II (участок)	5,26	13,9	358	0,0031	620
III (участок)	9,9	15,4	248	0,0035	694

В работах [2, 3] было высказано предположение о локализации деформационных и тепловых полей упрочненным поверхностным слоем, а также о снижении в результате такого воздействия сил резания и интенсивности тепловыделения. Все это способствует стабилизации, облегчению процесса резания, снижению износа режущего инструмента и улучшению

микргеометрии обработанной поверхности. Гипотеза подтверждается экспериментальными данными. Обработка всех участков выполнялась при неизменных режимах резания. При этом заметно, что наибольшая глубина деформирования обеспечила наилучшие показатели по величине Ra (табл. 2).

Таблица 2

Влияние деформации поверхностного слоя на высоту микронеровностей Ra обработанной поверхности при точении стали аустенитного класса 12X18H10T

V=120 м/мин			
Подача (мм/об)	I (участок) – исходный слой	II (участок) – глубина деформации 0,51 мм	III (участок) – глубина деформации 0,92 мм
0,256	Среднее арифметическое отклонение профиля (Ra, мкм)		
	0,653	0,336	0,298

Сделанные заключения подтверждаются результатами компьютерного моделирования. Для исследования работы процесса резания, а также определения оптимальных режимов, создана твердотельная модель (рис. 1) в гео-

метрической САПР SolidWorks, импортированная в систему конечно-элементного моделирования DEFORM-3D. При создании модели были заданы параметры:

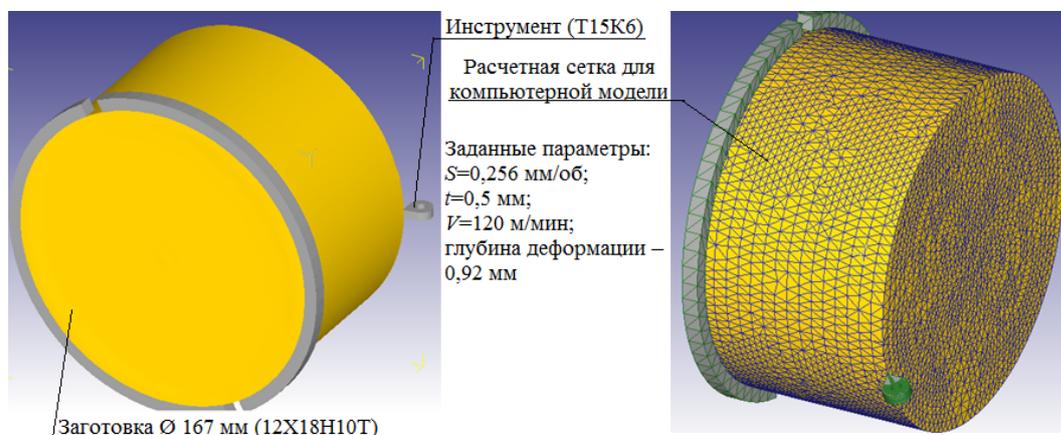


Рис. 1. Создание твердотельной компьютерной модели для исследования теплофизических процессов в зоне резания

На рис. 2 представлены эпюры распределения температурных полей и внутренних напряжений в процессе резания. При этом можно

заметить, что уровень температур и напряжений при обработке упрочненного слоя существенно ниже.

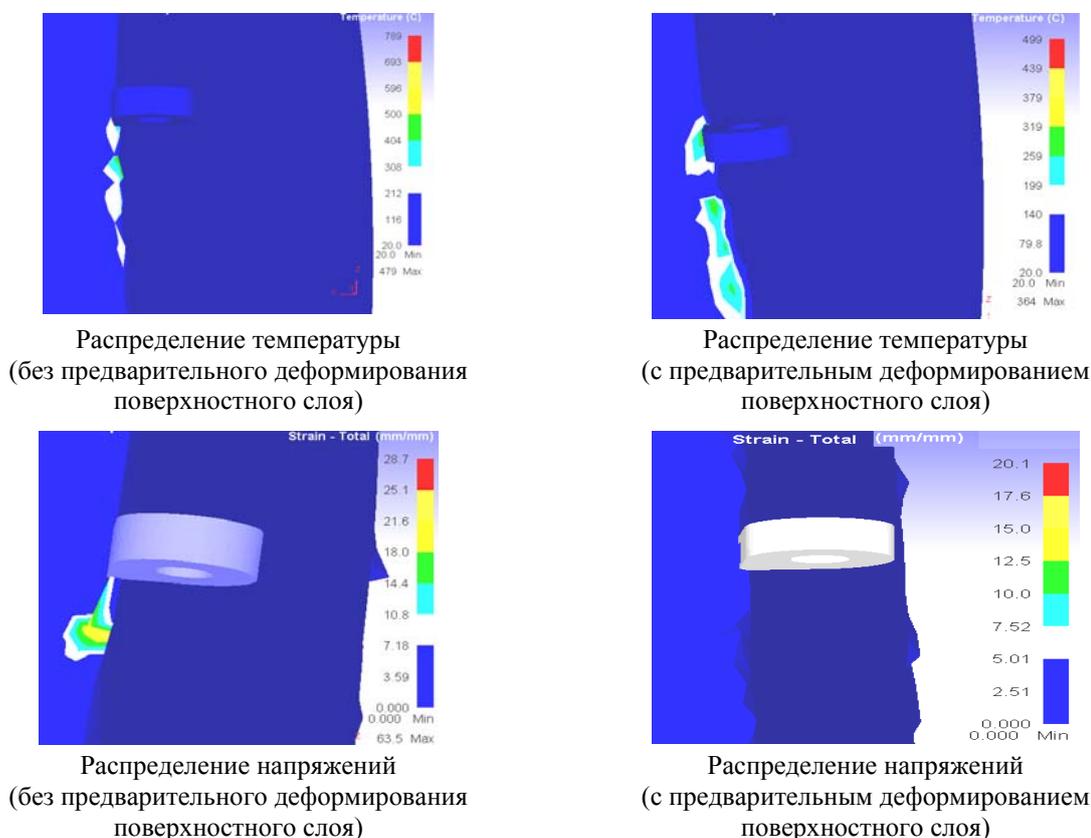


Рис. 2. Эпюры распределения температуры и напряжений в зоне резания в процессе лезвийной обработки

Таким образом, на основе проведенного анализа технической литературы, справочно-нормативных источников и проведенных экспериментальных исследований, установлено, что причиной значительного несовпадения расчетных и фактических основных параметров процесса лезвийной обработки металла при проектировании технологического процесса является одно общее обстоятельство: отсутствие учета влияния состояния поверхностного слоя на качество процесса резания; отсутствие в расчетных математических моделях оперативного учета теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. В связи с этим необходима модернизация и уточнение существующих математических моделей расчета составляющих силы резания, скорости резания и модели расчета высоты микронеровностей, а также введение в их

структуру оперативного диагностических параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
2. The reliability improvement of CNC machining centers due to on-line diagnostics of the cutting process [Электронный ресурс] / Д.В. Крайнев, А.С. Сергеев, Ж.С. Тихонова, К.Ч. Нго // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (St. Petersburg, Russia, 24-26 May 2017) : Conference Proceeding / ed. by S. Shaposhnikov. – [Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)], 2017. – P. 627-629. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970670
3. Крайнев, Д. В. Повышение эффективности точения деформируемых сталей и сплавов с опережающим пластическим деформированием : монография / Д. В. Крайнев, Ю. Н. Поляничков, А. А. Бондарев; ВолГТУ. – Волгоград, 2015. – 160 с.

УДК 621.9.025.01

*В. В. Мартынов¹, Е. С. Плешакова²***КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ МОДИФИЦИРОВАННОГО
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА*****Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина**E-mail: v_martynov@mail.ru¹, pleshakova_es@mail.ru²

Представлены результаты классификации дефектов металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы, выполненной с использованием методов иерархического кластерного анализа и обработки категоризированных данных. Сопоставление дефектов внутри полученных классификационных групп позволило назвать их микролокальные, микроповерхностные и макродефекты.

Ключевые слова: модифицированный режущий инструмент, дефекты, классификация, кластерный анализ, таблица сопряженности признаков.

*V. V. Martynov¹, E. S. Pleshakova²***CLASSIFICATION OF DEFECTS OF MODIFIED CUTTING TOOLS****Yuri Gagarin State Technical University of Saratov**

The results of the classification of defects of a metal-cutting tool modified by the action of a low-temperature plasma, performed using methods of hierarchical cluster analysis and processing of categorized data are presented. The comparison of defects within the classification groups obtained made it possible to name their microlocal, microsurface and macrodefects.

Keywords: modified cutting tool, defects, classification, Cluster analysis, contingency table of characteristics.

Введение

Для современного производства характерно широкое применение легированных сталей и сплавов, а также других материалов с высокими прочностными характеристиками. При контакте с инструментом данные материалы вызывают значительные знакопеременные нагрузки на его режущих кромках и высокую температурную напряженность в зоне резания. Это провоцирует интенсивное изнашивание инструмента, значительно сокращающее период его стойкости.

Проблема повышения стойкости решается в рамках различных направлений. Одно из них связано с упрочнением рабочей части инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда [1], позволяющим формировать наноструктуры в его поверхностном слое и повышать на этой основе стойкость в 1,5–2,5 раза при незначительных временных и энергетических затратах.

Материалы стойкостных испытаний в условиях реального производства показали [1, 2], что наиболее характерным проявлением изменений состояния рабочей части модифицированного инструмента является постепенное образование дефектов, снижающих микротвердость модифицированного слоя. На принципах

альном уровне их можно рассматривать как традиционные и новые, имеющие непосредственное отношение к процессу модификации [3]. Результатом становятся локальные разрушения режущей кромки и, как следствие, ухудшение не только параметров качества поверхности изготовленных деталей (при выкрашиваниях), но и потеря инструментом работоспособности (при сколах).

Традиционные дефекты отличаются по внешнему виду от аналогичных дефектов обычного инструмента. Отличие связано с видом изнашивания, которое у модифицированного инструмента имеет характер механического истирания без обнажения исходной матрицы и образования сетки трещин. Поверхности являются притертыми, края поверхностей не имеют острых кромок и выступов.

Образование новых дефектов связано с отличным от традиционного поведением модифицированного слоя при воздействии температурно-силовых нагрузок, и проявляется в перемещении в различных направлениях его микробъемов в зоне контактного взаимодействия с отделяемым материалом.

В связи с этим являются актуальными исследования, направленные на дальнейшее повышение эксплуатационной надежности модифици-

рованного инструмента, на основе классификации дефектов и последующего использования ее результатов для изучения процесса эволюции состояния инструмента к своему конечному виду.

Основная часть

По своей сути, задача классификация заключается в определении взаимных связей между дефектами с последующим их разделением на группы по уровню сходства (различия) для получения оптимальной в некотором смысле структуры. Наилучшим образом для решения подобных задач подходит аппарат иерархического кластерного анализа [4], поскольку не требует непосредственного участия человека в переборе множества кластеров-претендентов, т. е. является объективным.

Основой для проведения кластерного анализа является матрица сходства (различия), которая определяет уровень сходства между парами дефектов и вычисляется автоматически по таблице, содержащей необходимые исходные данные. Они представляют собой классификационные признаки дефектов, отображающие их наиболее значимые характеристики: вид и размер. При этом, поскольку и диапазоны значений характеристик, и сами значения варьируются в широких пределах (от единиц до сотен мкм), т. е. различаются между собой на порядок и более, задачу классификации целесообразно решать на принципиальном (качественном) уровне. В этом случае исходная таблица будет состоять из единиц и нулей (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для решения задачи классификации

№ п/п	Объект (дефект)	Классификационные признаки				
		Размер	Вид			
			1 – видимый полностью, 0 – видимый частично (невидимый)	1 – объемный, 0 – плоский	1 – линейный, 0 – точечный	Объемный
1 – над и на поверхности, 0 – в и под поверхностью	1 – сплошной, 0 – дискретный					
1	Вкрапление продуктов износа в поверхность	0	0	1	0	0
2	Выкрашивание	1	1	1	0	0
3	Вырыв зерен	0	0	1	0	0
4	Деформирование матрицы	0	0	1	0	0
5	Истирание зерен матрицы	0	0	1	0	0
6	Истирание покрытия	0	0	1	0	0
7	Козырек	0	1	1	1	1
8	Локальное разрушение (скол)	1	1	1	0	1
9	Лунка износа	1	1	1	0	1
10	Микротрещина	0	0	1	0	0
11	Налипание обрабатываемого материала	0	1	1	1	1
12	Наплыв	0	1	1	1	1
13	Несплошности	0	1	1	1	1
14	Отслаивание покрытия	1	1	1	0	1
15	Пропахивание (микротрещины)	0	1	1	1	1
16	Проточина	1	1	1	0	1
17	Точечные (розетки)	1	1	1	0	0
18	Трещина (сетка трещин)	0	1	1	1	1
19	Фаска износа	1	1	1	0	1

Для проведения процедуры классификации использовался пакет программ прикладного статистического анализа STATISTICA 6.0, который содержит наиболее часто встречающиеся в научной литературе методы пересчета матрицы сходства (различия) после объединения (или разделения) двух очередных объектов в кластер [5].

Результаты классификации показали (рис. 1), что с точки зрения чувствительности к структуре исходных данных наилучшие результаты дает центроидный метод, использующий для пересчета матрицы расстояний [6], в качестве которых берутся расстояния между центрами тяжести двух кластеров.

Конечным результатом решения задачи классификации является определение числа классификационных групп на построенной дендро-

грамме, удовлетворяющих некоторому критерию оптимальности, который необходимо отыскать. Если рассматривать кластеризацию как процесс самоорганизации данных с целью снятия исходной неопределенности с них, то в соответствии с принципом самоорганизации [7] критерий по мере формирования групп вначале уменьшается, достигая минимума, а затем начинает возрастать. Это происходит потому, что по мере формирования групп неопределенность в данных постепенно снижается, и при каком-то их числе становится равной нулю, т. е. снимается полностью. Соответственно дальнейшее группирование просто теряет смысл, поскольку не позволяет ничего доопределить. В связи с этим минимуму критерия и будет соответствовать сформированное на каком-то из уровней число классификационных групп.

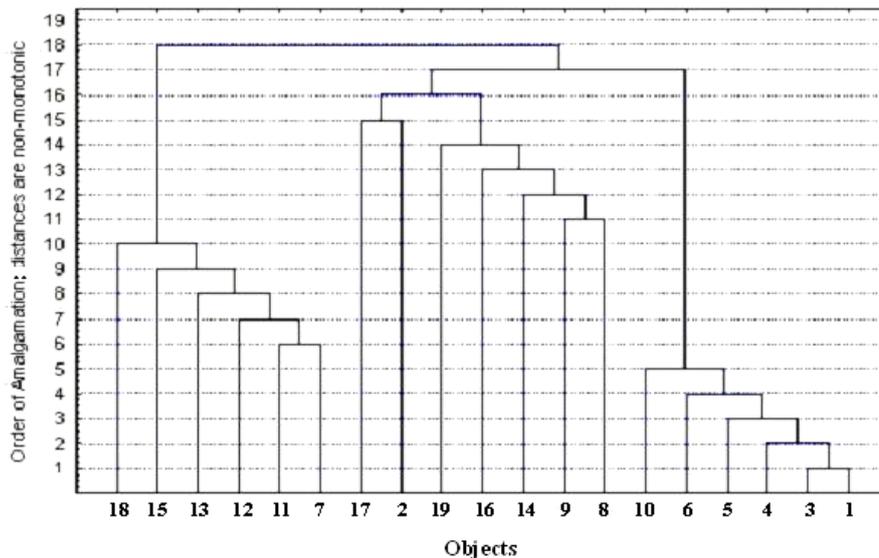


Рис. 1. Дендрограмма (дерево) сходства дефектов модифицированного инструмента

Выполнить процедуру оптимизации можно различными методами, однако с учетом того, что классификация выполнялась на качественных данных, целесообразно воспользоваться методом, основанным на представлении данных в виде таблиц сопряженности признаков (ТСП) [8]. Тогда процедура сведется к оцениванию степени уменьшения связи (или росту степени различия) между признаками по результатам вычисления одной из известных мер связи, которая и будет количественно отображать степень снятия исходной неопределенности с данных.

В ТСП данные представляются в виде двух признаков (т. е. категоризируются) – *A* и *B*, ка-

ждый из которых имеет несколько уровней определения, отображаемых некоторым числом n_{ij} . В качестве признака *A* примем общее число дефектов, оставшихся на тех уровнях, где в процессе кластеризации классификационные группы формировались в наиболее явном виде (рис. 1); число дефектов в каждой группе будем считать одним обобщенным дефектом. В качестве признака *B* примем общее число дефектов на уровне *A*, попавших в сформированные группы (табл. 2).

Сравнивать между собой будем соседние уровни табл. 2, что даст возможность проследить динамику изменения критерия оптимизации. Таким образом, на каждом этапе сравне-

ния исходная ТСП будет трансформироваться в ТСП, имеющую размерность 2×2 (табл. 3).

Таблица 2

Исходная таблица сопряженности признаков

Уровень	Общее число оставшихся дефектов (признак A)	Общее число дефектов в сформированных группах (признак B)
5	14	6
10	9	12
14	5	17
15	4	19
16	3	19
17	2	19
18	1	19

Таблица 3

Таблица сопряженности признаков 2×2

Признак A	Признак B		Всего по строкам
	1	2	
1	n_{11}	n_{12}	$n_{11} + n_{12}$
2	n_{21}	n_{22}	$n_{21} + n_{22}$
Всего по столбцам	$n_{11} + n_{21}$	$n_{12} + n_{22}$	Σn_{ij}

В литературе по анализу ТСП имеется большое число мер связи, которые используются как самостоятельно, так и в различных моделях конструирования признаков. Отличие заключается лишь в схеме их вычисления, дающей различную чувствительность, т. е. степень, с которой та или иная мера будет реагировать на изменение связи. Поэтому по аналогии с процедурой кластерного анализа были вычислены различные меры, такие как коэффициенты Чупрова и коллигации Юла, коэффициент сопряженности Пирсона, коэффициенты связи Юла и Крамера [8].

В качестве примера, отображающего полученные результаты наиболее явно, на рис. 2 представлены вариации коэффициента коллигации Юла, которые показывают, что оптимальной является кластеризация дефектов до уровня 16, дающая три классификационные группы. Сопоставление дефектов внутри этих групп показало, что с учетом использованных для классификации признаков, а также комплекса дополнительных параметров, уточняющих вид, расположение и количество дефектов, группам можно присвоить названия микролокальные, микроповерхностные и макродефекты (табл. 4).

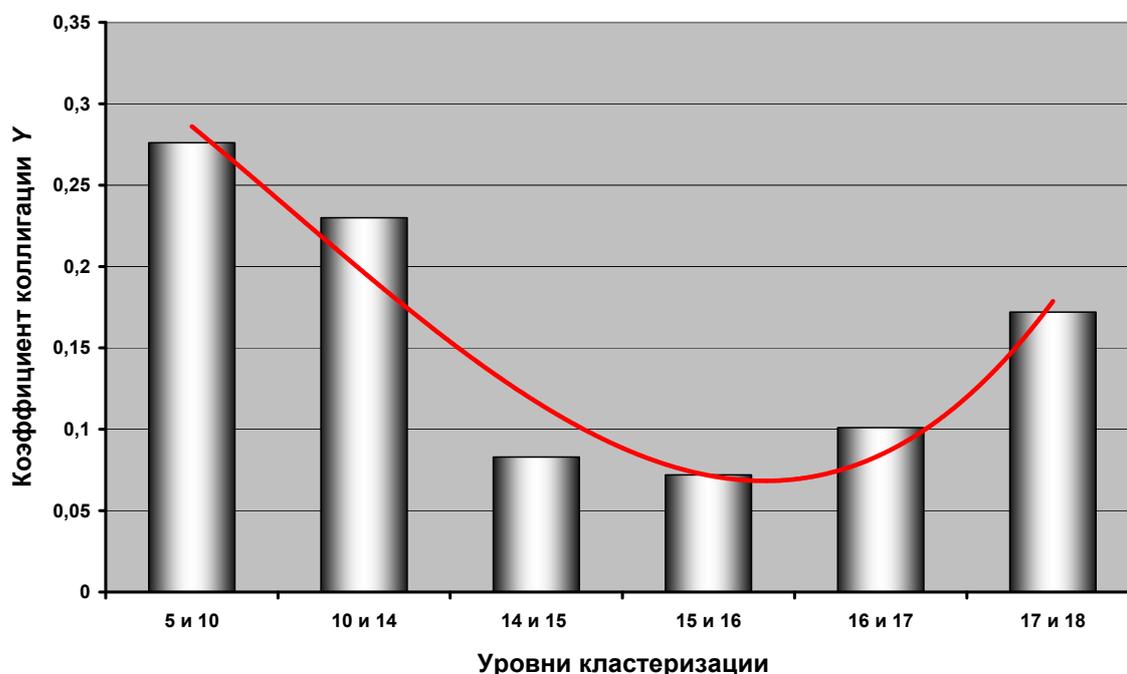


Рис. 2. Межуровневые вариации коэффициента коллигации Юла Y и кривая его тренда

Таблица 4

Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента

№	Микролокальные	Микроповерхностные	Макро
1	Истирание покрытия*	Козырек*	Проточина
2	Микротрещина	Наплыв*	Лунка износа
3	Истирание зерен матрицы	Несплошности	Фаска износа
4	Вырыв зерен	Трещины	Точечные (розетка)*
5	Деформирование матрицы	Пропахивание (микропроточкины)	Выкрашивание
6	Вкрапление продуктов износа в поверхность	Налипание обрабатываемого материала на продукты износа	Отслаивание покрытия
7			Локальные разрушения

* – результат движения микрообъемов

Заключение

Представленные в статье результаты могут быть положены в основу разработки способа оценивания качества процесса эксплуатации инструмента с целью поиска условий (как на этапе модификации, так и перед началом эксплуатации), в которых эти свойства будут проявляться наиболее полно в направлении формирования устойчивой обтекаемой формы, прежде всего режущей кромки, обеспечивающей снижение действия сил трения и, как следствие, тепловыделения при резании. Тогда даже при образовании дефектов структура модифицированного поверхностного слоя будет оставаться устойчивой, препятствуя обнажению матрицы и способствуя повышению не только износостойкости, но и отказоустойчивости (предотвращению сколов и поломок) инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бржозовский, Б. М. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, Е. П. Зинина. – Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 176 с.

2. Бржозовский, Б. М. Прогрессивные направления повышения эффективности использования металлорежущего инструмента / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, О. В. Захаров [и др.]. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 256 с.

3. Зинина, Е. П. Классификация дефектов режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Е. П. Зинина, В. В. Мартынов, Е. С. Плешакова // Технологическое обеспечение машиностроительных производств : сб. докл. I междунар. заочн. науч.-техн. конф. – Челябинск: ЮУрГУ (НИУ), 2013. – С. 292–297.

4. Жамбю, М. Иерархический кластер-анализ и соответствия : пер. с фр. / М. Жамбю. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 342 с.

5. Классификация и кластер / под ред. Дж. Вэн Райзна. – М. : Мир, 1980. – 390 с.

6. Sneath P.H.A. Numerical taxonomy: The principles and practices of numerical classification / P.H.A. Sneath, R.R. Sokal. – San-Francisco: Freeman, 1973. – 573 p.

7. Ивахненко, А. Г. Моделирование сложных систем (информационный подход) / А. Г. Ивахненко. – Киев : Вища школа, 1987. – 63 с.

8. Каримов, Р. Н. Обработка экспериментальной информации. Ч. 1. Разведочный анализ. Анализ качественных данных : учеб. пособие / Р. Н. Каримов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. – 112 с.

УДК 621.9.048

Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, Д. С. Фатюхин

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

E-mail: mitriy2@yandex.ru

В статье представлены результаты исследований по влиянию частоты ультразвуковой упрочняющей обработки связанным индентором на шероховатость и микротвердость обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование, упрочнение, поверхностный слой, шероховатость, микротвердость.

R. I. Nigmatzyanov, S. K. Sundukov, D. S. Fatyukhin

THE INFLUENCE OF FREQUENCY FLUCTUATIONS ON THE EFFICIENCY OF ULTRASONIC HARDENING

Moscow Automobile and Road Construction University (MADI)

The article presents the results of studies on the influence of frequency of ultrasonic strengthening processing associated with the indenter on the roughness and microhardness of the treated surface.

Keywords: ultrasonic surface-plastic deformation, hardening, surface layer, roughness, microhardness.

Среди многочисленных способов поверхностного пластического деформирования (ППД) широкое применение получили ультразвуковые методы ППД. При ППД ультразвуковым инструментом существуют два принципиально разных метода:

Ультразвуковое ППД целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе производится виброударная обработка инструментом со свободным деформирующим элементом, в результате в приповерхностном слое создаются сжимающие напряжения и повышается твердость. При этом появление на поверхности следов деформации от удара деформирующего элемента приводит к нарушению геометрических свойств поверхности обработки, в первую очередь, это значительное повышение шероховатости. Поэтому предлагается проводить дополнительную (финишную) обработку ультразвуковым выглаживанием со связанным индентором.

Исследования рассмотренные далее посвящены ультразвуковому выглаживанию.

Несмотря на достаточно высокую степень изученности процесса, в литературных источниках практически отсутствуют данные о влиянии частоты f колебаний, на эффективность ППД.

Это объясняется тем, что для проведения экспериментов на другой частоте требуется использование ультразвукового инструмента нестандартного типоразмера, рассчитанного на другие резонансные частоты.

В данной работе использовались разработанные при участии МАДИ колебательные системы с рабочими частотами $f=27$ кГц, $f=36$ кГц и $f=44$ кГц с оптимальными соотношениями продольных и поперечных размеров магнитострикционного преобразователя: $kl_2=1,66$ и $S_2/S_1=0,6$ [1].

Эксперимент проводился следующим образом: обрабатываемая деталь (вал) закреплялась в шпинделе токарного станка, ультразвуковой инструмент закреплялся в резцедержателе суппорта станка, перпендикулярно оси вращения образца. Обработка детали осуществлялась аналогично операции точения по методу следов. Питание инструмента производилось от ульт-

развукового генератора. С помощью специального устройства инструмент прижимался к обрабатываемой поверхности.

В качестве образцов использовались валы диаметром 50 мм из стали 45. Начальная шероховатость составляла $Ra=5,1$ мкм. Постоянными параметрами обработки являлись амплитуда колебаний $\xi_m=6$ мкм и подача $S=0,1$ мм/об (в соответствии с [2]).

Эксперименты проводились с тремя колебательными системами на частотах $f=27$ кГц, $f=36$ кГц и $f=44$ кГц при изменении усилия прижима от 50 Н до 200 Н. Результаты экспериментов приведены на графике (рис. 1).

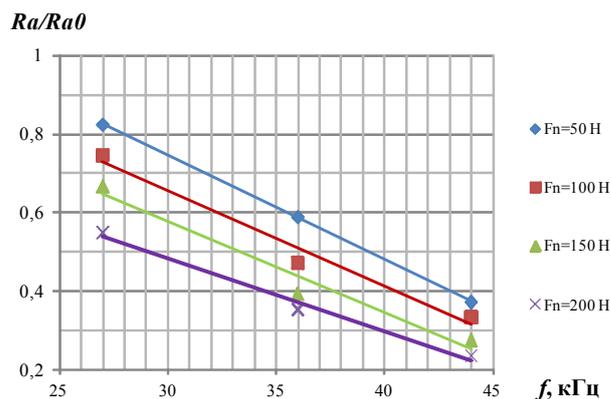


Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости Ra от частоты ультразвуковых колебаний при различном усилии прижима

Шероховатость обработанной поверхности монотонно уменьшается с увеличением частоты Ультразвуковых колебаний. При этом снижение носит практически линейный характер и, в зависимости от усилия прижима инструмента, составляет от 20 до 80 %. Это объясняется увеличением интенсивности обработки за счет увеличения количества ударов за один оборот обрабатываемой детали, т. е. происходит деформация большего количества микровыступов. Очевидно, что при снижении параметра Ra снижаются и другие высотные параметры шероховатости (Rz , R_{max}). С повышением усилия прижима, при постоянстве остальных параметров обработки, шероховатость снижается за

счет повышения мощности единичного удара, что усиливает деформацию поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Таким образом, увеличение частоты колебаний приводит к повышению геометрических свойств обрабатываемой поверхности.

Для исследования влияния частоты колебаний на физико-механические характеристики объекта обработки производились измерения микротвердости.

Обработка проводилась при постоянной амплитуде колебаний $\xi_m=6$ мкм, силе прижима $F_N=100$ Н и подаче $S=0,1$ мм/об. Зависимость микротвердости от глубины определялась с помощью микротвердомера ПМТ-3 при послойном травлении образцов. Путем аппроксимации полиномом 5-й степени получена зависимость микротвердости Hv от глубины – h . Аппроксимация и построение графиков выполнено с помощью соответствующих функций системы MATLAB. Результаты представлены на рис. 2.

Микротвердость образца на поверхности до обработки составила $Hv=275$.

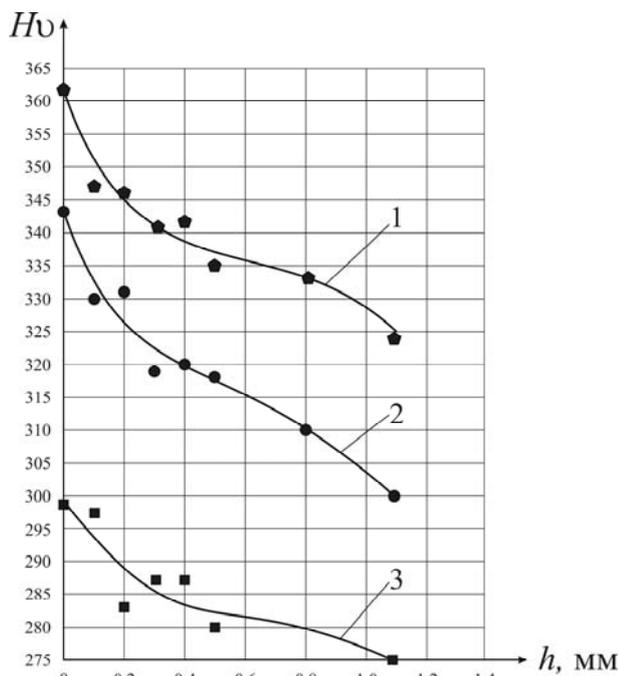


Рис. 2. Зависимость микротвердости от глубины при различных частотах колебаний:
1 – 27 кГц; 2 – 36 кГц; 3 – 44 кГц

На всех режимах упрочняющей обработки на поверхности изделия создается пластически

деформированный слой глубиной до 1,5 мм, который характеризуется увеличением микротвердости, которая максимальна на поверхности и постепенно уменьшается по мере увеличения глубины. При этом наибольший эффект достигается на глубинах от 0 до 200–400 мкм. По сравнению с шероховатостью в данном случае имеет место обратная зависимость изменения твердости при увеличении частоты. Так при частоте $f=27$ кГц микротвердость на поверхности увеличилась в 1,32 раза, при $f=36$ кГц в 1,25, а при $f=44$ кГц всего в 1,08 раза. Это можно объяснить увеличением времени контакта при единичном ударе с уменьшением частоты, что приводит к росту импульса силы, передаваемой от индентора ультразвукового инструмента обрабатываемой поверхности, в результате чего ускоряется процесс пластической деформации.

Выводы

Ультразвуковое ППД – сложный процесс, эффективность которого определяется совокупностью параметров обработки: амплитуды, частоты колебаний, усилия прижима инструмента и скоростью обработки. При этом взаимодействие данных параметров по различным критериям может оказываться прямо противоположным. Так в результате проведенных исследований установлено, что повышение частоты колебаний ультразвукового упрочняющего инструмента приводит к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности, но при этом пластическая деформация поверхностного слоя минимальна.

Результаты данных и проведенных ранее экспериментов позволяют обеспечить выбор оптимального режима обработки в зависимости от требований к состоянию поверхностного слоя изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцев, В. Ф. Об оптимизации магнитоэлектрических преобразователей технологического назначения / В. Ф. Казанцев, Е. Ш. Статников // Ультразвуковые колебательные системы технологического назначения : тез. докл. Всесоюзного науч.-техн. симпозиума. – М. : НТО-Машпром, 1976. – С. 3–8.
2. Казанцев, В. Ф. Выбор и оптимизация режимов ультразвукового поверхностного деформирования / В. Ф. Казанцев, Ю. М. Лужнов, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, Д. С. Фатюхин // Вестник МАДИ. – 2016. – № 4(47). – С. 26–32.

УДК 621.923

*В. А. Носенко², А. А. Крутикова², Ю. И. Сидякин¹***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПРЕГНАТОРОВ,
ВЫДЕЛЯЮЩИХ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ АКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ**¹Волгоградский государственный технический университет²Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУE-mail: krutikova_vpi@mail.ru², nosenko@volpi.ru¹, stanki@vstu.ru¹

Исследован процесс шлифования подшипниковой стали и титанового сплава импрегнированными шлифовальными кругами. В качестве импрегнаторов предложены вещества, выделяющие в зоне резания активные газы: гексахлорпаракилол, тетраметилтиурамдисульфид и дитиодиморфолин. Импрегнаторы не растворимы в воде, что позволяет использовать их при шлифовании с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей. При нагревании вещества полностью разлагаются с выделением различных газов. Термическая деструкция гексахлорпаракилола сопровождается выделением молекулярного хлора. Основными продуктами разложения тетраметилтиурамдисульфида и дитиодиморфолина являются монооксид углерода, азотистые газы, оксиды серы. Для обработки подшипниковой стали титанового сплава использовали шлифовальные круги из электрокорунда и карбида кремния на керамической связке. Импрегнирование осуществляли растворами веществ. Для каждого соединения подобран растворитель, обеспечивающий максимальную концентрацию импрегнатора. Разработаны составы импрегнаторов и технология импрегнирования. Испытания кругов проведены на операции плоского врезного шлифования. Исследована концентрация газовых продуктов, образующихся при шлифовании на различных режимах. Установлено, что образование газовых продуктов происходит на протяжении всего периода шлифования. С увеличением глубины шлифования концентрация газовых продуктов возрастает. Пробу воздуха брали на расстоянии 30 мм от зоны шлифования. Эффективность применения импрегнаторов оценивали по коэффициенту шлифования, шероховатости обработанной поверхности, составляющим силы резания, наличию шлифовочных прижогов и трещин. Даны рекомендации по применению импрегнированного инструмента для обработки стали и титанового сплава на чистовых и черновых режимах шлифования.

Ключевые слова: шлифование, импрегнатор, термография, газовый анализ, шероховатость поверхности, коэффициент шлифования, сила резания.

*V. A. Nosenko², A. A. Krutikova², Yu. I. Sidiyakin¹***IMPROVING THE EFFICIENCY OF GRINDING USING IMPREGNATORS
EMITTING THE ACTIVE GASEOUS MEDIUM INTO THE CUTTING ZONE**¹Volgograd State Technical University²Volzhsky Polytechnical Institute (Branch)

The process of grinding of bearing steel and titanium alloy with impregnated grinding wheels was studied. As impregnators are proposed substances that release in the cutting zone active gases: hexachlorparaxylol, tetramethylthiuram disulfide and dithiodimorpholinium. Impregnators are insoluble in water, which allows them to be used for grinding with the use of cutting fluids. When heated, the substances completely decompose with the emission of various gases. Thermal destruction of hexachlorparaxylol is accompanied by the liberation of molecular chlorine. The main products of decomposition of tetramethylthiuram disulfide and dithiodimorpholine are carbon monoxide, nitrogenous gases, sulfur oxides. To process the bearing steel of a titanium alloy, grinding wheels of electrocorundum and silicon carbide on a ceramic binder was used. The impregnation was carried out by solutions of substances. For each compound, a solvent is chosen to ensure the maximum concentration of the impregnator. The composition of impregnators and impregnation technology has been developed. The tests of the circles were carried out on a flat incision grinding operation. The concentration of gas products formed during grinding in various modes is studied. It is established that the formation of gas products occurs throughout the entire grinding period. With increasing depth of grinding, the concentration of gas products increases. A sample of air was taken at a distance of 30 mm from the grinding zone. The effectiveness of the use of impregnators was evaluated by the coefficient of grinding, the roughness of the treated surface, the cutting force, the presence of grinding burns and cracks. Recommendations are given on the use of an impregnated tool for processing steel and titanium alloy on finishing and rough grinding conditions.

Keywords: grinding, impregnator, thermography, gas analysis surface roughness, grinding coefficient, cutting force.

Одним из наиболее перспективных и доступных методов совершенствования абразивного инструмента является импрегнирование его специальными составами. В зоне резания под воздействием высокой температуры и давления импрегнаторы, как смазочное средство, вступают во взаимодействие с обрабатываемым материалом [1–4].

К числу важнейших свойств смазочной среды относится ее химическая активность, что имеет большое значение при работе в экстремальных условиях эксплуатации [5]. Наиболее активными веществами являются элементы VII (галогены) и VI (халькогены) групп Периодической системы [6]. Из халькогенов наибольшее распространение получила сера [7]. Улучшение эксплуатационных показателей шлифования достигается в результате импрегнирования абразивного инструмента галогеносодержащими элементами [8–10].

Эффективность действия смазочной среды во многом зависит от ее проникающей способности. В связи с этим, в последних работах в качестве импрегнаторов предложены вещества, способные при температуре шлифования выделять большое количество газообразных продуктов [11–13]. Например, азодикарбонамид и 4,4-оксибис (бензолсульфонилгидразид) при температуре шлифования выделяют азот и аммиак, что обеспечивает увеличения стойкости абразивного инструмента и повышение производительности обработки при обеспечении требований к качеству обработанной поверхности на операции шлифования колец подшипников [14].

В связи с этим, цель данной работы заключалась в повышении эффективности шлифования в результате использования в качестве импрегнаторов химических соединений, способных выделять в зоне шлифования химически активные газообразные продукты.

При выборе импрегнатора необходимо учитывать следующие требования: температура начала термического разложения должна начинаться от 150 °С, что соответствует минимальной средней контактной температура в зоне шлифования; не растворимость в воде, что позволяет использовать импрегнированные круги при шлифовании с наиболее распространенной группой СОЖ на водной основе.

По результатам термографического анализа на приборе системы Паулик-Эрдеи в качестве импрегнаторов выбраны следующие вещества: гексахлорпарацисиллол $C_8H_4Cl_6$ (ГХК), тетраме-

тилтиурамдисульфид $C_6H_{12}N_2S_4$ (ТМТД) и ди-тиодиморфолин $C_8H_{16}N_2O_2S_2$ (DTDM) [15–17]. При выборе учитывали температурный интервал разложения, потерю массы и термические эффекты.

ГХК, ТМТД и DTDM при нагревании полностью разлагаются с выделением различных газов. Термическая деструкция ГХК сопровождается выделением молекулярного хлора. Основными продуктами термораспада ТМТД и DTDM являются монооксид углерода, азотистые газы, оксиды серы.

Выбранные вещества в поры круга вводили в составе раствора методом свободного капиллярного поднятия. Для каждого импрегнатора подобран свой растворитель, обеспечивающий максимальное содержание продукта. В качестве растворителя для ГХК использовали толуол, для ТМТД и DTDM – ацетон. Предельная растворимость перечисленных продуктов соответственно 38, 5 и 7 процентов.

Импрегнаторы вводили в круги из электрокорунда и карбида кремния на керамической связке. Характеристики абразивных инструментов: 64С F80 К 7 V и 1 200×20×76 25А F80 К 7 V. Сушку кругов осуществляли на воздухе при комнатной температуре в течение 24 часов. Концентрация импрегнаторов в пересчете на массу круга приведена в таблице.

Круги испытаны на операции плоского врезного шлифования титанового сплав ВТ6 и подшипниковой стали ШХ15. Контролируемые параметры: коэффициент шлифования, составляющие силы резания P_z и P_y , шероховатость обработанной поверхности, наличие шлифовочных прижогов и трещин, газовый состав среды в зоне шлифования [18–19].

Содержание импрегнатора на единицу массы шлифовального круга, %

Импрегнатор	Характеристика абразивного материала	
	25А	64С
ГХК	7	5
ТМТД	1	1
DTDM	2	2

Состав среды определяли газовым анализатором мод. ГАНК-4. Пробу воздуха отбирали на расстоянии 30 мм от зоны шлифования. При обработке инструментами, импрегнированными ГХК, измеряли концентрацию хлора, ТМТД и DTDM – концентрацию сернистого газа. Ис-

следования проведены без использования СОЖ [20, 22]. Установлено, что выделение газов происходит на протяжении всего периода шлифования, с увеличением глубины концентрации газов возрастает.

При обработке стали ШХ15 на чистовых режимах в качестве импрегнатора целесообразно использовать ГХК. По сравнению с базовым кругом из электрокорунда коэффициент шлифования возрастает в 1,4 раза, параметр шероховатости обработанной поверхности R_a снижается на 25 %, составляющие силы резания уменьшаются почти на 20 %. Импрегнаторы ТМТД и DTDM рекомендованы при шлифовании на черновых режимах: K_g возрастает в 1,5–1,6 раза, R_a снижается на 25–35 %, составляющие силы резания – на 15–25 %. Для титанового сплава в качестве импрегнатора рекомендуется ГХК. Например, при шлифовании на полустивом режиме по сравнению с базовым кругом из карбида кремния K_g возрастает в 1,5 раза, R_a снижается на 33 %, составляющие силы резания – на 15–19 %.

Выводы

1. Разработаны составы для импрегнирования шлифовальных кругов веществами, выделяющимися при шлифовании активные газовые среды и технология их введения в абразивный инструмент.

2. Применение новых составов позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности и силу резания, увеличить коэффициент шлифования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Островский, В. И.* Импрегнированный абразивный инструмент / В. И. Островский. – М. : НИИМаш, 1983. – 72 с.
2. *Чирков, Г. В.* Влияние импрегнирования шлифовального круга на качество обработки. / Г. В. Чирков. – Технология машиностроения, 2007. – № 2. – С. 22–23.
3. *Никитин, А. В.* Шлифование труднообрабатываемых материалов импрегнированными кругами как способ повышения их режущих свойств / А. В. Никитин. – Инструмент и технологии, 2010. – № 28. – С. 52–58.
4. *Nadolny, K.* The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium / K. Nadolny, W. Sienicki, M. Wojtewicz // Archives of civil and mechanical engineering. – 2015. – № 15. – P. 71–86.
5. *Чичинадзе, А. В.* Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение. – 2003. – 576 с.
6. Химическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. Н. С. Зефирова, зам. гл. ред. Н. Н. Кулов, редкол.: Ю. А. Золотов [и др.]. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1988–1998.
7. Эффективность применения абразивных кругов, пропитанных серой, при внутреннем врезном шлифовании колец подшипников / З. И. Кремень [и др.] // Абразивы: науч.-техн. реф. сб. – М.: НИИМаш, 1972. – Вып. 3.
8. А.С. 1321566 СССР, МКИ В 24 D 3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / П. А. Дмитриев, А. Н. Кириллов, А. Н. Розмыслов. – № 4031454 / 22–08 ; заявл. 28.02.86 ; опуб. 07.07.87, Бюл. № 25.
9. *Перцов, Н. В.* Повышение эффективности шлифования за счет применения абразивного инструмента с активным наполнителем / Н. В. Перцов, В. М. Яковлев, А. В. Лобанов / Обзор ВНИИППа. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. – М., 1987. – 36 с.
10. *Дубровский, П. В.* Исследование воздействия СОТС на качество авиационных изделий / П. В. Дубровский // Новые технологии в авиационной промышленности : сб. науч. тр. / Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск, 2002. – С. 55–61.
11. Пат. 2440886 Российская Федерация, МПК В 24 D 3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А. П. Митрофанов, В. А. Носенко, Г. М. Бутов; заявитель и патентообладатель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 2010124901/04 ; заявл. 17.06.10 ; опубл. 27.01.12, Бюл. № 3. – 5 с.
12. Пат. 2443538 РФ, МПК В 24 D 3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А. П. Митрофанов, В. А. Носенко, Г. М. Бутов ; заявитель и патентообладатель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 2011101408/02 ; заявл. 13.01.11 ; опубл. 27.02.12, Бюл. № 6. – 5 с.
13. *Носенко, В. А.* Исследование применения импрегнаторов из класса порофоров для пропитки абразивного инструмента / В. А. Носенко, А. П. Митрофанов, Г. М. Бутов // СТИН. – 2011. – № 8. – С. 35–40.
14. *Носенко, В. А.* Исследование и применение азодикарбонамида для импрегнирования абразивного инструмента / В. А. Носенко, А. П. Митрофанов // Физика, химия и механика трибосистем. – 2010. – № 9. – С. 145–149.
15. *Носенко, В. А.* Повышение эффективности шлифования с использованием галогенообразующего импрегнатора / В. А. Носенко, А. П. Митрофанов, А. А. Крутикова // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 65–72.
16. *Носенко, В. А.* Исследование влияния физико-химических свойств внешней среды на процесс шлифования при импрегнировании абразивного инструмента / В. А. Носенко, А. П. Митрофанов, А. А. Крутикова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 22–26.
17. *Носенко, В. А.* Исследование процесса термического разложения ускорителей вулканизации в смеси с порошком железа [Электронный ресурс] / В. А. Носенко, А. А. Крутикова, И. С. Кравцова // Современные проблемы науки и образования : электрон. науч. журнал / РАЕ. – 2014. – № 2. – С. Режим доступа : <http://www.science-education.ru/116-12797>.
18. Пат. 2532615 РФ, МПК В24D3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А. А. Крутикова, В. А. Носенко, О. М. Новопольцева, А. П. Митрофанов ; заявитель и патентообладатель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 2013127498/02 ; заявл. 17.06.13 ; опубл. 10.11.14, Бюл. № 31. – 5 с.
19. Пат. 2595790 Российская Федерация, МПК В24D3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А. А. Крутикова, В. А. Носенко, О. М. Новопольцева, А. П. Митро-

фанов; заявитель и патентообладатель Волгоград. гос. техн. ун-т. – № 2014151356/02 ; заявл. 17.12.14 ; опубл. 27.08.16, Бюл. № 24. – 4 с.

20. Носенко, В. А. Статистический анализ концентрации хлора вблизи зоны резания при шлифовании импрегнированным абразивным инструментом [Электронный ресурс] / В. А. Носенко, А. А. Крутикова, А. В. Синьков // Современные проблемы науки и образования : электрон. науч. журнал. – 2013. – № 4. – С. 1–9. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/110-9970>.

21. Носенко, В. А. Повышение эффективности шли-

фования с использованием галогенообразующего импрегнатора / В. А. Носенко, А. П. Митрофанов, А. А. Крутикова // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 65–72.

22. Носенко, В. А. Исследование влияния физико-химических свойств внешней среды на процесс шлифования при импрегнировании абразивного инструмента / В. А. Носенко, А. П. Митрофанов, А. А. Крутикова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 22–26.

УДК 621.92

В. А. Носенко, М. В. Даниленко

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: danilenko_vpi@mail.ru¹, nosenko@volpi.ru²

В статье изложена динамическая теоретико-вероятностная модель силы резания при шлифовании. В основу решения положен метод суммирования сил резания от всех контактирующих с обрабатываемой поверхностью вершин зерен. Число контактирующих зерен определяется по вероятности контакта. Отличительная особенность заключается в использовании математической модели, учитывающей изменения распределения вершин зерен в результате изнашивания абразивного инструмента за период шлифования. Допущения, принятые при моделировании процесса: основную работу резания выполняют вершины абразивных зерен; рельеф рабочей поверхности шлифовального круга определяется геометрическими параметрами вершин зерен, их числом и распределением; изменение рельефа рабочей поверхности шлифовального круга происходит за один оборот; период работы круга определяется K оборотами. Рассмотрены вероятности трех видов изнашивания: истирания и скалывания вершины зерна, вырывания зерна из связки круга. Изменение положения вершины зерна под действием того или иного вида изнашивания определяется с использованием марковских случайных процессов. Фактическая глубина резания вершины зерна, находящегося в произвольном микрообъеме ΔV_{ij} , определяется от уровня вероятности контакта, равного 0,0027. Данный уровень вероятности принят в качестве границы, определяющей линию удаленного материала в зоне резания. Для вычисления вероятностей видов изнашивания используется максимальное значение силы, полученное при движении зерна в зоне шлифования.

Ключевые слова: математические модели, шлифование, абразивный инструмент, сила резания, вероятность контакта, виды изнашивания.

V. A. Nosenko, M. V. Danilenko

DYNAMIC THEORETICAL - PROBABILITY MODEL OF CUTTING FORCE IN GRINDING

Volzhsky Polytechnical Institute (Branch)

The article presents a dynamic theoretical-probability model of cutting force in grinding. The decision is based on the method of summation the cutting forces from all the peaks' grains to contact with the surface. The number of contacting grains is determined by the probability of contact. A distinctive feature is the use of mathematical models that take into account changes in the distribution of the grains' peaks from the abrasive tool's wear during the period of grinding. The assumptions made in the modeling process: the main work of cutting is carried out the grain's peaks; the topography of the working surfaces' wheel grinding is determined by the geometrical parameters of the grain's peaks, their number and distribution; the change in topography of the working surface of the grinding wheel per his one turn; the work's period of wheel is determined by K turnovers. Considered the probabilities in three types of wear: abrasion and spallation of the grain's peaks, pull-out grain from the bundles of the wheel. Changing the position of the grain's peaks under the action of a particular type of wear is determined using random Markov's processes. The actual depth of cut of the grain's peaks in the sample microvolume ΔV_{ij} is determined by the level of probability contact is 0,0027. This level of probability accepted as the border defining the line of the removed material in the cutting zone. To calculate the probabilities of the types of wear is used the maximum value's force obtained during the movement of grain in the area of grinding.

Keywords: mathematical models, grinding, abrasive tool, cutting force, the probability of contact, the types of wear.

Для расчета силы резания при шлифовании используют различные математические модели, учитывающие суммирование сил всех одновременно работающих зерен [1–4]. Различие между существующими моделями заключается в методике определения числа контактирующих зерен в пределах одного слоя. Наиболее перспективным направлением совершенствования методики моделирования распределения вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга (РП ШК) следует считать использование марковских случайных процессов [5–8].

Допущения, принятые при моделировании процесса: основную работу резания выполняют

вершины абразивных зерен; рельеф РП ШК определяется геометрическими параметрами вершин зерен, их числом и распределением; изменение рельефа РП ШК происходит за один оборот круга в результате истирания и скалывания вершин, вырывания зерен из связки круга; период работы круга определяется K оборотами.

Разделим область зоны контакта V плоскостями на n элементарных микрообъемов (изображена на рисунке). Расстояние между плоскостями принимаем равным величине радиального износа круга за один оборот $\Delta R(K)$, тогда

$$\Delta V_n = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z, \Delta V = \Delta y \cdot \Delta z \text{ при } \Delta x = 1. \quad (1)$$

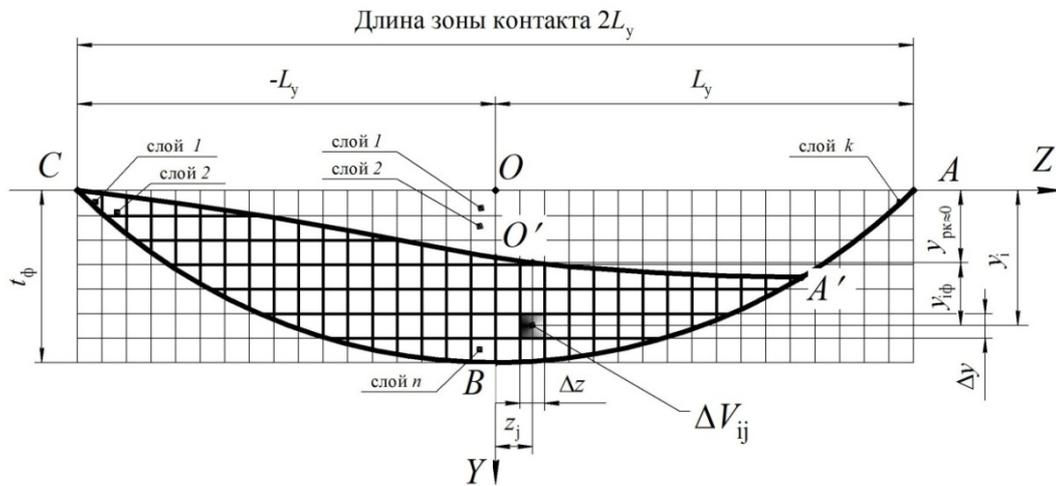


Схема зоны контакта для построения модели силы резания

Плотность распределения вершин зерен внутри элементарного микрообъема (1) $\rho_3(y_i; z_j)$ принимаем величиной постоянной, тогда количество вершин в микрообъеме: $\Delta n_{ij} = \rho_3(y_i; z_j) \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.

Силу резания вершинами зерен $P_{ij}(K)$, расположенными в микрообъеме V_{ij} , определим с учетом вероятности их контакта с обрабатываемым материалом определяется по формуле (2):

$$P_{ij}(K) = P_3(y_i; z_j) \times \rho_3(y_i; z_j) \cdot p_k(y_i; z_j) \cdot \Delta z \cdot \Delta y, \quad (2)$$

где $P_3(y_i; z_j)$ – равнодействующая сила резания единичной вершиной зерна.

Согласно данным, представленным в работах [2, 4], закономерность съема припуска определяется линией $CO'A'$, имеющей уровень вероятности контакта $p_k \approx 0,0027$. Для каждой из координат z_j может быть найдена координата y_i , в которой вероятность контакта принимает заданное значение. Фактическая глубина резания вершины зерна $y_{if} = y_i - y_{pk}$.

Сила резания единичной вершиной зерна в микрообъеме, зависит от фактической глубины резания y_{if} : $P_3 = P_3(y_{if})$. Сила резания $P(K)$ в некоторый момент времени τ , соответствующий K -му обороту шлифовального круга, определяется количеством элементарных объемов n в рассматриваемой области V (рис. 1):

$$P(K) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \rho_3(y_i; z_j) \cdot p_k(y_i; z_j) \cdot P_3(y_i; z_j) \cdot \Delta z \cdot \Delta y. \quad (3)$$

При $\Delta y \rightarrow 0$; $\Delta z \rightarrow 0$; $n \rightarrow \infty$ и $k \rightarrow \infty$, уравнение (3) примет вид [2]:

$$P(K) = \iint_V \rho_3 \cdot p_k \cdot P_3 dz dy. \quad (4)$$

В течение периода обработки, плотность распределения вершин зерен изменяется в результате изнашивания. Все многочисленные виды изнашивания, в предлагаемой модели, объединены в три группы: вырывание зерна из

связки, скалывание и истирание вершины зерна. Допускаем, что вершина зерна, проходя через зону контакта, подвергается только одной из трех возможных разновидностей изнашивания, которая определяется по максимальной величине ее радиального износа. Изнашивание вершины зерна является случайным событием. Количество вершин зерен, подверженных в i -м слое на K -м обороте круга различным видам изнашивания, определяется вероятностями вырывания зерен из связки $A_i(K)$, скалывания $B_i(K)$ и истирания $C_i(K)$ их вершин. Принимаем, что каждая вершина зерна за период времени, равный одному обороту шлифовального круга подвергается только одному виду изнашивания, а вероятности этих событий составляют полную группу.

Вырывание зерна из связки или скалывание его вершины происходит под действием силы резания P_z , значение которой зависит от глубины резания и изменяется по траектории движения вершины в зоне контакта. По мере приближения к вертикальной осевой плоскости и увеличения глубины резания сила резания возрастает и достигает своего максимального значения в микрообъеме, соответствующем наибольшему значению фактической глубины резания вершины зерна в рассматриваемом слое. Для вычисления вероятностей видов изнашивания используется максимальная сила резания P_z для рассматриваемого слоя, значение которой с учетом фактической глубины резания определяется по зависимостям С. Н. Корчака [9].

За период времени, равный одному обороту шлифовального круга плотность распределения вершин зерен, участвующих в формообразовании поверхности изменяется, что приводит к изменению силы резания. Расчет силы резания во время шлифования производится после каждого оборота круга. Таким образом, предла-

гаемая динамическая теоретико-вероятностная модель, позволяет определить силу резания в любой период работы шлифовального круга.

На основе предложенного алгоритма, с целью автоматизации расчетов, разработана программа для ЭВМ [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Островский, В. И.* Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
2. *Новоселов, Ю. К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Севастополь: Изд-во Сев.НТУ, 2012. – 304 с.
3. *Белов, А. Г.* Разработка математических моделей составляющих силы резания при шлифовании торцов ступенчатых валов методом осевой подачи кругом прямого профиля / А. Г. Белов // Известия Челябинского научного центра УрО РАН, 2004. – № 1. – С. 122–126.
4. *Королев, А. В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во сарат. ун-та. – 1975. – 192 с.
5. *Носенко, В. А.* Математическое моделирование распределения вершин зерен при шлифовании в результате различных видов изнашивания с использованием Марковских случайных процессов / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 2–1 (33). – С. 101–106.
6. *Носенко, В. А.* Математическое моделирование износа зерен скалыванием с использованием Марковских случайных процессов / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 20–31.
7. *Носенко, В. А.* Математическая модель формирования рабочей поверхности круга при шлифовании / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Инструмент и технологии. – 2010. – № 27. – С. 64–67.
8. *Носенко, В. А.* Шлифование адгезионно-активных металлов: монография / В. А. Носенко. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.
9. *Корчак, С. Н.* Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – М.: Машиностроение. – 1976. – 280 с.
10. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011614423 от 6 июня 2011 г. РФ, МПК (нет) Расчет сил резания при шлифовании / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко, С. В. Носенко; ВолгГТУ. – 2011.

УДК 621.762.4.044

М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров, Н. Ю. Ветлицын

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКОМПОНЕНТНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

В статье рассмотрены вопросы определения упругих характеристик однокомпонентного абразивного инструмента, приведена методика определения модуля нормальной упругости, приведены графики зависимости его от пористости инструмента и экспериментальные формулы, отражающие эти зависимости.

Ключевые слова: плотность, пористость, модуль нормальной упругости.

M. Yu. Polyanchikova, Yu. N. Plyanchikov, N. I. Egorov, N. Yu. Vetlitcin

DETERMINATION OF ELASTIC CHARACTERISTICS OF SINGLE-COMPONENT ABRASIVE TOOLS

Volgograd State Technical University

The article presents the definitions of the elastic characteristics of a one-component abrasive tool, the method for determining the modulus of normal elasticity is given, graphs of its dependence on the porosity of the tool are presented, and experimental formulas reflecting these dependences are given.

Keywords: density, porosity, modulus of elasticity.

Исследования физико-механических характеристик, таких как твердость, предельные напряжения на изгиб и сжатие однокомпонентного абразивного инструмента (ОКАИ), результаты которых представлены в значительном количестве публикаций, в том числе [6, 10], отражают влияние параметров прессования и спекания на прочностные параметры, совершенно не освещая упругих свойств ОКАИ.

Однако не менее важным является исследование и научное значение упругих характеристик, так как последние, считаясь структурно-нечувствительными, глубоко связаны с природой сил сцепления и другими структурными особенностями пористого хрупкого тела (характер связей, кристаллическое строение и др.).

Поэтому изучение упругой области деформирования имеет большое практическое значение для хрупких состояний тел в условиях обработки и эксплуатации.

Важность изучения упругой деформации обусловлена еще и тем, что именно с нее начинается процесс деформирования и разрушения. [1]

Несмотря на то, что упругие характеристики находят самое широкое применение для количественного решения всевозможных задач теории упругости и материаловедения, в практике расчетов изделий на прочность и долговечность, их значения и до настоящего времени определяются недостаточно точно.

Упругие постоянные являются векторными величинами и поэтому проявление следов структурной анизотропии, обусловленной тем или иным характером обработки изделий, неизбежно вызывает существенное изменение значений определяемых упругих постоянных. Это относится не только к таким трудно определяемым с большой точностью величинам, как коэффициент Пуассона и коэффициент сжимаемости, но и к модулям упругости первого и второго рода [4].

Известно, что упругость – это свойство тел изменять форму и размеры под действием нагрузок и самопроизвольно восстанавливать ис-

ходную конфигурацию при прекращении воздействия внешних нагрузок. Упругость тел обусловлена силами взаимодействия атомов, из которых они построены. В твердых телах при температуре абсолютного нуля в отсутствии внешних напряжений атомы занимают равновесные положения, в которых сумма всех сил, действующих на каждый атом со стороны остальных, равна нулю, а потенциальная энергия минимальна.

Под действием внешних напряжений атомы смещаются из своих равновесных положений, что сопровождается увеличением потенциальной энергии тела на величину, равную работе внешних напряжений по изменению формы тела. После снятия внешних напряжений конфигурация упруго деформированного тела с неравновесными межатомными расстояниями оказывается неустойчивой и самопроизвольно возвращается в равновесное состояние. Запасенная в теле избыточная потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию колеблющихся атомов т. е. в теплоту.

При этом пористое тело можно представить как совокупность атомов-шариков, соединенных пружинами, ориентации которых фиксированы другими пружинами. Константы упругости этих пружин определяют модули упругости материалов. В результате расчетов с использованием методов теории упругости определяются: допустимые нагрузки, при которых в исследуемом объекте не возникают напряжения или перемещения, опасные с точки зрения прочности или недопустимые по условиям эксплуатации [2].

В настоящей работе приведены результаты исследования упругих характеристик инструмента ОКАИ, в том числе модуля нормальной упругости в зависимости от пористости инструмента после прессования абразивной смеси, содержащей 90% окиси алюминия (Al_2O_3) и 10 % карбида бора (B_4C) для получения ОКАИ по патенту [11].

По известному определению [1, 2] модуль Юнга или модуль нормальной упругости (E)

есть напряжение, необходимое для увеличения длины образца в два раза. Такое толкование для керамических материалов довольно условно, поскольку величина упругого удлинения у большинства твердых тел редко достигает 1 % и никогда не достигает 100 %.

Величину модуля нормальной упругости, по мнению ряда ученых [1], можно рассматривать как характеристику упругого сопротивления или упругой упрочняемости материала, т. е. как характеристику интенсивности нарастания напряжения с увеличением удлинения. Чем больше модуль нормальной упругости, тем

сильнее возрастают напряжения с ростом упругой деформации.

Исходными данными для определения модуля нормальной упругости являются связи плотности исследуемой абразивной смеси с давлением ударной волны, используемой при прессовании.

По результатам проведенных исследований были построены графики зависимости плотности прессовок, полученных при различных давлениях ударной волны для различных исходных размеров зерен окиси алюминия, представленные на рис. 1.

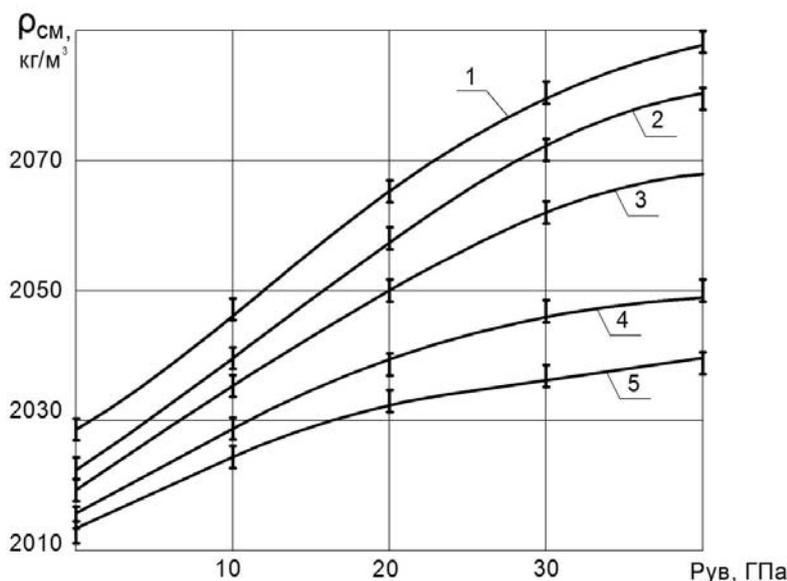


Рис. 1. График зависимости плотности прессовки абразивной смеси от давления во фронте ударной волны ($P_{ув}$):
 1 – размер зерна Al_2O_3 – 100 мкм (F 120); 2 – размер зерна Al_2O_3 – 200 мкм (F 80);
 3 – размер зерна Al_2O_3 – 320 мкм (F 54); 4 – размер зерна Al_2O_3 – 400 мкм (F 46);
 5 – размер зерна Al_2O_3 – 500 мкм (F 36)

Здесь и в дальнейшем тексте размер зерен Al_2O_3 в скобках соответствует ГОСТ 52381–2005.

После обработки данных, представленных на рис. 1, с использованием методики представленной в [7,8], были получены эмпирические зависимости, связывающие плотность прессовки с давлением ударной волны при прессовании для различных зернистостей порошка Al_2O_3 :

$$\begin{aligned} \rho_{100} &= 1982 \cdot P_{ув}^{0,014}; \rho_{200} = 1982 \cdot P_{ув}^{0,013}; \\ \rho_{320} &= 1993 \cdot P_{ув}^{0,01}; \\ \rho_{400} &= 1993 \cdot P_{ув}^{0,008}; \rho_{500} = 1989 \cdot P_{ув}^{0,007} \end{aligned} \quad (1)$$

Для определения пористости воспользуемся методикой, представленной в [5].

Пористость определим по формуле:

$$П = \frac{\rho_{ч.в.} - \rho_{п.т.}}{\rho_{ч.в.}}, \quad (2)$$

где $\rho_{ч.в.}$ – плотность чистого вещества (компактного), $кг/м^3$; $\rho_{п.т.}$ – плотность пористого тела, $кг/м^3$.

В нашем случае $\rho_{ч.в.}$ представляет собой плотность компактного вещества, состоящего из смеси абразивных порошков $90\%Al_2O_3 + 10\%V_4C$. Если получить такое компактное вещество (чисто теоретически, например, методом сплавления), то его плотность была бы следующей:

$$\rho_{ч.в.} = 0,9 \cdot \rho_{Al_2O_3} + 0,1 \cdot \rho_{V_4C} = 0,9 \cdot 3900 + 0,1 \cdot 2520 = 3762 \text{ кг / м}^3 \quad (3)$$

Значение плотности Al_2O_3 и W_4C взяты из [9].

$$\rho_{Al_2O_3} = 3900 \text{ кг/м}^3; \rho_{W_4C} = 2520 \text{ кг/м}^3.$$

Такая методика определения плотности компактных веществ, состоящих из смеси различных веществ, входящих в смесь в определенном соотношении, была проведена авторами при определении плотности твердых сплавов

$$\rho_{VK8} = 0,92 \cdot \rho_{WC} + 0,08 \cdot \rho_{Co} = 0,92 \cdot 15600 + 0,08 \cdot 8900 = 15064 \text{ кг/м}^3$$

По данным [9] $\rho_{VK8} = 14400 - 14800 \text{ кг/м}^3$.

Определяем погрешность расчета:

$$\Delta = \frac{\rho_{расч.} - \rho_{табл.}}{\rho_{табл.}} \cdot 100 = \frac{15064 - 14800}{14800} \cdot 100 = 1,78\%. \quad (4)$$

Такая незначительная ошибка позволяет использовать данную методику для определения плотностей веществ, состоящих из различных компонентов в определенном соотношении, хотя такие компактные вещества (даже методом сплавления) не получали до сегодняшнего дня или о них нет сведений в научно-технической литературе.

Величину модуля нормальной упругости пористого тела (E_{Π}) можно определить по зависимости, представленной в [3]:

$$\frac{E}{E_{\Pi}} = 1 - \frac{15(1-\mu)\Pi}{(7-5\mu)+2(4-5\mu)\Pi}, \quad (5)$$

где E – модуль нормальной упругости чистого вещества, ГПа; μ – коэффициент Пуассона; Π – пористость.

В нашем случае величина модуля нормальной упругости чистого вещества в формуле (5) представляет собой модуль нормальной упругости многокомпонентного компактного вещества, состоящего из абразивной смеси $90\%Al_2O_3 + 10\%W_4C$ и полученного хотя бы методом сплавления, хотя сведений о таком компактном веществе в научно-технической литературе нет. Используя ранее предложенную методику, определим величину E по зависимости:

$$E = 0,9 \cdot E_{Al_2O_3} + 0,1 \cdot E_{W_4C}, \quad (6)$$

где $E_{Al_2O_3}$ – модуль нормальной упругости окиси алюминия, ГПа;

$$E_{Al_2O_3} = 410,6 \text{ ГПа} [4].$$

W_4C и $T15K6$. Приведем расчет плотности сплава $VK8$.

Плотность карбида вольфрама

$$\rho_{wc} = 15600 \text{ кг/м}^3 [9].$$

Плотность кобальта $\rho_{Co} = 8900 \text{ кг/м}^3$ [12].

Определим расчетную плотность сплава $VK8$:

E_{W_4C} – модуль нормальной упругости карбида бора, ГПа;

$E_{W_4C} = 493 \text{ ГПа} [4].$

$$E = 0,9 \cdot 410,6 + 0,1 \cdot 493 = 419 \text{ ГПа}. \quad (7)$$

Такая методика определения модуля нормальной упругости многокомпонентного компактного вещества, используемая ранее при определении плотности аналогичных веществ, была опробована на примере твердых сплавов $VK8$ и $T15K6$. Не приводя в статье соответствующих расчетов, отметим, что разница расчетных и справочных данных составляет для сплава $VK8$ 0,63 %, а для сплава $T15K6$ – 8 %.

Эту методику использовали при определении коэффициента Пуассона. В результате было получено его значение для исследуемой компактной смеси $\mu = 0,225$. Это значение очень мало отличается от справочных данных [4] для абразивных материалов ($\mu = 0,23$).

После подстановки полученных данных в формулу (5) и после ее преобразования получим окончательно связь между модулем нормальной упругости и пористостью прессовки, полученной после ударного прессования абразивной смеси ($90\%Al_2O_3 + 10\%W_4C$):

$$E_{\Pi} = \frac{419 + 152\Pi}{1 - \Pi} \quad (8)$$

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные данные по плотности, пористости и величине E_{Π} в зависимости от давления ударной волны при прессовании исследуемой абразивной смеси исходного размера зерен окиси алюминия 100, 200, 320, 400, 500 мкм.

Экспериментальные и расчетные данные по плотности, пористости и величине E_{II} в зависимости от давления ударной волны при прессовании и исходного размера зерен окиси алюминия

$P_{ув}$, ГПа	10	20	30	40
Исходный размер зерна окиси алюминия 100 мкм				
Плотность, кг/м ³	2048	2065	2079	2088
Пористость	0,456	0,451	0,448	0,445
E_{II} , ГПа	898	888	882	877
Исходный размер зерна окиси алюминия 200 мкм				
Плотность, кг/м ³	2040	2057	2072	2080
Пористость	0,4577	0,4532	0,4492	0,4471
E_{II} , ГПа	901	892	884	881
Исходный размер зерна окиси алюминия 320 мкм				
Плотность, кг/м ³	2035	2050	2062	2067
Пористость	0,4591	0,4551	0,4519	0,4506
E_{II} , ГПа	904	896	890	887
Исходный размер зерна окиси алюминия 400 мкм				
Плотность, кг/м ³	2028	2039	2045	2049
Пористость	0,4609	0,458	0,4564	0,4553
E_{II} , ГПа	907	901	898	896
Исходный размер зерна окиси алюминия 500 мкм				
Плотность, кг/м ³	2024	2032	2037	2040
Пористость	0,462	0,4599	0,4582	0,4577
E_{II} , ГПа	909	905	902	901

На основании данных таблицы построены графики зависимости модуля нормальной упругости, представленные на рис. 2 для размеров зерна Al_2O_3 100 мкм (кривая 1) и 200 мкм (кривая 2),

на рис. 3 для размеров зерна Al_2O_3 320 мкм (кривая 1) и 400 мкм (кривая 2), на рис. 4 – для размера зерна Al_2O_3 500 мкм.

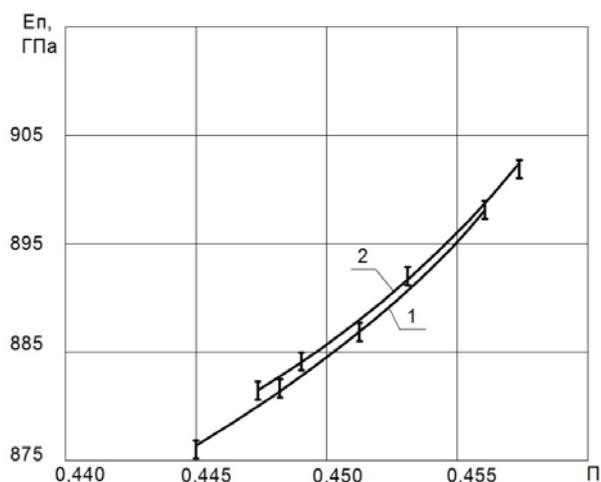


Рис. 2. Влияние пористости (Π) прессовки абразивного инструмента ОКАИ, полученной из смеси 90 % Al_2O_3 + 10 % V_4C , на модуль нормальной упругости (E_{II}) при размере зерна Al_2O_3 :
1 – 100 мкм (F 120); 2 – 200 мкм (F 80)

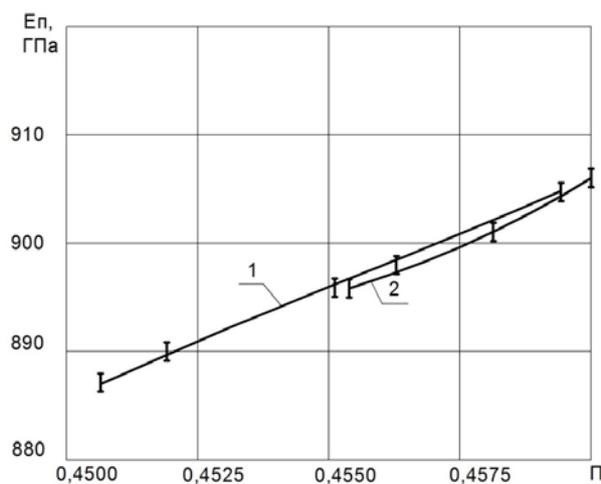


Рис. 3. Влияние пористости (Π) прессовки абразивного инструмента ОКАИ, полученной из смеси 90 % Al_2O_3 + 10 % V_4C , на модуль нормальной упругости (E_{II}) при размере зерна Al_2O_3 :
1 – 320 мкм (F 54); 2 – 400 мкм (F 46)

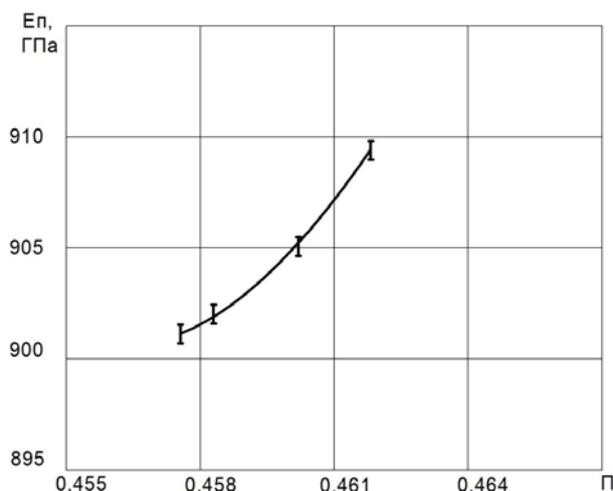


Рис. 4. Влияние пористости (П) прессовки абразивного инструмента ОКАИ, полученной из смеси 90 % Al_2O_3 + 10 % V_4C , на модуль нормальной упругости (E_{Π}) при размере зерна Al_2O_3 500 мкм (F 36)

В целях прогнозирования получения инструмента ОКАИ с заранее определенными характеристиками упругих свойств были определены эмпирические зависимости модуля нормальной упругости от пористости прессовок, которые были определены по известной методике [8].

для размера зерна Al_2O_3 100 мкм:

$$E_{\Pi} = 2023 \cdot \Pi^{1,034} \quad (9)$$

для размера зерна Al_2O_3 200 мкм:

$$E_{\Pi} = 1892 \cdot \Pi^{0,95} \quad (10)$$

для размера зерна Al_2O_3 320 мкм:

$$E_{\Pi} = 2008 \cdot \Pi^{1,025} \quad (11)$$

для размера зерна Al_2O_3 400 мкм:

$$E_{\Pi} = 1967 \cdot \Pi \quad (12)$$

для размера зерна Al_2O_3 500 мкм:

$$E_{\Pi} = 2014 \cdot \Pi^{1,03} \quad (13)$$

Вывод: Впервые получены графические и аналитические зависимости, связывающие структурное состояние прессовок (пористость) с их упругими характеристиками прессовок, полученных воздействием ударной волны на абра-

зивную смесь, содержащую 90% Al_2O_3 + 10% V_4C , что необходимо для прогнозирования механических характеристик инструмента ОКАИ на стадиях его получения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. Изд. 3-е, ч. 1. Деформация и разрушение. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.
2. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
3. Hashin Z. Relations Between Young's modulus and temperature. – J. Appl. Mech., 1962, 29. – P. 143–147.
4. Сверхтвердые материалы / И. Н. Францевич, Г. Г. Гнезин, А. В. Курдюмов, Г. Г. Карюк, А. В. Бочко, Н. П. Семенов; под общ. ред. И. Н. Францевича. – Киев : Наукова думка, 1980. – 296 с.
5. ГОСТ 2409–95 (ИСО 5017–88). Межгосударственный стандарт. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Минск, 2002. – 6 с.
6. Полянчикова, М. Ю. Совершенствование процесса хонингования чугунных гильз цилиндров при их ремонте за счет применения модифицированного однокомпонентного абразивного инструмента и переменной скорости резания : дис. канд. техн. наук: 05.02.07: защищена 26.05.11 / Полянчикова М. Ю.: место защиты: Волг. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2011. – 143 с.
7. Кучеров, В. Г. Основы научных исследований / В. Г. Кучеров, О. И. Тужиков, О. О. Тужиков, Г. В. Ханов ; под общ. ред. В. Г. Кучерова. – Волгоград, РПК «Политехник», 2004. – 304 с.
8. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
9. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко [и др.] ; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.
10. Повышение качества однокомпонентных абразивных и алмазных инструментов, полученных ударно-волновым прессованием : монография / М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 228 с.
11. Пат. 2293013 МПК В24Д 18/00 Способ изготовления абразивных изделий / Полянчиков Ю. Н., Полянчикова М. Ю., Кожевникова А. А., Емельяненко А. А., Ангеловская Н. В., Крайнев Д. В. – Опубл. 10.02.2007 г., Бюлл. № 4.
12. Свойства элементов : справ. изд. / под ред. М. Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.

УДК 621. 922

И. А. Рупасов, А. Б. Переладов
**РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОГО ЯДРА СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ**

Курганский государственный университет

E-mail: pereladov@kgsu.ru

В статье изучено состояние научных исследований и существующие проблемы автоматизации проектирования шлифовальных операций при производстве деталей на металлообрабатывающих предприятиях. В ходе изучения выявлены проблемы, препятствующие получению адекватных многофакторных математических моделей, описывающих процесс шлифования и пригодных для использования в качестве универсального расчетного ядра САПР. Авторами предложена и реализована технология создания нейросетевой модели процесса шлифования для конкретных условий обработки, которая предназначалась для использования в качестве расчетного математического ядра системы автоматизированного проектирования, режимно-инструментального оснащения операций. Для проведения исследований с использованием искусственной нейросети (ИНС) в качестве базового элемента был выбран перцептрон с нелинейной функцией активации, так как данный вид ИНС является подходящим для задач моделирования в сравнении с пороговым или однослойным перцептроном. Приведены результаты нейросетевого моделирования для определенного факторного пространства. Для демонстрации и проверки эффективности применения ИНС осуществлено моделирование процесса врезного круглого наружного шлифования конкретной детали. Приведен график обучения ИНС и таблица с результатами моделирования. Сделан вывод о пригодности и условиях применения разработанного нейросетевого ядра для автоматизированного расчета операции шлифования.

Ключевые слова: процесс шлифования, система автоматизированного проектирования, нейросетевые технологии, моделирование.

I. Rupasov A. Pereladov

**DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORK THE CORE
OF THE COMPUTER AIDED DESIGN OF GRINDING OPERATIONS**

Kurgan State University

The article examined the state of research and existing problems of automated design of grinding operations in the production of parts in metal-processing enterprises. During the study identified barriers to obtaining adequate multivariate mathematical models describing the grinding process and is suitable for use as a universal computational kernel CAD. The authors proposed and implemented a technology for creating neural-network model of the grinding process for a specific machining conditions, which was intended for use as a calculated mathematical core of computer aided design. operational tooling operations. For studies using artificial neural network (Ann) as the base item was selected perceptron with nonlinear activation function, since this type of Ann is suitable for modeling tasks in comparison with a threshold or a single-layer perceptron. The results of neural network modeling for the particular factor space. To demonstrate and test the effectiveness of the ins carried out a simulation of the mortise round external grinding specific details. Given a graph learning the ins and the table with the simulation results. The conclusion is made about the suitability and conditions of use of the developed neural network kernel for automatic calculation of the grinding operation.

Keywords: grinding process, computer-aided design, neural networks, simulation

Введение

В настоящее время, в металлообрабатывающих производствах и других отраслях промышленности достаточно много внимания уделяется разработке и использованию систем автоматизированного проектирования (САПР), предназначенных для решения задач оптимизации режимно-инструментального оснащения операций механической обработки с учетом имеющихся ограничений и заданных приоритетов. САПР призвана сократить расходы, увели-

чить производительность обработки, обеспечить качество выпускаемой продукции. Для эффективного решения вышеуказанных вопросов необходимо получить адекватные математические зависимости описывающие процессы резания, позволяющие их использовать в качестве ядра САПР. В значительной степени это необходимо для проектирования операций шлифования, которые не имеют сегодня автоматизированных программных средств расчетов и прогнозирования выходных показателей.

1. Состояние вопроса

Технологические операции обработки материалов резанием лезвийным инструментом, процесс реализации которых хорошо изучен, можно достаточно адекватно описать математическими зависимостями. Поэтому, создание математического ядра САПР таких операций не представляет труда, так как все закономерности изменения значимых величин известны и отсутствует влияние случайных факторов (или ими можно пренебречь). Что касается процесса шлифования, то здесь наблюдается отсутствие универсальных математических моделей, описывающих процесс [1, 2]. Это обусловлено в первую очередь сложностью моделирования и анализа процесса шлифования, обусловленные его многофакторностью (изучены и учитываются при проектировании более 200 факторов), стохастической природой строения рабочего слоя инструмента и, соответственно, процесса микрорезания вершинами зерен материала заготовки, невозможностью осуществления прямых измерений в зоне контакта инструмента с заготовкой, другие причины.

Выявление зависимости влияния наиболее значимых факторов на выходные показатели процесса шлифования является сегодня по-прежнему актуальной задачей, требующей своего решения. В научных исследованиях учеными широко используются методы и средства регрессионного анализа, позволяющие получить, как правило, эмпирические зависимости (систему уравнений) учитывающие 3–5 факторов, влияющих на выходные показатели процесса. Использование для оценки большего числа факторов приводит к усложнению экспериментальных планов и, соответственно, повышению трудоемкости проводимых экспериментов.

Сегодня известны результаты достаточно многочисленных исследований, посвященных изучению общих и локальных вопросов процесса обработки шлифованием в различных областях. Но создание обобщенного универсума зависимостей, позволяющего использовать для расчетов всю гамму элементов изученного факторного пространства, сегодня не представляется возможным вследствие различия подходов, условий проведения экспериментов, применяемых методик исследований.

2. Методы и результаты исследований

Для металлообрабатывающих предприятий решение задачи автоматизации проектирования шлифовальных операций является так же акту-

альной, в связи с высокими требованиями к качеству и экономической эффективности выпускаемых данной отраслью изделий.

Для решения подобных задач в условиях неопределенности, наличия большого числа факторов можно использовать искусственную нейронную сеть (ИНС), работающую по принципу биологических нейронов [3, 4]. Данная математическая модель не нуждается в определении и установлении каких-либо закономерностей моделируемого процесса. Напротив, нейронная сеть, после процедуры обучения, позволяет определить взаимозависимость входных факторов, а также их влияние на результаты моделирования (определяемые параметры).

ИНС представляет из себя множество простых нейронов, связанных между собой. Одним из главных плюсов ИНС является их простота, каждый нейрон представляет из себя сумматор функций активации весов. Как правило используются функции: Ферми, сигмоида и гиперболический тангенс. Вся суть настройки ИНС, заключается в ее обучении. Существует несколько видов обучения, но для задачи моделирования процессов шлифования необходимы методы обучения с учителем.

Обучение с учителем, подразумевает, что в качестве исходных данных используются заранее известные входные факторы модели и определяемые выходные параметры (это могут быть экспериментальные данные, результаты моделирования, прогностические оценки, математические расчеты и пр.). Затем формируется обучающее множество, которое состоит из входных данных и эталонных значений выходных параметров создаваемой математической модели. После выполнения прямого прохода (отправки входных данных из обучающего множества на вход ИНС), происходит сравнение полученного значения на выходе модели и эталонного значения из обучающей выборки. В зависимости от полученных ошибок, производится изменение весов связей между нейронами, т. е. осуществляется настройка ИНС.

В качестве типа ИНС, выбран перцептрон с нелинейной функцией активации, так как данный вид ИНС является подходящим для задач моделирования в сравнении с пороговым или однослойным перцептроном. Другие виды ИНС используются для других задач (например, нейронная сеть Кохонена отлично подходит для классификации входных данных). В качестве демонстрации и проверки эффективно-

сти ИНС моделировался процесс врезного круглого наружного шлифования. Далее представлен список факторов и выходных параметров, использованных для обучения ИНС.

В ходе исследования использовались следующие входные факторы: диаметр зерна, диаметр круга, высота круга, диаметр заготовки, скорость резания, скорость подачи заготовки, глубина шлифования. Выходные параметры: площадь контакта круга с заготовкой, средняя глубина шлифования с учетом площади контакта, площадь сечения стружек, средняя сила резания, момент шлифования, мощность шлифования.

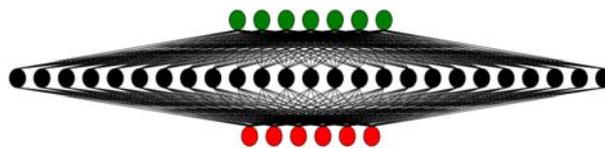


Рис. 1. Структура ИНС

На рис. 1 представлена структура полученной ИНС. Сверху обозначены входные нейроны (7 шт.), в середине – скрытые нейроны (25 штук), внизу – выходные нейроны (6 шт.).

В табл. 1 и 2 представлены экспериментальные входные и выходные данные, соответственно, использованные для обучения и проверки качества обучения ИНС.

Таблица 1

Входные обучающие данные ИНС (факторы)

Фактор	№ эксперимента							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр зерна, мм	2.085	2.085	2.085	2.085	2.085	2.085	2.085	1.765
Диаметр круга, мм	300	300	300	300	300	300	500	500
Диаметр заготовки, мм	3000	3000	3000	3000	3000	1600	1600	1600
Высота круга, мм	10	10	10	10	20	20	20	20
Скорость резания, м/с	0.157	0.157	0.157	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098
Скорость заготовки, м/с	0.005	0.005	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
Глубина резания заготовки, мм	10	5	5	5	5	5	5	5

Таблица 2

Выходные обучающие данные ИНС (параметры), соответствующие входным данным

Параметр	№ эксперимента							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Площадь контакта круга с заготовкой, мм ²	48.38	34.09	34.09	34.09	24.46	24.46	26.59	26.59
Средняя глубина шлифования с учетом площади контакта, мм	0.5805	0.2903	0.2903	0.2903	0.2903	0.5059	0.5059	0.5059
Площадь сечения стружек, мм ²	0.2631	0.1867	0.3343	0.5343	0.5343	0.5343	0.4143	0.2969
Средняя сила резания, Н	24.31	17.49	30.67	48.52	48.52	63.74	49.6	35.54
Момент шлифования, Н*м	14.6	10.4	18.61	29.73	29.73	29.73	38.44	27.54
Мощность шлифования, Вт	15.3	10.9	19.49	18.68	18.68	18.68	16.1	11.54

На рис. 2 представлен график обучения нейронной сети. На вертикальной оси (ординат) значение среднеквадратичной ошибки, вычисляемой по формуле, на горизонтальной оси (абсцисс) номер эпохи (итерации) обучения. По графику видно, что уже после 100-й итерации среднеквадратичная ошибка уменьшилась до 0.02.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где n – количество выходных параметров; x_i – i -е значение обучающей выборки; \bar{x} – значение выхода ИНС.

Для проверки качества обучения сравним экспериментальные данные второй выборки из табл. 2 с результатами моделирования, приведенными в табл. 3.

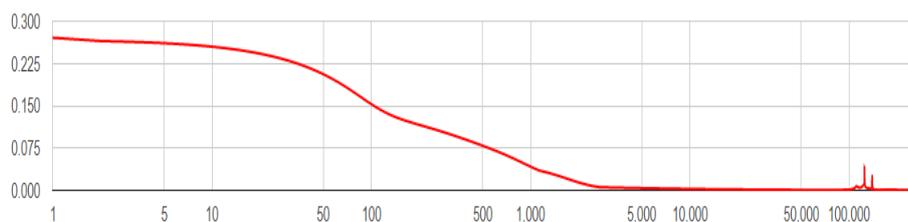


Рис. 2. График обучения ИНС. Отношение значения среднеквадратичной ошибки к номеру эпохи обучения

Таблица 3

Сравнение экспериментальных и смоделированных данных

Значения	1	2	3	4	5	6
Экспериментальные	34.09	0.2903	0.1867	17.49	10.4	10.9
Смоделированные	31.98	0.2892	0.1747	17.26	10.16	9.50
Отклонение	2.11	0.0011	0.0120	0.23	0.24	1.40

Различные величины полученных отклонений между экспериментальными и смоделированными данными обусловлены разной размерностью входных выборок. Избежать этого можно меняя объем входных данных, чтобы они имели примерно одну сопоставимую величину.

3. Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволяют использовать разработанную и обученную ИНС для моделирования, анализа, прогнозирования показателей процесса шлифования в изученной области факторного пространства, что является перспективным и актуальным направлением. Практическое использование разработанной ИНС в качестве математического ядра будет возможно после создания логики расчетов и интерфейса САПР с учетом поставленных задач компьютерного проектирования в той или иной области бизнес-процессов.

Таким образом, в ходе проведенных нами исследований были выполнены следующие задачи.

1. Разработана структура ИНС для изучаемого факторного пространства операций шлифования.

2. Проведено обучение разработанной ИНС с учителем.

3. Осуществлена проверка адекватности работы ИНС путем сравнения эмпирических и смоделированных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев, А. И. Повышение эффективности процесса шлифования труднообрабатываемых материалов путем применения специальных крупнопористых кругов из эльбора / А. И. Лебедев. – Санкт-Петербург: ЛМЗ-ВТУЗ, 2010. – 142 с.
2. Переладов, А. Б. Исследование статистико-вероятностных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 67–71.
3. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр. / С. Хайкин. – 2006. – 1104 с.
4. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссермен, 1992. – 184 с.

УДК 621.9

В. С. Селифонов, В. А. Хандожко, В. П. Матлахов

СТЕНД ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ И НАСТРОЙКИ СЕРВОПРИВОДОВ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Брянский государственный технический университет

E-mail: Vitalserg82@mail.ru, atsys@tu-bryansk.ru

В работе представлена конструкция стенда для изучения технологического программирования станков с ЧПУ, персонализации системы ЧПУ для определенного типа станка, разработки программы логики станка с ЧПУ, параметризации и настройки сервоприводов, изучения электроавтоматики станков.

Ключевые слова: металлорежущий станок, сервопривод, система ЧПУ, параметризация, настройка.

V. S. Selifonov, V. A. Handozhko, V. P. Matlahov

**STAND FOR PARAMETERIZATION AND CONFIGURATION
OF THE SERVO DRIVES OF MACHINE TOOLS WITH NUMERICAL CONTROL**

Bryansk State Technical University

The work presents the design of the stand for studying the technological programming of CNC machines, personalizing the CNC system for a particular type of machine, developing a program for the logic of a CNC machine, parameterizing and adjusting servo drives, studying the machine's electrical automatics.

Keywords: metal cutting machine, servo, CNC system, parameterization, adjustment.

Современный станок с ЧПУ представляет собой сложную технологическую машину, включающую в себя механическую часть, электромеханическую, гидравлическую, пневматическую, а также систему управления. Наличие разнообразного оборудования в составе станка с ЧПУ предъявляет высокие требования к квалификации обслуживающего персонала. Вопрос подготовки персонала решается в учебных центрах предприятия, оснащенных учебным оборудованием.

Наличие дорогостоящего оборудования в учебных центрах предприятия приводит к дополнительным затратам на его обслуживание и эксплуатацию. Кроме того, современное развитие производства стремится к созданию компактных станков, занимающих небольшую площадь в конструктивном исполнении имеющих минимум сложных механизмов и устройств. К такому оборудованию можно отнести станки для сверления печатных плат, для выполнения работ по гравированию и т. д. Кроме того, оборудование такого типа можно использовать для обучения обслуживающего персонала. С точки зрения проектирования станки данного типа можно изготовить из более простых конструктивных составляющих, например, в качестве направляющих можно использовать трубу прямоугольную, полученную прокатом и т. д. [1]. Изготовить станок данного типа также возможно и в лабораториях вуза.

В лаборатории кафедр «МСИИ» и «АТС» ФГБОУ ВО «БГТУ» был разработан стенд, предназначенный для изучения технологического программирования станков с ЧПУ, персонализации системы ЧПУ для определенного типа станка, разработки программы логики станка с ЧПУ, параметризации и настройки сервоприводов, изучения электроавтоматики станков.

При проведении анализа прототипов станка [2, 3] была выбрана компоновка, общий вид которой представлен на рисунке. Конструкция стенда разработана наглядно, чтобы студент

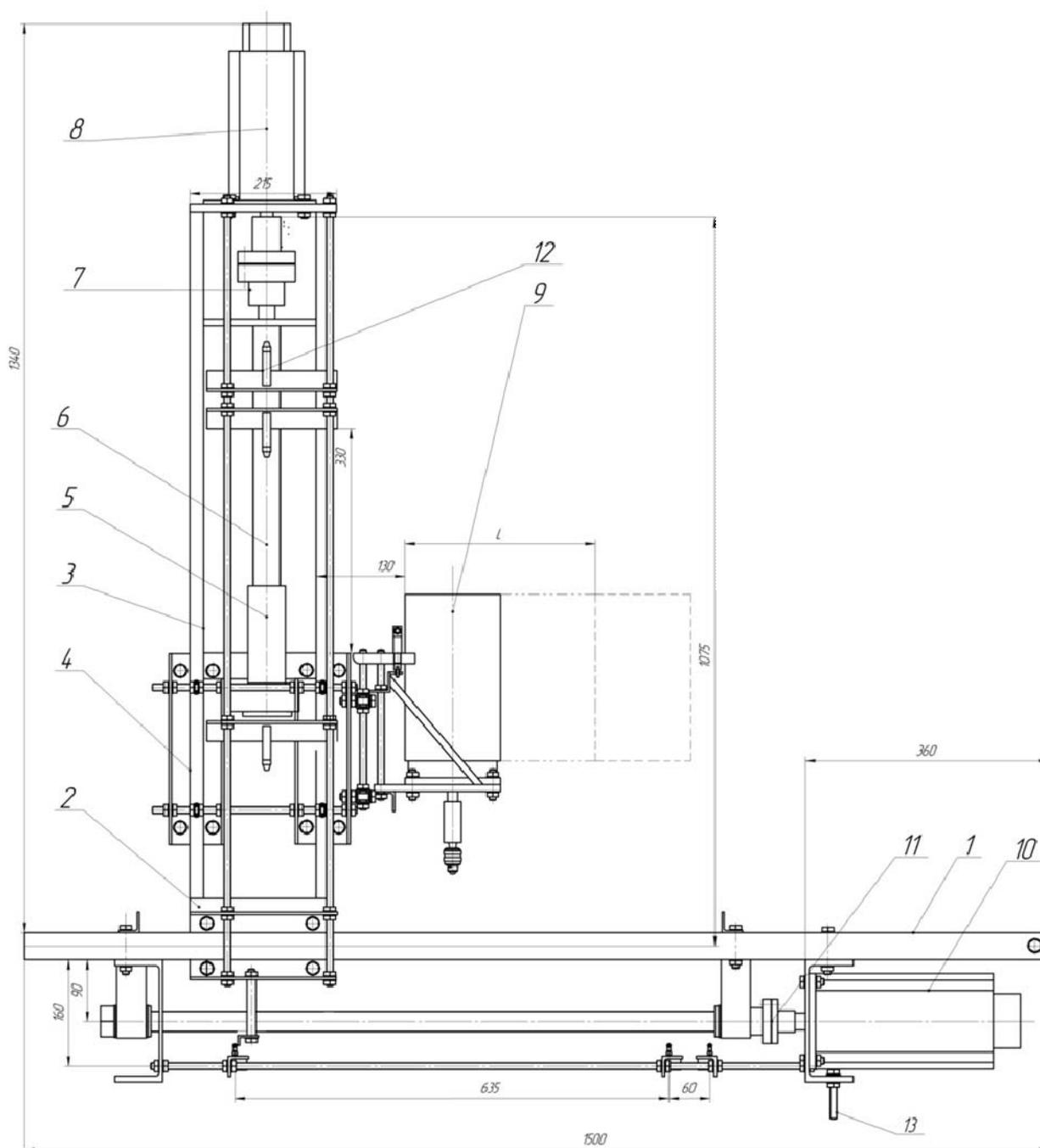
мог изучить составные узлы стенда, их установку на оборудовании. Стенд состоит из рамы нижней направляющей 1, которая механически соединена с основанием, выполненным из швеллера. По направляющим 1 в продольном направлении перемещается каретка привода оси X 2, на которой установлены вертикальные направляющие 3, по которым перемещается каретка привода оси Z 4 с направляющими продольного перемещения привода главного движения (ПГД). Перемещение рабочих органов осуществляется от вентильных серводвигателей модели KM-11-06.0-020 и NYS-165L-20-16.0 Z (на рисунке поз. 8 и 10). Крутящие моменты от данных двигателей передаются через муфты 7 и 11, соединяющие электродвигатели с ходовыми винтами данных приводов. ПГД данного станка включает в себя электродвигатель 9 модели MA 80 M H1, на выходном валу которого закреплен патрон для осевых инструментов с цилиндрическим хвостовиком.

Ограничение движения хода рабочих органов осуществляется концевыми выключателями 12 привода вертикального перемещения каретки. Кронштейны закреплены на шпильках, соединяющих каретку привода оси X 2 с верхним основанием каретки привода оси Z 4, на которой установлен двигатель вертикального перемещения 8. Аналогично осуществляется ограничения хода в продольном направлении.

Система числового программного управления стенда выполнена на базе отечественного УЧПУ фирмы «Балт-Систем» модели NC-310. Это система класса PCNC поддерживает стандартный G-код, язык программирования высокого уровня GTL, визуальное программирование. Корректность технологической программы проверяется с помощью встроенной системы визуализации. Благодаря гибкости базового программного обеспечения УЧПУ: механизма персонализации (характеризации) и универсальности аппаратной части оно может быть подключено к любому станку. Наличие стандартных интерфейсов USB и Ethernet позволяет

передавать технологическую программу, подготовленную в САМ-системе, с помощью FLASH-накопителя или с персонального ком-

пьютера. Стенд позволяет готовить технологическую программу сверлильного, расточного и фрезерного оборудования.



Общий вид стенда:

1 – рама нижняя направляющая; 2 – каретка привода оси X; 3 – вертикальные направляющие; 4 – каретка привода оси Z; 5 – гайка; 6 – ходовой винт; 7 – муфта; 8 – электродвигатель вертикального перемещения; 9 – электродвигатель ПГД; 11 – муфта; 12 – концевой выключатель; 13 – заземление

Для подготовки программиста по персонализации системы управления для определенного станка УЧПУ имеется механизм характеристики и интерфейс программы логики станка PLC.

Характеризация заключается в конфигурировании четырех файлов: FCRSYS, AXCFIL, PGCFIL и IOCFIL. Файлы характеристики состоят из секций, внутри которых размещают инструкции со значениями.

Файл FCRSYS – это файл системного уровня, в котором хранятся настройки связи областей памяти системы ЧПУ с файловой системой FLASH-диска, устанавливается связь сигналов УЧПУ с файлами сообщений оператору.

Файл AXCFIL содержит инструкции, задающие время опроса сигналов с датчиков перемещений, соответствие номеров цифро-аналоговых преобразователей управления движением определенным приводам, тип управляемой оси, наличие датчика, дискретность датчика положения, передаточное отношение механической передачи, скорость и ускорение быстрого перемещения, величину зазора, сухого трения, сигналы концевых выключателей.

Файл PGCFIL содержит инструкции по инициализации переменных процесса управления стандом – включение/отключение штурвала, блокировка/деблокировка осей и др.

Файл IOCFIL устанавливает связь сигналов программы логики станда с файлами характеристики. Программа логики через программный интерфейс PLC взаимодействует с аппаратными выходами УЧПУ. Язык PLC реализует алгоритмы управления стандом, такие как управление электроавтоматикой, блокировка перемещений

при возникновении аварии, сигнализация состояния оборудования на пульте оператора.

Для подготовки инженеров-электроников по наладке станков с ЧПУ стенд оснащен современными сервоприводами с компьютерным интерфейсом. Так, сервопривод CSD-DH имеет интерфейс RS-232, по которому производят параметризацию привода и настройку регуляторов скорости или положения. При параметризации задается тип серводвигателя и сервопривода, его основные характеристики.

В настоящее время стенд используется для обучения технологов-программистов станков с ЧПУ, наладчиков, отладки программ логики характеристики, настройки микропроцессорных электроприводов, научных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самодельный станок с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.vri-cnc.ru/> (дата обращения 15.06.2017).
2. Схиртладзе, А. Г. Оборудование машиностроительных предприятий : учеб. пособие / А. Г. Схиртладзе [и др.]. – Старый Оскол: Изд-во ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2013. – 167 с.
3. Ефремов, В. Д. Металлорежущие станки: учеб. для вузов / В. Д. Ефремов [и др.]; под общ. ред. П. И. Ящерицына. – 5-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: Изд-во ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2013. – 695 с.

УДК 621.91

В. А. Солодков, А. А. Ковалев, Д. М. Быченко

ОСОБЕННОСТИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВРЕЗАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Установлено отличие в формировании зоны стружкообразования при врезании со смазкой и врезании без смазки.

Ключевые слова: пластическое деформирование, зона стружкообразования, врезание, твердые смазки.

V. A. Solodkov, A. A. Kovalev, D. M. Bychenko

FEATURES OF CHIP FORMATION IN THE INCISION WITH USING SOLID LUBRICANTS

Volgograd State Technical University

A difference in the formation of the chip formation zone was found during the incision with solid lubricants and without it.

Keywords: plastic deformation, chip formation zone, incision, solid lubricants.

Одной из немногих работ, посвященных исследованию переходных процессов в зоне стружкообразования при врезании, является работа [1]. В этой работе получена количественная оценка деформации в зоне стружкообразования. Во

многом, результаты предшествующих исследований [2], а также настоящей работы и работы [1] совпадают. Например, в обеих работах установлено, что при врезании происходит постепенное нарастание силы резания, напряже-

ний, степени деформации, упрочненного состояния (оценивается величиной микротвердости) и длины контакта стружки с резцом, причем, для достижения каждой из этих характеристик своего установившегося значения требуется разное время. Однако, некоторые результаты, несмотря на близость, объясняются различными причинами. Так, по мнению авторов [1], наиболее характерной чертой переходного процесса стружкообразования является наличие в начале врезания максимальных сдвиговых деформаций, значение которых для соответствующих точек больше, чем при установившемся процессе. Иначе говоря, в период врезания существует глобальный максимум деформации в зоне стружкообразования. В исследованиях [3] также зафиксирована стадия, когда упрочнение, определенное по уровню микротвердости, максимально и превосходит устано-

вившееся резание. Однако, по мнению авторов в данном случае сходство является формальным. В исследованиях [1] резание производилось на микроскоростях, когда тепловыделения минимальны и поэтому в начальный момент, когда материал имеет температуру окружающей среды, достигалось предельное упрочнение для холодного материала. В настоящих исследованиях при высоких скоростях деформаций в зоне стружкообразования ($10^2 \dots 10^3$ 1/с [1]) температура достигает $200 \dots 250$ °С [4] и максимум упрочнения связан лишь с фактом двукратного деформирования.

Другим формально близким результатом является установленный факт постепенного расширения зоны деформации при врезании (рис. 1, [2]).

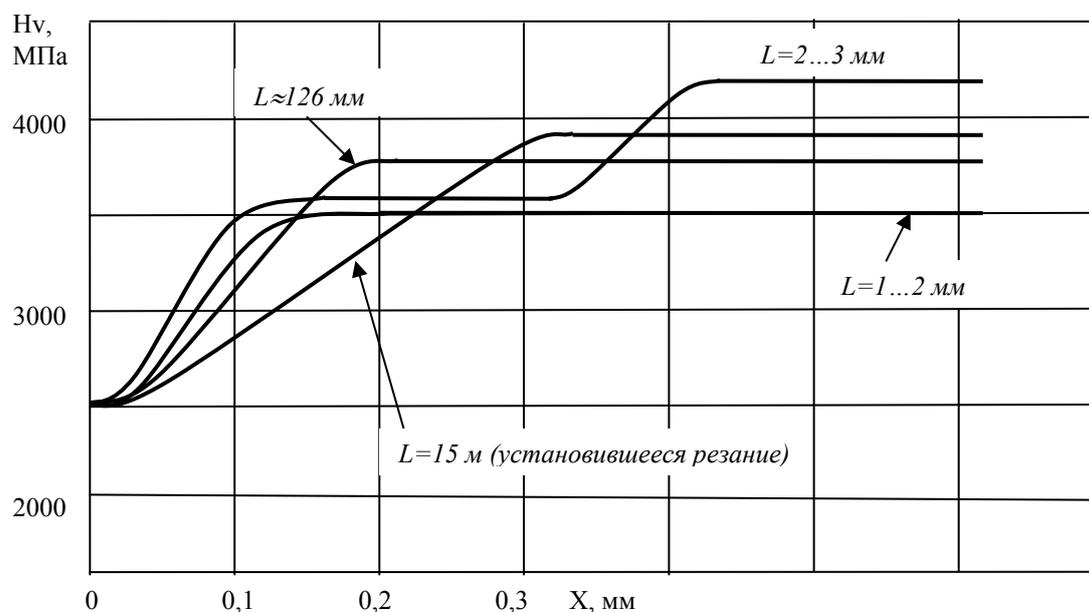


Рис. 1. Изменение микротвердости по ширине зоны стружкообразования при врезании без смазки (сталь 45 – ВК8, $Z = 135$ мкм, $V = 60$ м/мин, $S = 0,34$ мм/зуб)

Однако, учитывая, что в анализируемых исследованиях скорости деформации были близки к скоростям деформации при механических испытаниях, делается вывод, что ориентация условной плоскости сдвига при этом практически неизменна. Этот вывод ошибочно переносится в целом на процесс резания при реально применяемых скоростях резания. Так как настоящие исследования проводились в реальных условиях, при наличии контактного пластического деформирования на передней поверхности, то, как показано далее, при условиях врезания с образованием сливной стружки, поло-

жение условной плоскости сдвига и величина угла сдвига непрерывно меняются.

При прерывистом резании с применением твердых смазок динамика развития деформационных процессов в зоне стружкообразования значительно отличается. Причем нет принципиальных отличий в зависимости от вида смазки (в том случае, если она действует, предотвращая адгезионное схватывание по передней поверхности).

Как и без смазки, в начальный период врезания ширина зоны стружкообразования минимальна (рис. 2).

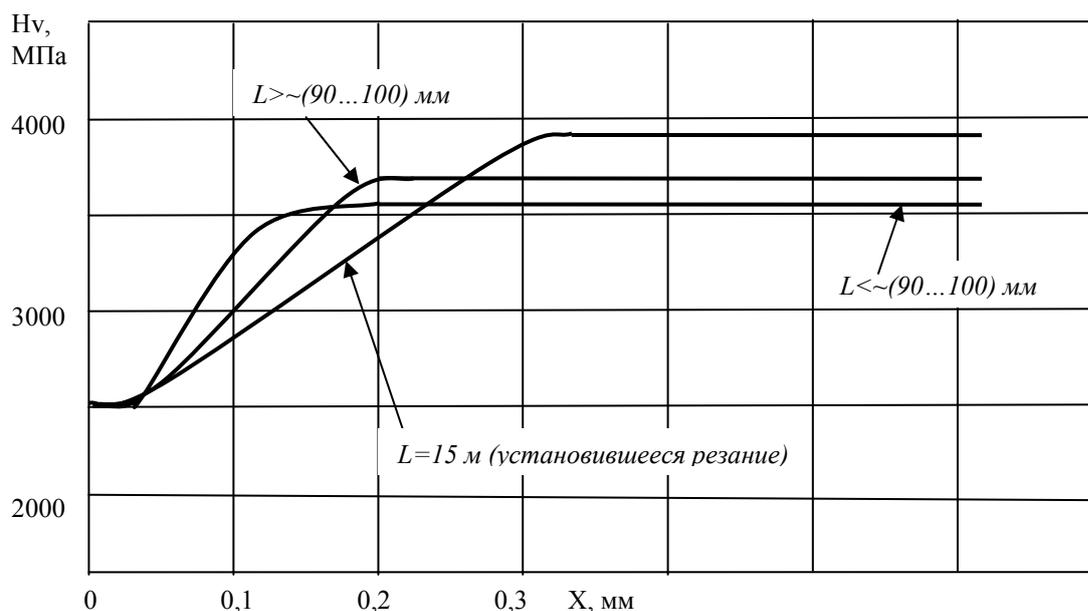


Рис. 2. Изменение микротвердости по ширине зоны стружкообразования при врезании со смазкой BaF₂ (сталь 45 – BK8, Z = 135 мкм, V = 60 м/мин, S = 0,34 мм/зуб)

При последующем резании ее ширина незначительно возрастает и остается стабильной на протяжении основной части рабочего хода, т. е. до тех пор, пока с исчезновением из контакта смазки не начинает формироваться зона контактных пластических деформаций. Другими словами, резкое расширение зоны, как это имеет место при резании без смазки, отсутствует. И после начала формирования зоны контактных деформаций ($L \sim 90 \dots 100$ мм) не наблюдается резкого изменения размеров зоны стружкообразования. Ее размеры в этот момент вновь плавно увеличиваются, и одновременно происходит ее поворот против часовой стрелки в сторону уменьшения угла сдвига. Это хорошо согласуется со взглядами о взаимосвязи процессов протекающих в контактной зоне и зоне стружкообразования [5]. Положение условной плоскости сдвига в соответствии с этими представлениями определяется отношением касательных напряжений в контактной зоне τ_k к касательным напряжениям в зоне стружкообразования τ_c , по следующей качественной формуле:

$$\beta = \pi/4 - A \lg \tau_k/\tau_c.$$

Поэтому, с развитием контактного взаимодействия и ростом τ_k , условная плоскость сдвига и должна поворачиваться против часовой стрелки. Причины же роста ширины зоны стружкообразования связаны с увеличением размеров участка упрочнения C_2 с концом ко-

торого и совпадает конечная граница зоны стружкообразования.

Таким образом, после исчезновения смазки, до конца рабочего хода, характер изменения основных характеристик зоны стружкообразования аналогичен тому, что имеет при резании без смазки. Однако величина основных характеристик несколько отличается. Так, например, при резании со смазкой (после ее исчезновения) зона не успевает достичь ширины зоны при резании без смазки. При этом упрочненное состояние на ее конечной границе так же ниже.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chandrasekaran H., Nagarajan R. Transient strains and chip formation during tool entry." Proc. Int. Cont. Prod. Eng. New Delhi, 1977, Vol.1." Calcutto., s. a., v/45- v/54.
2. Солодков, В. А. Особенности процессов пластического деформирования в зоне стружкообразования при врезании / В. А. Солодков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 10). – С. 65–67.
3. Солодков, В. А. Стружкообразование и контактное взаимодействие при врезании / В. А. Солодков, М. А. Тибиркова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 7). – С. 49–52.
4. Развитие науки о резании металлов / В. Ф. Бобров, Г. И. Грановский, Н. Н. Зорев и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с.
5. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

УДК 621.9.022.2

В. И. Алексейчук, О. А. Макарова, А. И. Банников
**ПОВЕРХНОСТЬ, ПОЛУЧАЕМАЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ
 ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЩЕТКОЙ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: aleksejchuk.v@yandex.ru

В статье рассматривается способ обработки толстостенной трубы большого диаметра цилиндрической однорядной щеткой и качество получаемой поверхности после обработки. Выявлена зависимость шероховатости поверхности трубы от числа оборотов вращения щетки.

Ключевые слова: качество поверхности, цилиндрические щетки, покрытие трубы, праймер, эпоксидный слой, слой полиэтилена.

*V. I. Alekseichuk, O. A. Makarova, A. I. Bannikov***THE SURFACE OBTAINED IN THE PROCESSING OF CYLINDRICAL BRUSH**

Volgograd State Technical University

In article is considered a way of processing of a thick-walled pipe of big diameter by a cylindrical single-row brush and quality of the received surface after processing. The dependence of roughness of a surface of a pipe on the speed of rotation of a brush is revealed.

Keywords: quality of a surface, cylindrical brushes, pipe covering, primer, epoxy layer, polyethylene layer.

Поверхность нефтегазовых сварных труб большого диаметра чаще всего покрывается двумя изоляционными слоями: праймер – эпоксидный слой и слой полиэтилена. Такое покрытие позволяет сохранять поверхность трубы от воздействия внешних сред и продлевать ее эксплуатационный срок.

Актуальной проблемой в данной области является качество получаемой поверхности на конце трубы после его обработки, которая заключается в удалении полиэтиленового покры-

тия цилиндрической однорядной щеткой, не повредив праймер.

Одним из важных параметров определения качества обработки является микрогеометрия поверхности. По техническим условиям праймер должен быть полностью очищен от полиэтилена и не иметь повреждений на поверхности.

Целью исследования является изучить поверхность получаемую после обработки цилиндрической щеткой на 700 об/мин.

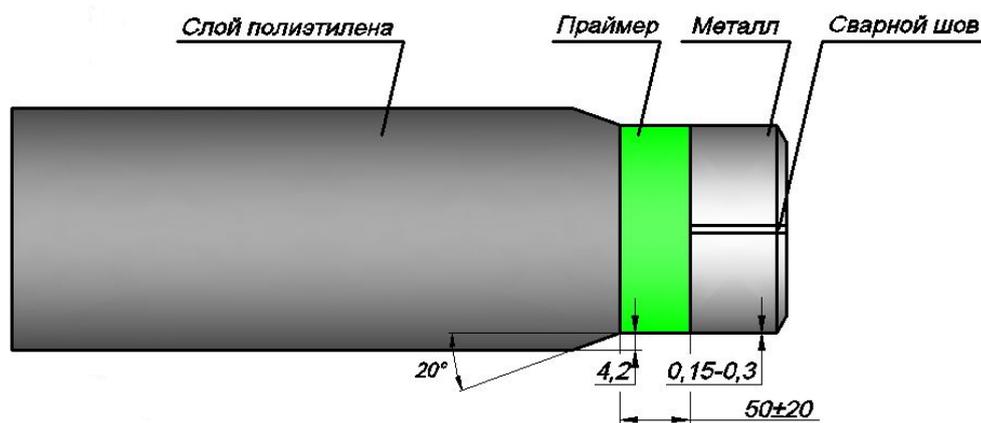


Рис. 1. Внешний вид прямошовной толстостенной трубы большого диаметра после обработки

При производстве прямошовных толстостенных труб большого диаметра должен соблюдаться большой ряд технических условий, такие как: геометрические параметры слоев праймера и полиэтилена, а также существуют

жесткие требования к виду и качеству слоя праймера (рис. 1) [1]. Поверхность эпоксидного слоя не должна быть меньше заданной толщины, а поверхность праймера должна оставаться чистой, без следов полиэтилена.

Для обработки края трубы нами был предложен новый инструмент: цилиндрическая однорядная щетка. Из-за большого количества режущих кромок цилиндрическая однорядная щетка может вычистить поверхность края трубы от полиэтилена. Если взять мягкую однорядную щетку (со стальной проволокой толщиной 0,2–0,3 мм), то она не будет повреждать праймер, обеспечивая при этом высокое качество поверхности. Щетка будет иметь высокую износостойкость и большой период работоспособности за счет применения именно стальной гибких элементов.

Эксперимент производился на четырех частотах вращения шпинделя: 630, 700, 800 и 900 об/мин. При этих оборотах происходило снятие полиэтилена. Но для более детального изучения был применен профилометр (рис. 2), который показал реальный профиль поверхности после обработки.

Так как «наилучшая» поверхность была получена при 700 об/мин рассмотрим получение данные с профилометра (рис. 2).

При числе вращения шпинделя 700 об/мин обработка при проведении эксперимента происходила за два прохода. При данном числе обо-

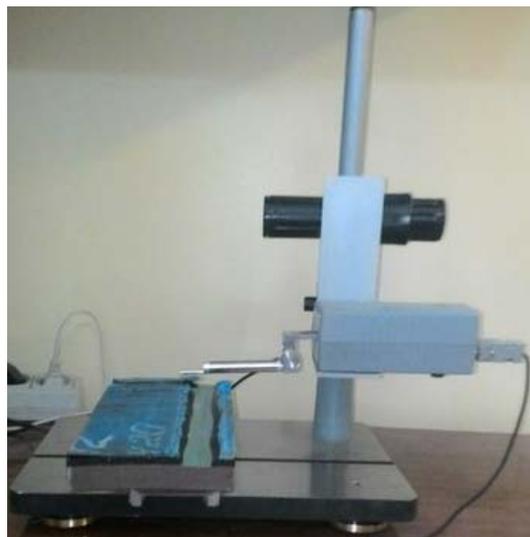


Рис. 2. Внешний вид профилометра модели 130

ротов происходило не только полное очищение поверхности, но и ее полировка, что полностью соответствует техническим условиям. Именно данного эффекта поверхности и нужно добиваться при обработке труб большого диаметра. Профилограмма получилась сглаженной (рис. 3), без высоких впадин и выступов, что подтверждает высокое качество.

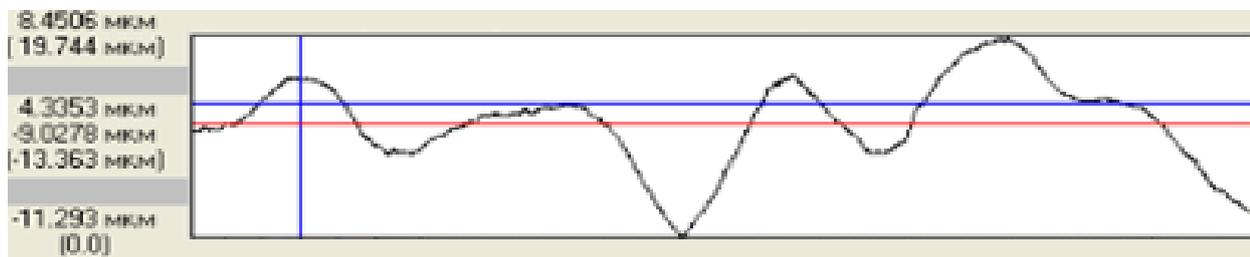


Рис. 3. Профилограмма при 700 об/мин

Для более детального исследования проводилось сравнение основных параметров шероховатости, ГОСТ определяет 6 параметров, которыми можно указать при постановке требований к получаемой поверхности, их назначают в зависимости от требований к готовому изделию и условий дальнейшей эксплуатации. Данные параметры определяют возможность характеризовать практически все показатели качества изделий, зависящие от шероховатости поверхности и обеспечить значения выбранных параметров соответственно технологическим процессам. Рассмотрим основные параметры, которые получились при обработке.

По техническим условиям среднее арифметическое по всей поверхности (Rz) не должно пре-

Основные показатели шероховатости

Показатели шероховатости	ГОСТ 10704–91	Число оборотов шпинделя, об/мин
		700
Ra	10,0	1,98
Rz	11,0	5,39
Rmax	26,0	11,4
Sn	2000	1060
Sm	100	38
t _p	500	32,9

вышать 11 мкм. При обработке на 700 об/мин данный показатель не превышен, что говорит о «высоком качестве» получаемой поверхности. А так же остальные 5 показатели не пре-

вышают значения ГОСТа, что свидетельствуют о «качественной» поверхности после обработки щеткой.

В ы в о д

Исследования микрогеометрии поверхности при удалении слоя является цилиндрической однорядной щеткой выявили, что наиболее качественная поверхность получается при 700 об/мин, при этом обработка осуществляется за два прохода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочный каталог продукции компании Osborn «Линия продуктов для профессионального применения, PRO каталог» // Компания Osborn- 2014-10с.
2. Справочный каталог продукции компании Osborn «Практические решения для трубопроводной отрасли» // Компания Osborn-2014-С 25-29.
3. ГОСТ 10704–91 Трубы стальные электросварные прямшовные, Сортамент (с Изменениями N 1, 2). – М. : ИПК Изд-во стандартов (переиздан 2007). – 24 с.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 681.51.621.65.02

Д. П. Гаврилов, В. Г. Барабанов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫМ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведен анализ систем управления криогенных насосных агрегатов. Разработана принципиальная схема и алгоритм управления криогенным насосным агрегатом с применением преобразователя частоты (ПЧ). На основе данного алгоритма создано программное обеспечение для проектируемой микропроцессорной системы.

Ключевые слова: криогенный насос, преобразователь частоты, программа управления, программируемый логический контроллер (ПЛК).

D. P. Gavrilov, V. G. Barabanov

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM OF THE CRYOGENIC PUMP UNIT

Volgograd State Technical University

The analysis of the control systems of cryogenic pumping units. Developed to a schematic diagram of a control algorithm cryogenic pump unit with the use of the frequency converter (FC). On the basis of this algorithm the software developed for the designed microprocessor system.

Keywords: cryogenic pump, frequency converter, control program, programmable logic controller (PLC).

Для автоматизированного управления криогенными насосными агрегатами (поршневыми или центробежными) для перекачки жидкого азота, аргона, кислорода, а так же других криогенных жидкостей в системах промышленного назначения используются специализированные автоматизированные системы управления (АСУ) [1].

Разрабатываемая АСУ криогенным насосным агрегатом является многофункциональной системой, обеспечивающая непрерывный контроль и управление процессом перекачки криогенной жидкости из стационарных или мобильных резервуаров [2].

Автоматизированная система управления криогенными насосами обладает следующими функциональными возможностями:

- Обеспечение подачи электрического питания (380В, 50Гц) двигателя насосного агрегата, датчиков, исполнительных устройств и других компонентов насосного агрегата. Защита двига-

теля насоса от перегрузок и токов короткого замыкания.

- Измерение, отображение и контроль: силы тока статора двигателя; давления на выходе из насоса; температуры на входе, на выходе из насоса (защита по кавитационному срыву); температуры уплотнения насоса (защита по разгерметизации).

- Управление насосным агрегатом с помощью сенсорной семидюймовой панели оператора или с верхнего уровня АСУ по RS-485 Modbus RTU.

- Плавный пуск и останов двигателя насосного агрегата.

- Плавное частотное регулирование вращения двигателя насоса с помощью панели оператора в ручном режиме или в автоматическом режиме по заданному алгоритму [3].

- Отображение моточасов за текущий период работы, за время работы в прямом и обратном направлении и общее время работы за весь период.

• Архивирование данных и запись на энергонезависимую карту памяти.

• Универсальность для всех типов насосных агрегатов (небольшие изменения в элементной базе и в программном обеспечении) [4].

В процессах заправки, хранения и выдачи криогенной жидкости очень важную роль игра-

ет безопасность и отказоустойчивость каждого элемента системы [5]. Именно поэтому желательно исключить человеческий фактор, а доверить управления надежной системе автоматизированного управления [6].

Схема разработанной АСУ хранения и выдачи криогенных жидкостей представлена на рис. 1.

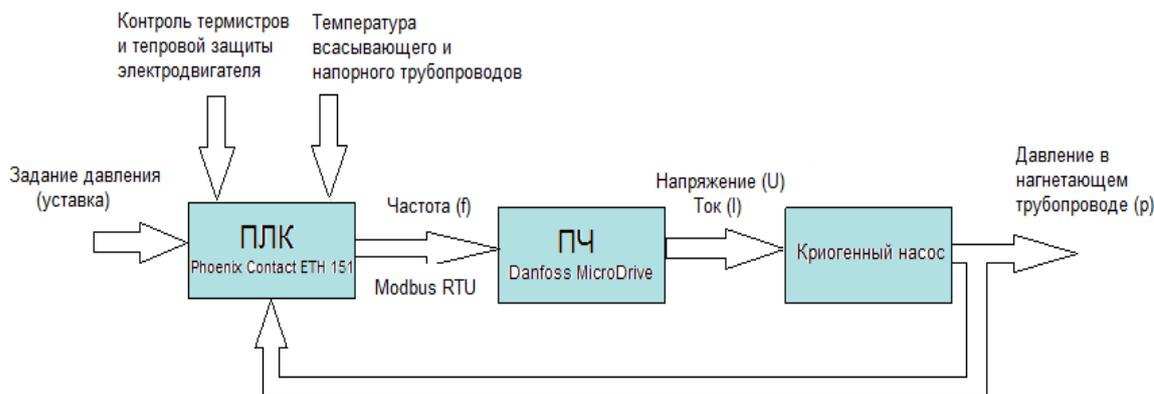


Рис. 1. Структурная схема системы

Для программной реализации данного алгоритма был использован программный пакет PC WORKS для программируемых логических контроллеров (ПЛК) Phoenix Contact. Для создания интерфейса панели оператора была использована среда Easy Builder Pro для программирования панелей оператора Weintek. Программа для управления криогенным насосным агрегатом написана на языках FBD и ST стандарта МЭК 61131. Рас-

смотрим работу разработанного функционального блока регулятора температуры газа (рис. 2). Для быстро изменяющегося параметра (температуры газа) ПИД регулирование применяется только в зоне, близкой к уставке. В остальных зонах регулятору задается значение необходимой мощности (в % от максимальной). При резком падении температуры регулятору сразу задается максимальная мощность.

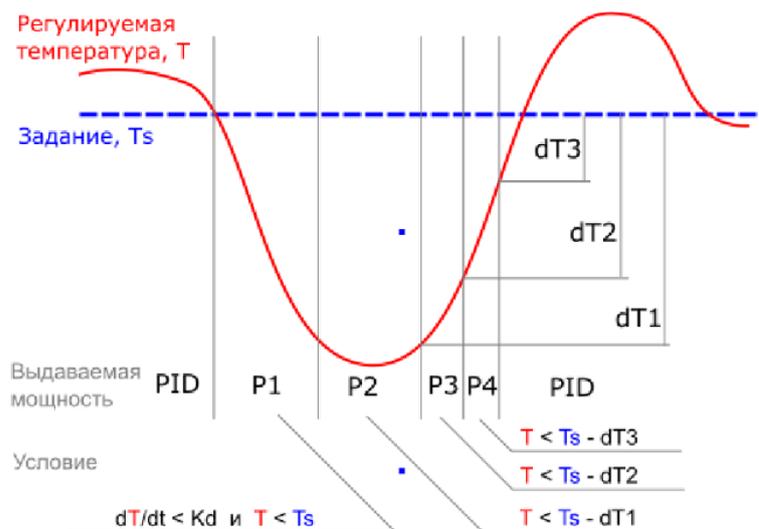


Рис. 2. Принцип работы регулятора температуры

Настраиваемые параметры (рис. 2):

- K_p – пропорциональная составляющая;
- T_i , с – интегральная составляющая;
- T_d , с – дифференциальная составляющая;

- Мощность P1, %;
- Мощность P2, %;
- Мощность P3, %;
- Мощность P4, %;

– K_d , °C / 10 с – скорость изменения температуры для установки P1;

– $dT1$, °C – разница текущей температуры от уставки для установки мощности P2;

– $dT2$, °C – разница текущей температуры от уставки для установки мощности P3;

– $dT3$, °C – разница текущей температуры от уставки для установки мощности P4.

Используя средства визуализации, разработанную программу можно представить на панели оператора. Главный экран программы изображен на рис. 3.

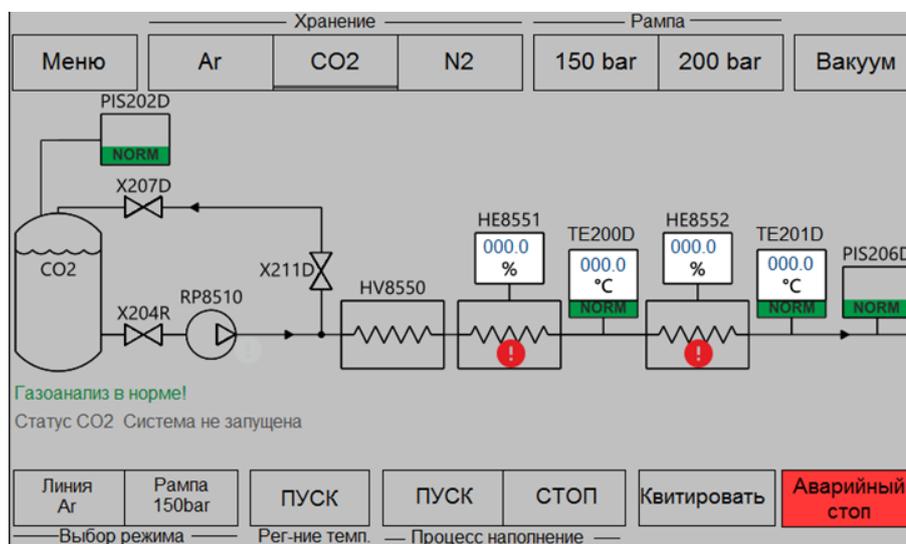


Рис. 3. Главный экран программы

Применение ПЛК и разработанной программы значительно расширяют возможности рассматриваемой установки. Панель оператора позволяет упростить управление и повысить его качество, благодаря отображению архивов аварий и графиков основных параметров криогенного насосного агрегата [7]. Разработанный алгоритм регулирования температуры газа позволяет подавать газ потребителю с заданными параметрами.

В дальнейшем планируется усовершенствовать данную систему управления введением новых компонентов системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баринов, А. В.* Компания «CRYOSTAR» укрепляет лидирующие позиции в мировом криогенном машиностроении / А. В. Баринов, Г. К. Лавренченко // Технические газы. – 2015. – № 3. – С. 64–72.

2. *Архипов, В. Т.* Разработка малогабаритного крио-

генного насоса для перекачки жидкого азота / В. Т. Архипов, С. И. Бондаренко, И. Н. Кудрявцев // Инженерная физика. – 2005. – № 2. – С. 21–25.

3. *Петров, Д. Н.* Регулируемый привод в насосных установках / Д. Н. Петров, Ю. В. Сербин // Силовая электроника. – 2005. – № 4. – С. 27–30.

4. *Петров, Д. Н.* Применение современных преобразователей частоты / Д. Н. Петров, Ю. В. Сербин // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 8–11.

5. *Левин, И. В.* Применение насосов компании «CRYOSTAR» в эффективных газовых технологиях и криогенном оборудовании / И. В. Левин, Б. М. Машункин, В. Н. Уткин // Технические газы. – 2010. – № 1. – С. 69–72.

6. *Уткин, В. Н.* Высокоэффективные криогенные насосы для технологий производства и использования технических газов / В. Н. Уткин // Технические газы. – 2007. – № 4. – С. 65–69.

7. *Барабанов, В. Г.* Использование программного комплекса CoDeSys для разработки системы автоматического управления насосной установкой с применением преобразователя частоты / В. Г. Барабанов, Д. П. Гаврилов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 103–105.

УДК 621. 922

*С. С. Грачев, А. Б. Переладов***ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ШЛИФОВАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ
ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ****Курганский государственный университет**

E-mail: tp@kgsu.ru

В статье изучено применение шлифовальных операций при производстве деталей трубопроводной арматуры, имеющиеся особенности, требования к качеству обработки и причины брака готовых деталей. Были проведены исследования производства, по результатам которых был сделан вывод о необходимости использования систем автоматизированного проектирования при назначении и расчете элементов факторного пространства режимно-инструментального оснащения операций алмазно-абразивной обработки. Изучение предложений на рынке технологических САПР позволило выбрать наиболее подходящий программный продукт для эффективного информационного обеспечения и осуществления расчетов оптимальных параметров структуры шлифовального круга и режимов его работы. В статье приведено описание используемой при проектировании САПР «Шлифдизайн», содержание имеющихся разделов для проектирования: информационный справочник, расчет операций шлифования, проектирование и планирование производства абразивного инструмента. В качестве примера проектирования описана операция по схеме плоского шлифования заготовки детали «седло» (сталь 20X13) задвижки трубопроводной арматуры на шлифовальном станке PSGS-2550АН. Предложен критерий оптимизации режима обработки для достижения режима самозатачивания, основанный на использовании оригинальных математических зависимостей, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований. Приводятся описание хода проектирования и результаты расчета операции шлифования.

Ключевые слова: шлифовальная операция, система автоматизированного проектирования, трубопроводная арматура, качество обработки.

*S. S. Grachev, A. B. Pereladov***APPLICATION OF MEANS OF AUTOMATED DESIGN
OF GRINDING OPERATIONS IN THE MANUFACTURING
OF PIPELINE VALVE DETAILS****Kurgan State University**

In the article, the application of grinding operations in the manufacture of parts of pipe fittings, available features, quality requirements treatment and causes of defects in finished parts. Studies have been conducted production, the results of which the conclusion was made about the need to use computer-aided design with the purpose and calculation of the elements of the factor space regime-tooling of the operations of diamond-abrasive processing. The study offers on the market engineering CAD software allowed us to choose the most appropriate software for effective communication and implementation of optimal structure parameters of the grinding wheel and operating modes. The article presents the description used in the design of CAD "Selfdesign", the contents of the existing partitions for the design: a directory of information, calculation of grinding operations, the design and planning of production of abrasive tools. As an example, the design described operation according to the diagram surface grinding billet parts "saddle" (a 20X13 steel) gate valve pipeline valves on a grinding machine PSGS-2550АН. The proposed optimization criterion of the processing mode to achieve the mode of self-sharpening based on the use of original mathematical relationships derived during theoretical and experimental research. Given the description of the design and results of the calculation of the specific grinding operation.

Keywords: grinding operation, automated design system, pipeline fittings, processing quality.

Введение

Трубопроводная арматура (ТПА) – неотъемлемая часть любой трубопроводной транспортной (технологической, обеспечивающей и др.) системы. В основном ТПА, это устройства, устанавливаемые на трубопроводах, агрегатах, сосудах, предназначенные для управления (отключения, распределения, регулирования, сброса, смешивания, фазоразделения) потоками перемещаемых сред (жидкой, газообразной, газо-

жидкостной, порошкообразной, коллоидных растворов и т. п.) путем изменения площади проходного сечения потоков и их перенаправления. Расходы на ТПА составляют, в среднем, 10–20 % от общей суммы капитальных вложений на создание трубопроводных систем и эксплуатационные затраты.

При работе арматура подвергается различным воздействиям: высоким и низким температурам, давлениям, вибрациям, влиянию аг-

рессивных сред и т. д. ТПА работает зачастую в удаленных районах, что затрудняет ее обслуживание и ремонт, делает их более затратными. Поэтому производство ТПА имеет свою специфику: повышенные требования к качеству изготовления, эксплуатационным показателям, широкое использование при изготовлении легированных износостойких труднообрабатываемых материалов, набор типовых технологических операций, применяемого специального инструмента, оборудования и т. д.

Постоянно совершенствуются и появляются новые технологии, обрабатываемые материалы, которые требуют адаптации в производстве путем определения их оптимальных параметров.

1. Анализ производства изделий ТПА

Одной из наиболее значимых технологических операций, в значительной степени формирующей качество изготавливаемых изделий является шлифование. Шлифованию подвергаются, например, резьба крепежных шпилек большого диаметра, резьба и цилиндрическая поверхность шпинделей задвижек, уплотнительные поверхности корпуса и затвора задвижек, другие детали. Шлифование обеспечивает повышение надежности работы и увеличение срока службы трубопроводной арматуры. Одними из самых распространенных операций являются плоское шлифование соединительных поверхностей деталей арматуры, таких как фланец, седло, затвор. Материалы, используемые для их изготовления, должны обладать достаточно противоречивыми характеристиками: износостойкостью, упругостью, прочностью, иметь антифрикционные свойства в достаточно широком диапазоне рабочих температур (от минус 60 до плюс 550 градусов по шкале Цельсия). Материалы с подобными свойствами имеют обычно пониженную обрабатываемость, что отрицательно сказывается на производительности и качестве шлифования и требуют тщательного подхода к проектированию операций.

Детали ТПА, подлежащие шлифованию, до этого, как правило, проходят уже все операции механической и термической обработки. Поэтому брак на стадии шлифования особенно не желателен. Необходимо иметь ясное представление о всех видах брака (дефектов) и причинах его вызвавших, уметь принять правильные меры по устранению причин.

Основные виды дефектов при шлифовании:

– прижоги на шлифуемой поверхности заготовки;

– снижение твердости шлифуемого материала;

– наклеп шлифуемой поверхности;

– высокая шероховатость;

– положительные (растягивающие) внутренние напряжения, приводящие к образованию трещин при изготовлении или в процессе эксплуатации изделия;

– отклонение от требуемого размера или заданной формы шлифуемой поверхности.

Кроме того, при обработке, необходимо обеспечивать требуемые производительность и другие показатели процесса шлифования, например, стойкость инструмента, его расход, силы, мощность и температуру резания и т. д. Обеспечение требуемых показателей и результатов шлифования является важной задачей проектирования.

Высокая температура при шлифовании, оказывает отрицательное воздействие на шлифованную поверхность (образуются трещины, прижоги, снижается твердость шлифованных поверхностей), например, в результате слишком высокой твердости круга. При выявлении данной проблемы необходимо сменить круг на более мягкий. Чрезмерно большая окружная скорость круга тоже является причиной прижога. При устранении данной проблемы необходимо снизить скорость резания или подобрать круг меньшего диаметра, возможно в сочетании с увеличением продольной подачи и глубины шлифования. Так же прижоги могут появляться при не достаточном охлаждении шлифуемой детали, устранить которые можно увеличив способ и расход подачи СОТС в зону резания, применением более качественных СОТС. Шлифовочные трещины при шлифовании деталей из легированных сталей и твердых сплавов образуются при неправильном выборе шлифовального круга, либо от некорректно назначенных режимов шлифования, которые требуют обоснованного изменения. Выявление таких трещин осуществляется чаще всего цветной дефектоскопией и магнитно-порошковой дефектоскопией с использованием специальных оптических приборов (микроскопов).

Так же распространена проблема чрезмерной шероховатости поверхности при шлифовании, причинами которой могут являться: неправильно подобранные: режимы обработки, режимы и способ правки круга, большая зернистость круга, затупление его рабочей поверхности, недостаточно очищенная СОТС и другие.

2. Использование САПР при проектировании операций шлифования

Для решения вышеуказанных проблем обеспечения качества обработки при осуществлении шлифовальных операций требуется правильное назначение характеристик шлифовального инструмента и режимов его применения, что можно достичь только с использованием научно обоснованных методик численного расчета и созданных, на их основе, специализированных САПР. Одним из путей рационального применения инструмента является обеспечения его работы в режиме самозатачивания, что позволяет, во многих случаях, обеспечить максимальную стойкость инструмента и качество обработки.

В настоящее время САПР шлифовальных операций на предприятиях изготавливающих ТПА не применяются (на предприятиях нашего региона о применении подобных САПР информация не обнаружено), хотя задача снижения себестоимости, обеспечения качества и производительности обработки деталей стоит достаточно остро, по причине того, что к ним предъявляются повышенные требования в процессе эксплуатации.

Как известно, применение САПР операций механической обработки значительно увеличивает (оптимизирует) производительность обработки, снижает время проектирования операций, повышает качество изготавливаемых деталей

С учетом вышеизложенного, можно сделать вывод, что разработка и использование средств автоматизированного проектирования для шлифовальных операций при изготовлении деталей ТПА является актуальной задачей.

В качестве примера, как средство автоматизации проектирования была рассмотрена САПР, разработанная на кафедре автоматизации производственных процессов Курганского госуниверситета ООО «Шлифдизайн», при помощи которой и был осуществлен анализ операций шлифования. САПР с одноименным названием «Шлифдизайн» создана для специалистов предприятий производителей и потребителей абразивного инструмента (разрабатывалась по договору с Фондом содействия разви-

тию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям)). Площадкой для исследования операций шлифования было выбрано предприятие ЗАО «Курганспекарматура» (г. Курган).

САПР представляет собой сайт, расположенный на сервере с возможностью интерактивной работы с ним пользователя в удаленном режиме с использованием облачных технологий. Система «Шлифдизайн» имеет три базовых функциональных модуля: 1. Информационный справочник. 2. Расчет операций шлифования. 3. Проектирование и планирование производства абразивного инструмента. Первый модуль позволяет оперативно получить (найти) необходимую справочную информацию из имеющихся в справочнике файлов или с использованием гиперссылок на актуальные интернет-ресурсы. Второй модуль предназначен для определения оптимальных статических характеристик шлифовального инструмента для имеющихся условий обработки, назначения и коррекции режимов шлифования, получения расчетных данных об основных показателях процесса обработки. В третьем модуле имеются возможности по расчету показателей, относящихся к проектированию технологии и организации производственного процесса изготовления шлифинструмента на предприятиях – изготовителях абразивного инструмента.

Работа в САПР «Шлифдизайн» осуществляется в сети «Интернет». При вводе электронного адреса сайта открывается стартовое окно программы (рис. 1). Расчет показателей операций осуществляется с использованием 2-го модуля САПР путем выбора требуемой схемы обработки, соответствующей реальной схеме шлифования (рис. 2, 3).

Для расчета показателей процесса шлифования заполняется приложенная таблица (рис. 4), в которую заносят все данные об инструменте (размеры инструмента, марка материала и зернистость абразивных зерен, структура, тип и прочность материала связки), заготовке (форма, размеры шлифуемой поверхности, материал) и режимы обработки.

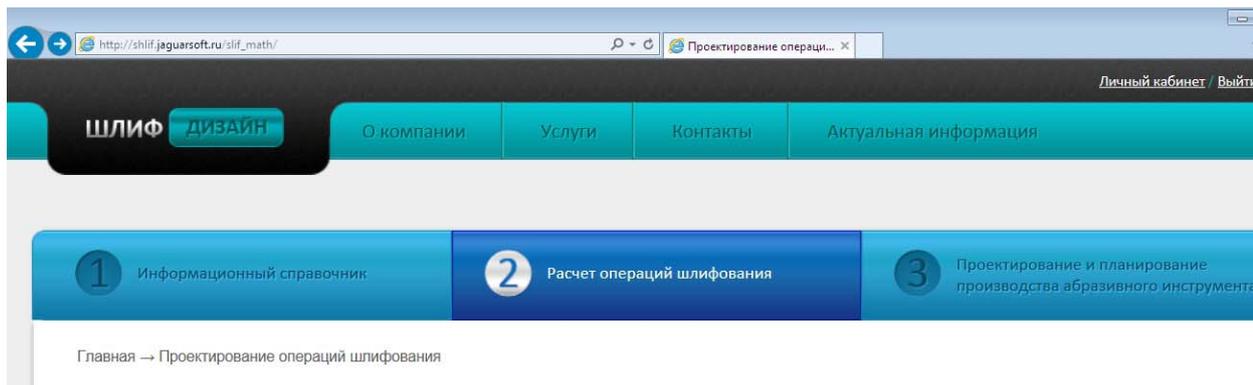


Рис. 1. Стартовое окно программы САПР «Шлифдизайн»

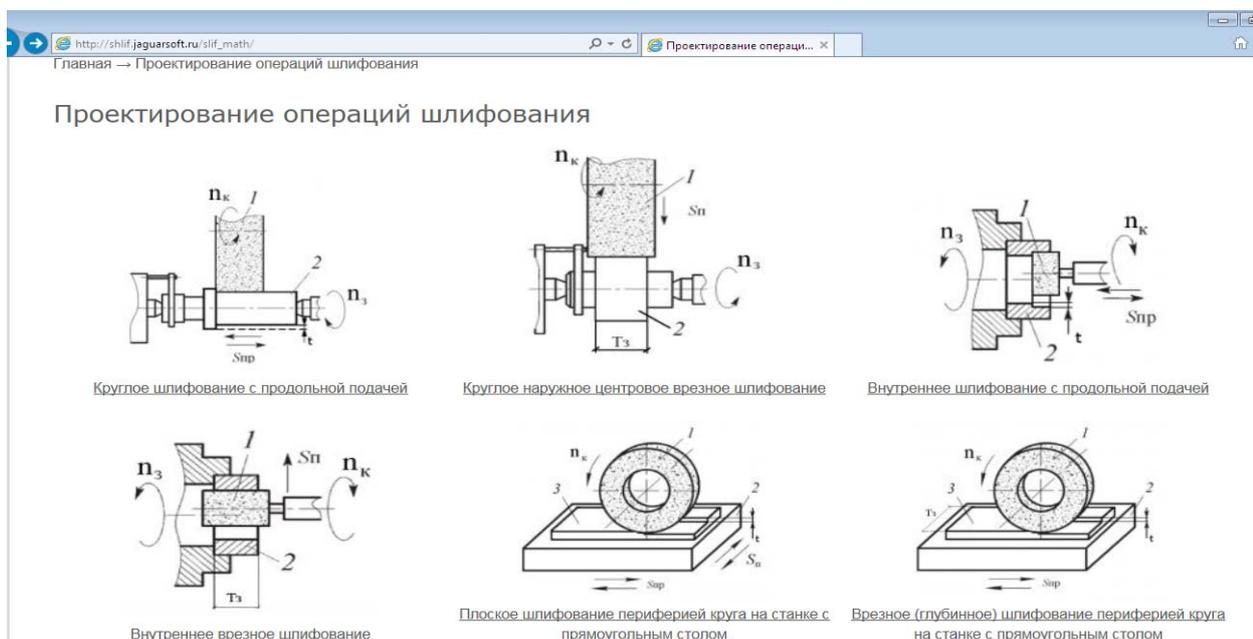
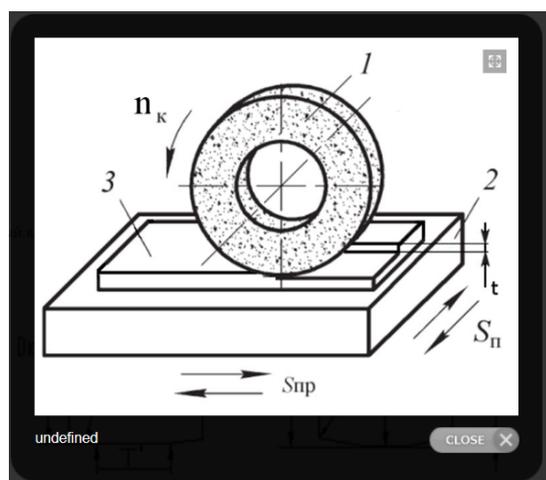


Рис. 2. Пример расчетных схем обработки



а



б

Рис. 3. Пример изображения расчетной схемы плоского шлифования заготовки детали «седло» в САПР «Шлифдизайн» (а) и рабочей зоны шлифовального станка PSGS-2550AH с установленной в приспособлении заготовкой из стали 20Х13 (б): 1 – шлифовальный круг; 2 – рабочий стол станка; 3 – шлифуемая заготовка детали; n_k , $S_{шп}$, $S_п$, t – скорость вращения шлифовального круга, продольная и поперечная подачи, вертикальная подача (глубина шлифования) соответственно

Данные для расчета

Параметр	Данные	Размерность
Характеристики и размеры шлифовального круга		
Зернистость (FEPA)	F60	ячеек/дюйм
Средний диаметр зерна	0.26	[мм]
Структура	4	
Твердость	M(C1)	
Диаметр круга, D	400	[мм]
Высота круга, T	40	[мм]
Предельное напряжение связи при растяжении, σ_b	60	[МПа]

Рис. 4. Фрагмент таблицы с исходными данными для расчета

Результаты расчета по программе: длина и площадь контакта круга с заготовкой, параметры срезаемых стружек, силы резания единичные (на единичных зернах) и интегральные (на всех активных зернах, одновременно находящихся в зоне резания), мощность шлифования и другие данные приведены в таблице, изо-

браженной на рис. 5. Все расчеты по программе осуществлялись с использованием математических зависимостей, полученных в ходе компьютерного моделирования структуры рабочего слоя шлифовального инструмента и процесса микровзаимодействия вершин активных режущих зерен с заготовкой при шлифовании [1].

Результаты расчета

Геометрические параметры	
Длина контакта круга с заготовкой	4.47222912974 мм.
Площадь контакта круга с заготовкой при $R_{изн}=0$	53.6667 мм ² .
Площадь контакта круга с заготовкой при $R_{изн}=400.0025$	62.0183 мм ² .
Максимальный радиус износа $R_{изн\ max}$	4000.025 мм.
Текущий радиус износа $R_{изн}$	400.0025 мм.
Средняя глубина шлифования с учетом площади контакта	0.028989 мм.
Ширина срезаемых стружек при средней площади сечения срезов зернами	0.00857
Площадь сечения стружек при $R_{изн} = 0$	3.7×10^{-5} мм ²
Средняя площадь сечения стружек при $R_{изн} = 400.0025$	3.7×10^{-5} мм ²
Комплексные показатели работы круга	
По рассчитанным параметрам контаката круга и заготовки	0.000267633
По технологической (назначенной) глубине шлифования	0.000351488
Силовые характеристики процесса	
Прочность удержания зерна	1.383 Н.
Средняя сила резания	1.06 Н.
Момент шлифования	0.214 Н*м
Мощность шлифования	1.302 Вт.
Необходимая мощность привода станка	1.447 Вт.
Другие параметры	
Режим работы круга	0.861
Доля зерен в единичном объеме	0.54
Шероховатость шлифованной поверхности	0 мкм
Экспортировать	

Рис. 5. Таблица с результатами расчета по программе

В качестве критерия оптимизации режима обработки было выбрано соотношение сил резания на единичных режущих зернах с прочностью их удержания на рабочей поверхности в матрице инструмента [2–6], которое обеспечивало его работу в режиме самозатачивания, что является предпочтительным для большинства операций шлифования и обеспечивает стабильные показатели процесса обработки. Для оптимального режима обработки для данной операции для имеющихся характеристик инструмента были получены следующие значения его элементов: скорость шлифования – 35 м/с,

глубина шлифования – 0,035 мм, скорость продольной подачи – 11 м/мин, поперечная подача – 12 мм/продольный ход.

3. Обсуждение результатов

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- осуществлен анализ шлифовальных операций при производстве деталей ТПА;
- осуществлен анализ состояния и использования в производственных условиях средств автоматизированного проектирования шлифовальных операций; предложена САПР для ре-

шения задач оптимизации элементов факторного пространства операций;

– с использованием выбранной САПР осуществлены оценка и проектирование существующих операций шлифования на ЗАО «Курганспецарматура» (г. Курган), даны рекомендации по корректировке режимов обработки с использованием выбранного критерия оптимизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Переладов, А. Б.* Изучение геометрических параметров поверхности контакта шлифовального круга с заготовкой для схем круглого и плоского шлифования с использованием пакетов твердотельного моделирования / А. Б. Переладов, И. В. Кожевников // Вестник Курганско-

го государственного университета. Серия «Технические науки». – Вып. 2. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. – С. 79–81.

2. *Переладов, А. Б.* Исследование статистико-вероятностных характеристик рабочей поверхности шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин // Известия высших учебных заведений. – Машиностроение, 2014. – № 3. – С. 67–71.

3. *Салов, П. М.* Повышение эффективности заточки, круглого и плоского шлифования с продольной подачей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Салов П. М. – Самара, 1998. – 32 с.

4. *Маслов, Е. Н.* Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – Москва, Машиностроение, 1974. – 320 с.

5. *Корчак, С. Н.* Производительность процесса шлифования / С. Н. Корчак. – Москва, Машиностроение, 1974. – 280 с.

6. *Переладов, А. Б., Камкин И.П.* САПР Шлифдизайн. Электронный адрес: <http://shlif.jaguarsoft.ru/>.

УДК 621.91.02

Е. Г. Крылов¹, В. Г. Барабанов¹, Н. В. Козловцева², А. В. Капитанов²

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕТВЯЩИХСЯ И ИТЕРАТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ ПЛАНИРОВАНИИ ДЕЙСТВИЙ В РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМАХ*

¹Волгоградский государственный технический университет

²Московский государственный технологический университет «Станкин»

E-mail: app@vstu.ru¹; a.kapitanov@stankin.ru²

Предложено для управления производственными реконфигурируемыми системами, построенными на базе станков с ЧПУ, использовать специальные алгоритмы, позволяющие оперативно решать технологические задачи в условиях неопределенности информации.

Ключевые слова: реконфигурируемые производственные системы, планирование действий, итеративные алгоритмы.

E. G. Krylov, V. G. Barabanov, N. V. Kozlovtsseva, A. V. Kapitanov

FORMATION OF BRANCHED AND ITERATIVE ALGORITHMS FOR INTELLECTUAL ACTION-PLANNING IN RECONFIGURABLE SYSTEMS

¹Volgograd State Technical University

²Moscow State Technological University «STANKIN»

It is proposed to use special algorithms to manage reconfigurable manufacturing systems built on the basis of CNC machines, which allow solve technological tasks quickly and efficiently even under information uncertainty.

Keywords: reconfigurable manufacturing systems, action-planning, iterative algorithms.

Реконфигурируемые производственные системы (РПС) составляют динамичную область развития современного машиностроения. Эти системы включают в себя высокотехнологичное оборудование и могут автоматически изменять структуру и компоновку в реальном времени, компоноваться из различных узлов и переконпоновываться для решения новой производственной задачи, не останавливая процессы при смене технологий. Создание и использование РПС приводит к значительному сокращению сроков подготовки производства и повышению эффективности автоматизированных участков и цехов [1, 2].

Одной из особенностей управления РПС является иерархичность управления. Задачи ниж-

них уровней управления легче поддаются унификации, поэтому разбиение типовых операций на элементарные действия целесообразно организовывать на основе типовых программ. Процесс алгоритмизации на верхних уровнях управления в большей степени зависит от конкретных задач. Это повышает требования к гибкости средств автоматизации программирования, которым в значительной мере удовлетворяют системы интеллектуального планирования действий (СИПД) с продукционными базами знаний.

СИПД предназначены для решения задач преобразования ситуаций, в которых исходная и целевая структуры данных, представляющие ситуации в среде и набор операторов (моделей

допустимых действий) для преобразования этих структур описаны в терминах объектов, их свойств, состояний и связей (реализаций отношений). На основе данного набора операторов СИПД формирует план, т. е. алгоритмы преобразования исходной структуры данных о среде в целевую.

Планировать действия в реальной среде необходимо в общем случае с учетом обратной связи между уровнями управления РПС. Часть общей проблемы учета обратной связи может быть решена на верхнем уровне управления путем разработки программных средств, позволяющих планировать действия в условиях неопределенности знаний о реальной среде. Например, при планировании чистовой обработки детали на станке с ЧПУ необходимо обеспечить параметры точности обрабатываемой поверхности с учетом фактического износа конкретного режущего инструмента. Учет подобных неопределенностей, приводит к ветвлению планов действий, к появлению в них циклов и условных переходов. Конкретные ветви плана должны выбираться автоматически в процессе его выполнения на основе оперативной информации о среде, в которой функционирует производственное оборудование [3].

Под неопределенностью будем понимать такое состояние модели проблемной среды, при котором решающая система имеет некоторое множество D^* вариантов принятия решений, но не имеет достаточных критериев или данных, позволяющих ей обоснованно предпочесть один из вариантов $d_i^* \in D^*$. При планировании существует два основных вида неопределенностей, связанных с отсутствием достаточной информации о реализуемости принимаемых решений (моделируемых действий) или с отсутствием достаточной стратегической информации, позволяющей оценить степень приближения к цели в результате выбора каждого из альтернативных вариантов принятия решений [4]. Из альтернативных планов при помощи условных переходов возможно создать один ветвящийся алгоритм. При выполнении такого алгоритма ситуации, прогнозировавшиеся в процессе планирования, становятся реальными, тем самым многие неопределенности исчезают, и выбор действий в ветвящемся алгоритме становится детерминированным.

Рассмотрим общую схему формирования ветвящихся алгоритмов в СИПД, позволяющую единым образом учитывать оба указанных вида

неопределенностей. Схема ветвящегося планирования разработана в рамках детерминированного подхода, т. е. при отсутствии статистических данных и вероятностных оценок, позволяющих сравнивать варианты операторов (моделей действий) СИПД с точки зрения их реализации и приближения к цели.

Модель проблемной среды СИПД при детерминированном подходе включает в себя неопределенные описательные выражения двух видов:

- неконкретизированные выражения с элементами типа переменных;
- выражения, относительно истинности которых существует сомнение, но численной (вероятностной) оценки этого сомнения нет.

Такому выражению соответствует исключаящая дизъюнкция, первым членом которой является само выражение, а вторым – его отрицание.

Введем множества:

- 1) D_c^i – множество применимых операторов СИПД в ситуации S_i ;
- 2) D_r^i – множество равноценных операторов или вариантов операторов.

Для элементов множества $D_r^i \subseteq D_c^i$ значения функции полезности $\varphi(D_c^i)$, используемой для выбора операторов, находятся в заданных пределах, в частности

$$\forall i, j (\varphi(d_{ri}) = \varphi(d_{cj})) .$$

При наличии в описаниях операторов из D_c^i одинаковых неопределенных элементов соответствующие операторы считаются равноценными, независимо от их оценок по $\varphi(D_c^i)$.

Положим, что D_r^{*i} – множество наилучших операторов, т. е. такое множество равноценных между собой операторов $D_r^{*i} \subseteq D_c^i$, для которого справедливо:

$$\exists d_{ri}^* \in D_r^{*i} (\forall j \in J(\varphi(d_{ri}^*) > \varphi(q_j)))$$

либо $\varphi(d_{ri}^*) < \varphi(q_j)$, что зависит от вида φ , где $Q = D_c^i - D_r^{*i}$; $q_j \in Q$.

Общая схема ветвящегося планирования в СИПД показана на рис. 1.

Узлам ветвления в плане A , который может быть выдан СИПД на одном из проблемно-ориентированных языков программирования, соответствуют операторы условных переходов.

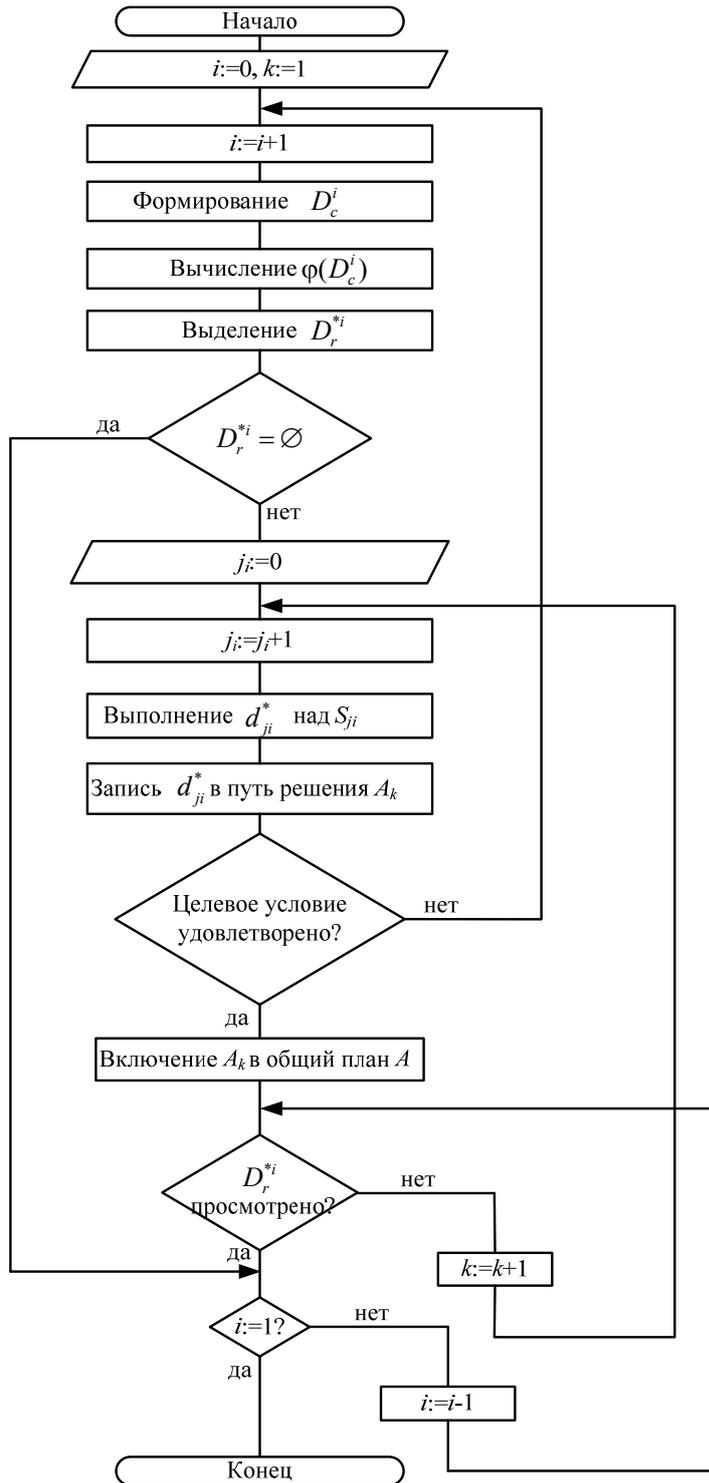


Рис. 1. Алгоритм ветвящегося планирования

Во избежание многократного планирования операций над однотипными данными необходимо иметь средства анализа элементов модели среды M_o на однотипность, проводимого в ходе планирования. Установление однотипности данных путем построения и анализа полного неитеративного плана может оказаться прак-

тически нереализуемой процедурой, если количество однотипных элементов M_o очень велико или неопределено. Анализа на однотипность элементов M_o в ситуации S_o может быть недостаточным, если преобразования выполняемые над M_o приводят к появлению новых однотипных элементов.

Пусть $G^j = \{g_i^j\}, i = \overline{1, n}$ множество недо-
стигнутых подцелей j -го уровня поискового
графа G , отражающего переходные состояния
модели среды, возникающие в процесса поиска
решения, i – номер подцели; значение j равно
количеству вершин G , лежащих на пути от

данной вершины $g_i^j \in G^j$ до целевой вершины S_g
включительно. Общая схема индуктивного (свя-
занного с обобщением фрагментов путей реше-
ния) формирования итеративных алгоритмов
в СИПД показана рис. 2.

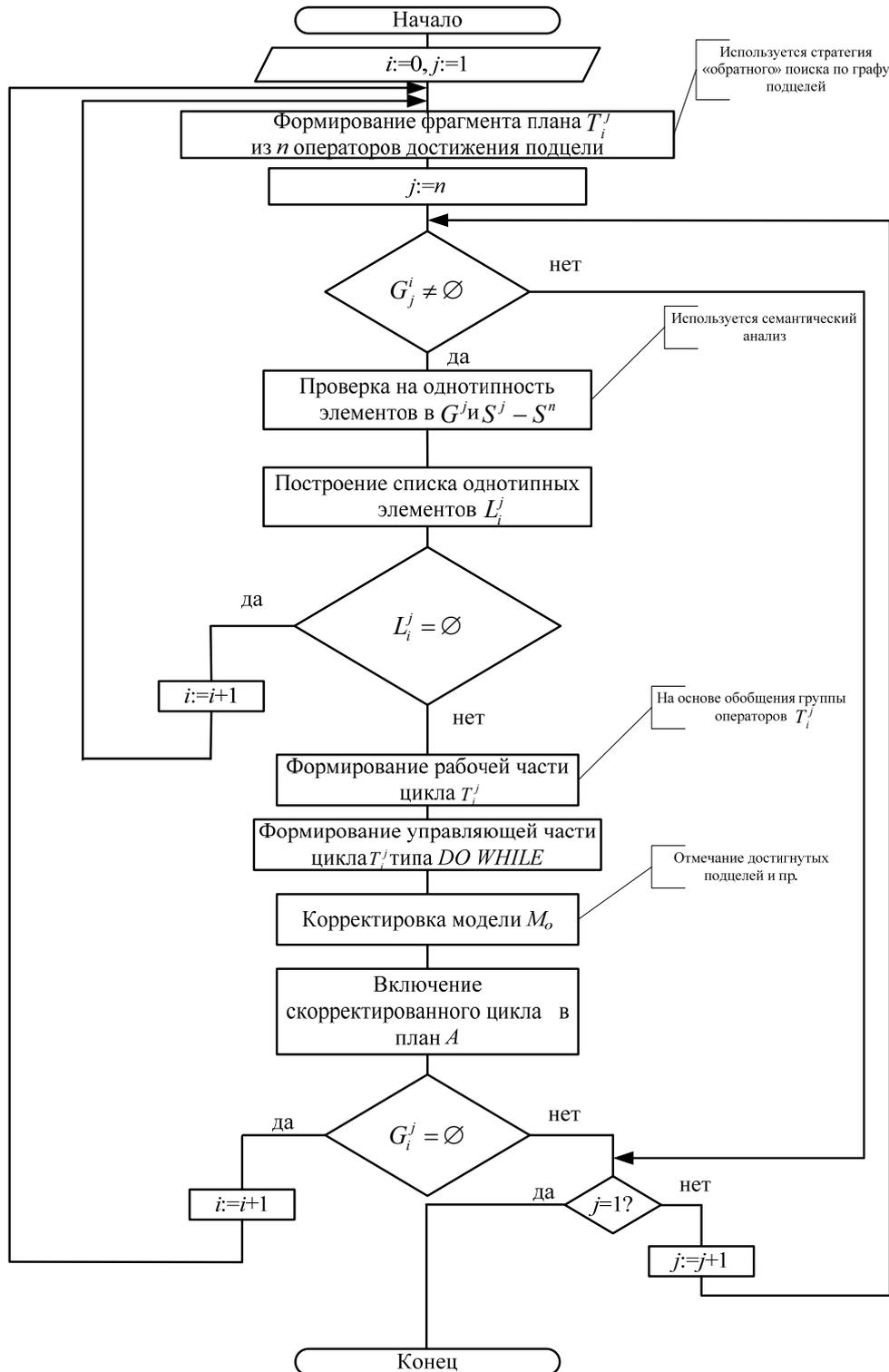


Рис. 2. Итерационный алгоритм планирования

Обобщение операторов при построении циклов (переход от конкретных реализаций операторов к их исходной обобщенной форме с элементами типа переменных) и определенная организация их использования придают формируемому плану A алгоритмическое свойство массовости. В этом случае план A , построенный для преобразования конкретной исходной структуры S_o , оказывается пригодным для соответствующих преобразований любого множества подструктур данной структуры S_o , определяемых однотипными элементами. Из описанной схемы планирования видно, что если однотипные подцели возникают на промежуточных этапах планирования, то могут образоваться вложенные циклы.

УДК 629.114.2-235

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ В МАСЛЕ ФРИКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: au@vstu.ru

Представленный материал посвящен повышению долговечности и надежности работы в масле фрикционных устройств гидромеханических трансмиссий транспортных гусеничных машин за счет применения современных материалов трения и новых конструктивных решений.

Ключевые слова: гидромеханическая трансмиссия, фрикционные устройства, металлокерамические диски, контртело, трение в масле, комбинированная поверхность трения.

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

INCREASE OF DURABILITY AND RELIABILITY IN OIL FRICTION DEVICES, HYDRAULIC-MECHANICAL TRANSMISSION CRAWLER TRANSPORT MACHINE

Volgograd State Technical University

The presented material is sanctified to the increase of longevity and reliability of work in oil of friction devices of hydromechanical transmissions of transport caterpillar machines due to application of modern materials of friction and new structural decisions.

Keywords: hydromechanical transmission, friction device, ceramet discs, counterface, friction in the oil, a combined friction surface.

В транспортном машиностроении широко применяются в гидромеханических трансмиссиях (ГМТ) фрикционные устройства, работающие в масле: фрикцион блокировки гидротрансформатора, тормоз – синхронизатор для включения зубчатых муфт, фрикционные муфты переключения передач, фрикционная муфта отключения гидрообъемной передачи (ГОП) механизма поворота, фрикционная муфта включения водометного движителя [1]. Кинематическая схема ГМТ транспортной гусеничной ма-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крылов, Е. Г.* Повышение эффективности функционирования инструментальных систем автоматизированного станочного оборудования: монография / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев; ВолгГТУ. – Волгоград; Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии (ТНТ), 2016. – 316 с.

2. *Капитанов, А. В.* Особенности исследования самоорганизующихся адаптивных систем / А. В. Капитанов // Вестник МГТУ Станкин. – 2016. – № 4 (39). – С. 109–112.

3. Моделирование и оценка эффективности системы инструментального обеспечения многоцелевых станков / Е. Г. Крылов, А. М. Макаров, В. Г. Барабанов, Н. В. Козловцева, Ю. П. Сердобинцев // Вестник машиностроения. – 2017. – № 5. – С. 66–71.

4. Выявление критических состояний технологической системы с использованием таблиц решений / Е. Г. Крылов, А. М. Макаров, Н. В. Козловцева, А. В. Капитанов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (200) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 68–70.

шины (ГМ) массой 18 т представлена на рис. 1. На рис. 2 представлена фрикционная муфта переключения передач ГМТ, на рис. 3 представлен тормоз-синхронизатор ГМТ для включения зубчатых муфт.

Конструктивные характеристики фрикционных узлов гидромеханической трансмиссии, работающих со смазкой, представлены в табл. 1.

Условия работы фрикционных устройств гидромеханической трансмиссии, работающих со смазкой, представлены в табл. 2.

В ГМТ в фрикционных узлах используется металлокерамические диски (МКД) с двумя поверхностями трения с фрикционным материалом на медной основе МК-5. Металлокерамика МК-5 содержит оловянистую бронзу и используется для дисков трения КП с переключением на ходу в харьковском тракторе Т-150 [2, 3].

Материал обеспечивает включение фрикционной муфты с плавным нарастанием крутящего момента, без заметных колебаний и пикообразного возрастания его в конце буксования. При понижении прочности и плотности металлокерамики в 1,5...2 раза износостойкость материала снижается в 4 раза.

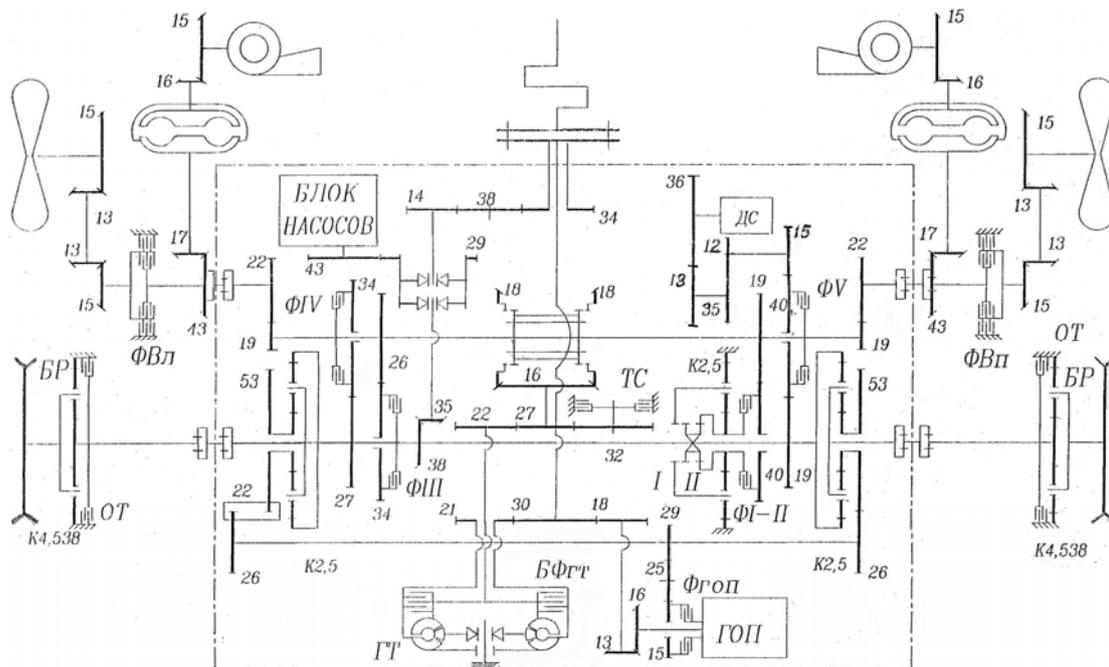


Рис. 1. Кинематическая схема гидромеханической трансмиссии ГМ массой 18 т:

БФГТ – фрикцион блокировки гидротрансформатора (ГТ); ТС – тормоз-синхронизатор ГТ; ФВ-П, ФВ, ФП, ФВЛ, ФВП – фрикционные муфты коробки передач (КП); ФГОП – фрикционная муфта отключения гидрообъемной передачи механизма поворота (МП); ФВЛ, ФВП – фрикционные муфты включения левого и правого водометных двигателей (ВД), БР – бортовая передача; ОТ – остановочный тормоз; ДС – датчик спидометра; I, II, III, IV, V – передачи КП

Таблица 1

Конструктивные характеристики фрикционных узлов ГМТ

Механизм включения	Узел трения	Число пар поверхностей трения	Материал		Поверхность трения	Чистота поверхности трения		Диаметр трения, мм		Толщина, мм		Тип смазки
			Фрикционный	Контртело		Фрикционного материала	Контртела	Max	Min	Диска трения	Несущего диска	
Гидроуправление	Дисковый тормоз-синхронизатор	8	МК-5	Сталь 65Г 28-34 HRCэ	Радиальные и спиральные канавки	2,5	2,5	176	134	3,3	2	ГСЗП-8
То же	Фрикцион блокировки гидротрансформатора	2	То же	То же	Спиральные канавки	То же	То же	316	260	5,1	3	То же
-/-	Фрикционные муфты переключения передач КП	16;10;8;8	-/-	-/-	Радиальные и спиральные канавки	-/-	-/-	214	168	3	1,8	-/-
-/-	Фрикционная муфта отключения ГОП механизма поворота	4	-/-	-/-	тоже	-/-	-/-	176	134	3,3	2	-/-
-/-	Фрикционная муфта включения ВД	6	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	то же	то же	то же	то же	-/-

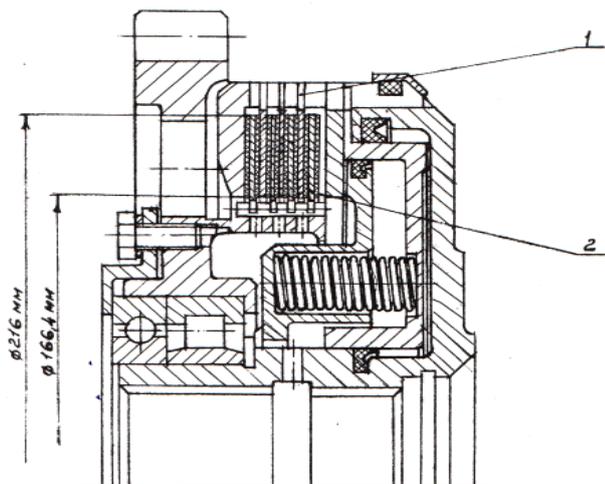


Рис. 2. Фрикционная муфта переключения передач:
1 – ведущие стальные диски; 2 – ведомые металлокерамические диски

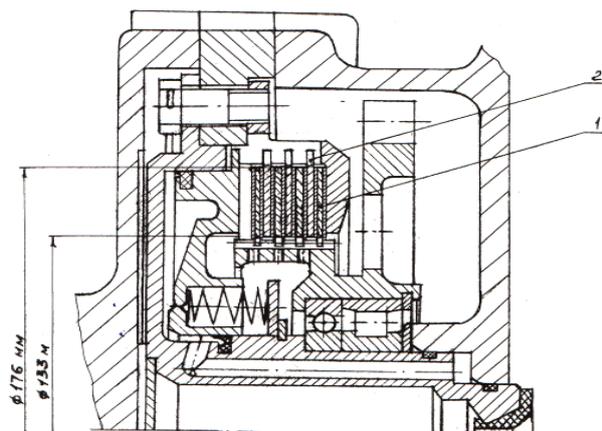


Рис. 3. Тормоз-синхронизатор ГТ:
1 – вращающиеся металлокерамические диски; 2 – неподвижные стальные диски

Таблица 2

Условия работы фрикционных устройств гидромеханической трансмиссии

Узел трения	Удельная работа трения, кДж/м ²	Максимальная линейная скорость скольжения относительно контртела, м/с	Максимальное давление на поверхности трения, 10 ³ Па	Температура в зоне трения °С			Время буксования, с	Тип смазки	Фрикционный материал	Материал контртела
				Средняя	Допустимая	Диапазон рабочих температур				
Тормоз-синхронизатор	29	7,174	33	103	700–800	-60 ... +800	0,03	Масло трансмиссии ТСЗП-8	МК-5	Ст 65Г
Фрикцион блокировки ГТ	89	8,659	46	108	То же	То же	0,03	То же	То же	То же
Фрикционные муфты переключения передач	1171; 112; 228; 230	7,061; 6,028; 8,152; 8,669	36; 30; 31; 46	146; 124; 134; 136	-/-	-/-	1,17; 0,15; 0,24; 0,31	-/-	-/-	-/-
Фрикционная муфта отключения ГОП механизма поворота	–	27	47,8	135	-/-	-/-	–	-/-	-/-	-/-
Фрикционная муфта включения ВД	465	14,506	26	122	-/-	-/-	0,2	-/-	-/-	-/-

Для дисков тракторов Т-150 Ø 216 мм. Броварский завод порошковой металлургии изготавливает спиральные канавки, которые дали хорошие результаты. Другие виды канавок дали менее выгодное нарастание крутящего момента при одинаковом износе. Снижение олова в материале в 1,5...2 раза вызывает снижение износостойкости материала в 1,3...1,5 раза. Термообработка стальных сопряженных дисков (без последующей шлифовки) увеличивают износ спеченного фрикционного слоя в 1,4...1,9 раза.

Термообработка стальных дисков с последующей шлифовкой повышает износостойкость пакета дисков по сравнению с серийными сырыми нешлифованными дисками в 2...4 раза. Уменьшение расхода охлаждающего масла с 4,5 до 2,5 л/мин повышает износ пакета дисков в 1,2...1,6 раза, а при дальнейшем снижении расхода масла износ вырастает в 1,7...2,1 раза. При этом снижение расхода масла связано с возрастанием рабочей температуры дисков. Долговечность серийных дисков

при существующей конструкции муфты переключения передач трактора Т-150 составляет не менее 6000 моточасов.

Физико-химические свойства спеченного фрикционного материала МК-5 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-химические свойства спеченного фрикционного материала МК-5

Наименование показателей	Нормы для материала
Твердость, кгс/мм ²	20...60
Химический состав, вес %:	
– олово	9...11
– свинец	6...10
– графит	6...8
– железо	3...5
– медь	остальное
Микроструктура	Твердый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа и пор, равномерно расположенных по полю шлифа

Исследования фрикционных и износных характеристик дисков трения фрикционных муфт.

Исследование фрикционных и износных характеристик дисков трения фрикционных муфт трансмиссии проводилось на одномассовом инерционном электро-стенде фрикционных элементов.

Для оценки влияния конструкции и типоразмера на фрикционные и износные свойства дисков испытания проводились на режиме, соответствующем предельным условиям работы фрикционных элементов трансмиссий ГМ на режимах переключения передач и трогания. Параметры режима испытаний дисков приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры режима испытания дисков

Параметры	Значения
Удельная работа трения, Дж/м ²	2,2·10 ⁶
Удельное давление, Па	2,5·10 ⁶
Начальная скорость скольжения, м/с	40
Удельный расход масла, м ³ /(м ² ·с)	1,4...1,8
Количество циклов торможений	400
Интервал времени между торможениями, мин	1
Температура масла, °С	80

Испытания дисков трения трансмиссии проводились в сравнении с эталонными серийными дисками трения типоразмера Ø 500 мм на масле ТСЗП-8.

Разогрев масла осуществлялся за счет работы стенда. Специального подогрева масла не проводилось.

На выбранном режиме испытывались последовательно по три пакета дисков каждого наименования. Для оценки износостойкости накладок перед началом испытаний, после 100 и 400 торможений проводилось измерение толщины металлокерамических дисков в восьми фиксированных точках, равномерно распределенных по окружности вблизи наружного и внутреннего диаметров.

Измерение толщины дисков проводилось рычажной скобой с погрешностью 0,002 мм, настраиваемой по концевым мерам.

Для оценки фрикционных свойств дисков осциллографировались сотое, двухсотое, трехсотое, четырехсотое торможения для каждого пакета с регистрацией следующих параметров: момента трения фрикционного узла, Н·м; давления в полости бустера, МПа; частоты вращения дисков, об/мин; времени буксования, с. В качестве оценочных показателей характеристик дисков при исследовании на стенде фрикционных элементов принимались: осредненная величина суммарного линейного износа металлокерамических дисков за весь цикл испытаний; осредненное значение величины износа дисков за одно торможение при установившемся процессе изнашивания; осредненное значение величины коэффициента трения в процессе буксования дисков.

При расчете интенсивности износа металлокерамических накладок дисков при установившемся процессе изнашивания принималось, что приработка дисков заканчивается за первые 100 торможений.

Численные значения оценочных показателей характеристик дисков при испытании на заданном режиме приведены в табл. 5, 6.

Резкое увеличение износостойкости дисков 150.37.074 СБ при незначительном снижении коэффициента трения можно объяснить наряду с отличиями в технологии изготовления влиянием масштабного фактора.

Недостаток дисков 150.37.074 СБ - низкий коэффициент трения при работе со стальным контртелом со смазкой, что снижает надежность и долговечность фрикционного или тор-

мозного узла, увеличивает габариты и массу конструкции, и трудоемкость процесса их изготовления отдельным прессованием и длительным спеканием под давлением [2, 4, 5].

Для повышения надежности работы предлагается техническое решение, в котором в диске трения основа выполнена с равномерно расположенными по окружности радиальными тор-

цевыми пазами, заполняемыми, например, плазменным пористым фрикционным материалом на основе молибдена, причем толщина диска выполняется равной толщине основы, а площадь покрытия в пазах относится к остальной площади основы диска в соотношении, устанавливаемом в зависимости от условий работы диска.

Таблица 5

Износ дисков трения при испытании на стенде фрикционных элементов

Характеристика дисков, обозначение и номер предприятия изготовления	Номер МКД в пакете	Износ в микронах				
		За 100 торможений	За 400 торможений	Осредненный износ за 400 торможений	Износ за одно торможение после приработки	Осредненный износ за одно торможение после приработки
Эталонные МКД с накладками из материала МК-5	11	200,00	709,50	713	1,70	1,73
	22	194,50	689,00		1,65	
	33	185,75	740,75		1,85	
МКД 150.37.074 СБ с накладками из материала МК-5	11	6,50	97,00	144	0,01	0,21
	21	101,50	140,75		0,01	
	31	77,25	193,75		0,39	
	12	47,50	131,75	152	0,28	
	22	78,50	157,25		0,26	
	32	162,75	251,00		0,28	
	13	59,25	86,25	тоже	0,09	
	23	97,00	206,00		0,36	
	33	67,50	126,75		0,20	

Таблица 6

Фрикционные свойства дисков трения, полученные при испытании на стенде

Характеристика дисков	Номер пакета	Средний за торможение коэффициент трения скольжения		
		Пределы по пакету	Средний по пакету	Средний по партии
Эталонные МКД с накладками из материала МК-5	1	0,059...0,060	0,060	0,059
	2	0,055...0,070	0,062	
	3	0,050...0,066	0,055	
МКД 150.37.074 СБ с накладками из материала МК-5	1	0,051...0,054	0,053	0,052
	2	0,049...0,052	0,051	
	3	0,049...0,054	0,052	

Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины. Подбор фрикционного материала и напыление его на основу (подложку) проводились в ИПМ [4].

На рис. 4 изображен диск трения с двумя рабочими поверхностями, состоящий из металлической основы 1 и фрикционного материала 2, для работы со стальным контртелом в масле. Основа диска выполнена с равномерно расположенными по окружности радиальными торцевыми пазами глубиной 0,3...0,5 мм с шагом «а», заполняемы-

ми пористым фрикционным материалом, который наносится методом плазменного напыления. На противоположных торцах диска пазы могут быть смещены на величину $a/2$. Толщина диска выполняется равной толщине основы 1, а площадь покрытия в пазах относится к остальной площади торца основы 1 в соотношении 85 к 15. Рабочая поверхность диска трения представляет собой чередующиеся участки плотного беспористого стального материала, например, стали 65 Г, и пористого противозадирного плазменного фрикционного материала [6].

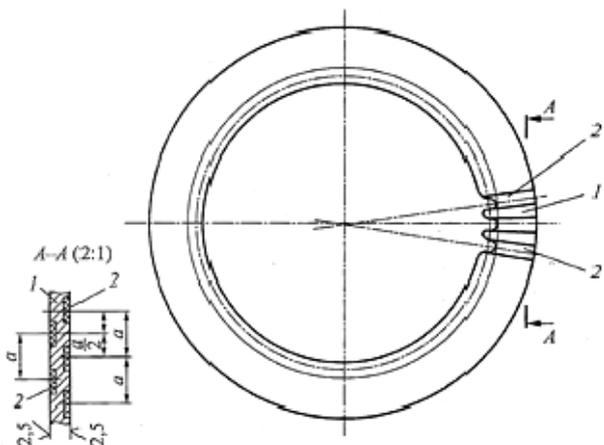


Рис. 4: Диск трения:
1 – основа диска, 2 – фрикционный материал,
a – шаг торцевых пазов

Принцип работы диска заключается в том, что при его трении в масле по стальному контртелу при больших скоростях скольжения и удельных нагрузках на фрикционном контакте стальные участки этого диска обеспечивают высокий коэффициент трения (особенно в режиме граничного или смешанного трения). Пористые участки обеспечивают при этом фрикционному

соединению требуемые противозадирные характеристики, так как частицы пористого материала с маслом при трении переносятся на стальные участки, намазываются на них и препятствуют износу, задирам, прихватываниям и свариванию поверхностей трения.

Результаты испытания новых дисков трения Ø 216 мм с комбинированной поверхностью трения, в которой 85 % молибденового покрытия и 15 % стали 65Г на одномассовом инерционном электростенде представлены в табл. 7.

Новые диски с комбинированной поверхностью трения на основе молибденового покрытия, изготовленные по технологии плазменного напыления, весь объем сравнительных стендовых испытаний на заданном режиме выдержали при условии дополнительной приработки пакета дисков. По сравнению с серийными дисками с накладками из металлокерамики состава МК-5 новые диски в стендовых условиях обеспечивают увеличение среднего уровня коэффициента трения ориентировочно в 3 раза. Разработанные диски с молибденовым покрытием обеспечивают высокую износостойкость.

Таблица 7

Результаты испытания новых дисков трения Ø 216 мм

Характеристика дисков	Средний износ пары трения за 400 торможений, мкм	Средний износ пары трения за одно торможение после приработки, мкм	Среднее время буксования, с	Среднее значение за одно торможение коэффициента трения
Пакет дисков трения с молибденовым покрытием без смазочных канавок	16	0,032	0,289	0,124
Пакет дисков трения, изготовленных по серийной технологии раздельного пресования и спекания под давлением из металлокерамического материала МК-5	28,87	0,048	0,646	0,043

Диски трения Ø176 мм с комбинированной поверхностью трения на основе молибдена (70 %) устанавливались в тормоз-синхронизатор механизма передач и поворота гидромеханической трансмиссии ГМ массой 13,2 т и были подвергнуты эксплуатационным испытаниям в объеме 2000 км пути. Во время испытаний изделие работало эффективно в штатном режиме без замечаний.

Указанные преимущества новых дисков с комбинированной поверхностью трения, в частности с молибденовым газотермическим покрытием существенно повышают надежность и дол-

говечность фрикционных и тормозных узлов при их эксплуатации в тяжелых условиях и позволяют уменьшить габариты и массу узлов на стадии их создания. Дальнейшие работы по совершенствованию конструкции комбинированной поверхности трения фрикционных дисков, получаемых по технологии плазменного напыления, должны быть направлены на выбор состава материала напыления и изучение влияния процентного соотношения площадей стальных участков и участков с пористым покрытием на рабочей поверхности трения на эксплуатационные характеристики дисков трения.

Вывод

Представленные материалы по повышению долговечности и надежности, работающих в масле фрикционных устройств ГМТ за счет применения современных материалов трения могут быть использованы при разработке новых и модернизации существующих конструкций колесных и гусеничных машин с фрикционными устройствами.

Материалы статьи подготовлены с использованием программного обеспечения КОМПАС 3D для геометрического моделирования фрикционных устройств, и PTC Mathcad для обработки результатов экспериментов, приобретенного в рамках реализации инфраструктурного проекта по конкурсу Минобрнауки «Новые кадры ОПК» 2014 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Труханов, В. М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов. – М. : Машиностроение, 2001. – 736 с.
2. Трактор Т-150 / под ред. Б. П. Кашубы и И. А. Ковалева. – М. : 1978. – С. 106–107.
3. Федорченко, И. М. Современные фрикционные материалы / И. М. Федорченко, В. М. Крячек, И. И. Панаюти. – Киев : Наукова думка, 1975. – 334 с.
4. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия, материалы, технологии, свойства, области применения: справочник / И. М. Федорченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 623 с.
5. Шведков, Е. Л. Словарь справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун. – Киев : Наукова думка, 1979. – 188 с.
6. Чайка, Б. И. Плазменные покрытия для поршневых колец автотракторных двигателей / Б. И. Чайка, И. М. Федорченко и др. // Порошковая металлургия. – 1978. – № 3. – С. 86–91.

УДК 629.114.2-235

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

РАЗРАБОТКА ЗАГОТОВОК ДИСКОВ ТРЕНИЯ С БРОНЗОВЫМ НА ОСНОВЕ БРАЖ(SiC) ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ В МАСЛЕ В УЗЛАХ ТРАНСМИССИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН*

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: au@vstu.ru

Представленный материал посвящен разработке заготовок дисков трения с бронзовым покрытием, полученным по технологии плазменного напыления (газотермическое покрытие), для работы в узлах трансмиссий транспортных машин.

Ключевые слова: заготовка, диск трения, трансмиссия, газотермическое покрытие, трение в масле, бронза.

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

DEVELOPMENT OF DISK BLANKS OF FRICTION WITH COATING BRONZE ON THE BASIS OF BRAG(SiC) FOR RELIABLE PERFORMANCE IN OIL FOR TRANSMISSIONS OF TRANSPORT VEHICLES

Volgograd State Technical University

The presented material is devoted to development of billets of disks of friction with the bronze covering received on technology of a plasma deposition process – a gas-thermal covering, for work in knots of transmissions of transport machines.

Keywords: billet, disk of friction, transmission, gas-thermal coating, friction in oil, bronze.

Целью работы является разработка заготовок дисков трения, эксплуатируемых в масле, для механизма передач и поворота гусеничной машины массой до 18т [1] с увеличенной долговечностью в сравнении с серийными металлокерамическими дисками из материала МК-5, работающими по стальному контртелу, с улуч-

шенными эксплуатационными характеристиками и характеристиками по технологичности.

Новизной предлагаемого технического решения является **разработка заготовок дисков трения с бронзовым на основе БраЖ(SiC) покрытием, полученным по технологии плазменного напыления.**

© Крыхтин Ю. И., Карлов В. И., 2017.

* Материалы статьи подготовлены с использованием программного обеспечения PTC Mathcad Prime для обработки результатов экспериментов, приобретенного в рамках реализации инфраструктурного проекта по конкурсу Минобрнауки «Новые кадры ОПК» 2014 г.

Предлагаемое техническое решение предназначено для использования в трансмиссиях гусеничных и колесных машин, где применяются диски трения для безударного включения ведущих и ведомых элементов.

Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины. Подбор фрикционного материала и напыление его на основу (подложку) проводились в ИПМ [2].

С быстрым ростом скоростей и нагрузок, при которых работают современные машины и механизмы, из числа существующих фрикционных материалов (сталей, чугунов, бронз, асбокаучуковых, спеченных - металлокерамических, и других) по ресурсу, надежности, износостойкости и стабильности предпочтение отдается спеченным фрикционным материалам.

В спеченных фрикционных материалах шихта, содержащая порошки меди, олова, свинца, графита и диоксида кремния, в виде тонкого слоя была нанесена при прессовании и спекании под давлением на поверхность каркаса из листовой стали. Этот трудоемкий метод позволил сочетать прочность несущего каркаса с высоким коэффициентом трения и износостойкостью, отсутствием схватывания, плавностью торможения композиционного слоя. Такие материалы на медной основе нашли широкое применение в узлах трения без смазки (муфты сцепления, тормоза, электромагнитные муфты и т.п.), а также в узлах трения с принудительной смазкой (фрикционные электромагнитные муфты, синхронизаторы, диски трения гидротрансмиссий и т.п.) тракторов, автомобилей, транспортных гусеничных машин, металлорежущих станков и других машин и механизмов.

Заслуживает внимания плазменный способ получения фрикционных покрытий на деталях тормозов и фрикционных передач, позволяющий одновременно выполнять технологические операции формирования и спекания наносимых частиц.

В настоящей работе предпринята попытка создания эффективного пористого газотермического фрикционного покрытия на бронзовой основе.

Конструкция рабочей поверхности новых дисков трения представляет собой развитую поверхность, полученную в результате фрезерования радиальных пазов глубиной 0,2...0,3 мм; эти пазы составляют 40...70 % поверхности фрикционных дисков. Только после выполне-

ния механической обработки, включающей абразивно-струйную обработку, наносится фрикционное покрытие непосредственно на деталь или на промежуточный (так называемый «грунтовочный») слой из алюминид никеля (Al-15 %, Ni-85 %). Промежуточный слой наносится толщиной 80...120 мкм. Основной слой из алюминидевожелезистой бронзы наносится толщиной 0,2...0,45 мм на поверхность основы дисков.

Состав материала (Cu+10%Al+5%Fe+10%SiC) определен материаловедческими исследованиями и триботехническими испытаниями и отвечает эффективно сочетанию несущей матрицы на медной основе, обладающей необходимыми свойствами прочности, износостойкости, упругости и фрикционности, с абразивным наполнителем SiC, которые вводятся для достижения необходимых значений коэффициента трения, а также стабилизации минимальных потерь на трение в условиях действия тяжелого нагружения, ограниченной подачи смазки и высоких температур.

Требуемая структура плазменного фрикционного слоя из алюминидевожелезистой бронзы, в которой идея высокой эксплуатационной работоспособности реализуется в разделении функционального назначения упругопластичной (однофазная структура твердого раствора алюминия в меди $Al \leq 9.4 \%$) и упрочняющей (за счет вторичной фазы Al_4Si , Fe_3AlC_x , $CuAl_2$, SiC) составляющих, из которых основа материала отвечает за несущую способность, а упрочняющая составляющая – за реализацию фрикционной эффективности. Заданная фрикционность проявляется вследствие формирования на рабочей поверхности тонкой подвижной экранирующей пленки, предохраняющей от схватывания сопряженные поверхности и определяющей сопротивление скольжению в пределах величины коэффициента трения 0,1...0,12.

На рис. 1 приведена микроструктура покрытия из бронзы БрАЖ(SiC).

Рентгеноструктурным исследованием установлено, что введение в медную основу алюминия в количестве 10 % приводит к частичному образованию двухфазной структуры – α -твердый раствор с включениями эвтектики, содержащей γ -фазу. Растворимость железа в меди не превышает 0,4...0,5 %, поэтому почти все количество железа остается в виде нерастворимых включений.

Покрытие из алюминид никеля может успешно использоваться при высоких температу-

рах – до 650 °С, обладая высокой прочностью и способностью сцепления.



Рис. 1. Микроструктура покрытия из бронзы БрАЖ(SiC) (Увеличение 400^x). Подложка – Сталь 3

Одной из существенных особенностей плазменного напыления является возможность управления составом, структурой и свойствами покрытий за счет применения порошков плакированного и конгломерантного строения, т. е. имеется возможность изготовления порошков нужного состава. Кроме того, при плазменном напылении более целесообразно использовать материалы в виде проволок, лент и т. п. В настоящей работе возникла необходимость разработки технологии напыляемого материала, т. е. алюминиевожелезистой бронзы в виде спеченной прокатной ленты.

Материал из бронзы отличается повышенной фрикционной активностью. Апробация материалов, изготовленных плазменным напылением с механическим активированием поверхности, позволяющей снижать пористость до 7 %, выявила возможность рационального использования алюминиевожелезистой бронзы БрАЖ(SiC) в фрикционных устройствах.

Пара трения с плазменным покрытием на основе БрАЖ(SiC) и сталью 65Г была испытана в лабораторных условиях на машине трения МТ-22 при работе с трансмиссионным маслом МТ-16П ГОСТ 6337–83. Результаты испытаний в виде зависимости удельной критической нагрузки $P_{уд.кр.}$ от скорости скольжения $V_{ск.}$ для

фрикционных плазменных покрытий Мо и БрАЖ(SiC) приведены на рис. 2 [3]. При непрерывном трении удельные критические нагрузки $P_{уд.кр.}$ имеют высокий уровень для плазменных бронзовых покрытий, что объясняется их пористостью и обеспечивает определенную износостойкость покрытия.

Плазменное покрытие из БрАЖ(SiC) является пористым телом, состоящим из отдельных частиц. Качество меж частичных контактов в таких телах не является совершенным. Указанные характеристики структуры затрудняют достижение $P_{уд.кр.}$ (рис. 2) при нагружении трением пористого плазменного покрытия в связи с возможностью уплотнения материала на локальных участках поверхности трения.



Рис. 2. Зависимости $P_{уд.кр.}$ от $V_{ск.}$ для фрикционных плазменных покрытий Мо и БрАЖ(SiC)

Критические нагрузки $P_{уд.кр.}$ характеризуют полное или частичное разрушение масляной пленки, что приводит к появлению трения без смазки и возрастанию коэффициента трения до значений, характерных для сухого трения.

В момент достижения $P_{уд.кр.}$ коэффициент трения f в масле для бронзового плазменного покрытия больше или равен 0,2 ($f \geq 0,2$).

Триботехнические характеристики пар трения в масле, полученные на машине трения МТ-22, приведены на рис. 3 и 4.

Поведение сопряжения сталь 65Г по стали 65Г в масле на фрикционном контакте характеризуется высоким уровнем изнашивания (10...13 мкм/км) и коэффициента трения. При этом прослеживается тенденционность к смещению в область низких значений величин изнашивания и коэффициента трения по мере перехода на более высокие скорости скольжения, т. е. от 0,5 до 3 м/с.

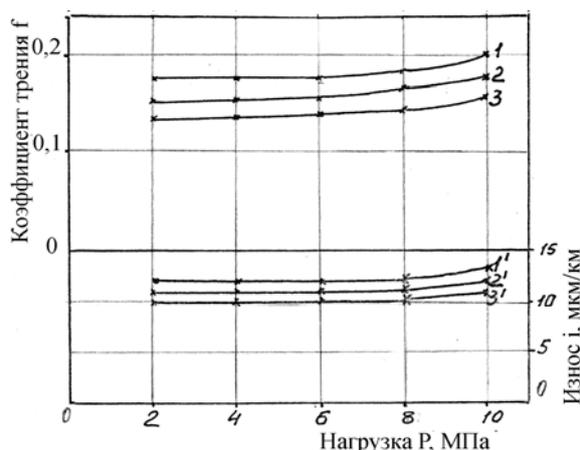


Рис. 3. Фрикционные характеристики сопряжения материалов Сталь 65Г - Сталь 65Г при скоростях скольжения: 0,5 м/с (кривые 1, 1'); 1,5 м/с (кривые 2, 2'); 3,0 м/с (кривые 3, 3') и ограниченной подачи смазки

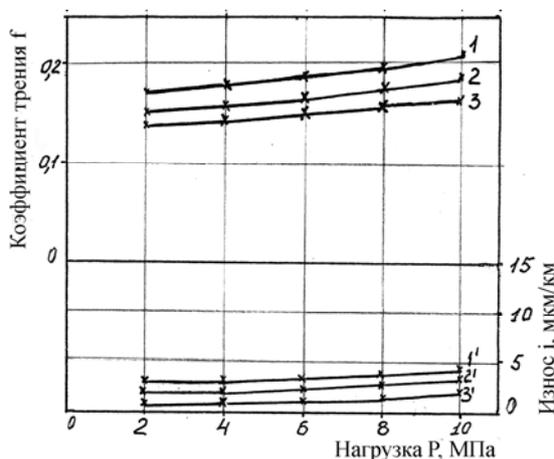


Рис. 4. Фрикционные характеристики сопряжения материалов БрАЖ(SiC) - Сталь 65Г при скоростях скольжения: 0,5 м/с (кривые 1, 1'); 1,5 м/с (кривые 2, 2'); 3,0 м/с (кривые 3, 3') и ограниченной подачи смазки

Замена в паре трения из конструкционных материалов сталь 65Г по стали 65Г одной из сталей на пористое бронзовое покрытие БрАЖ(SiC) не ухудшила фрикционной эффективности, снизив при этом темп изнашивания контактирующих поверхностей. Испытания покрытия БрАЖ(SiC) по стали 65Г характеризуются незначительным износом – в пределах 3...4 мкм/км.

Были проведены испытания на машине трения МТ-22 покрытия из БрАЖ(SiC) в условиях ограниченной подачи смазки МТ-16П при скорости скольжения $V_{ск} = 13$ м/с, результаты которых приведены в табл. 1.

В условиях граничной смазки коэффициент трения в значительной мере зависит от толщины смазочного слоя и природы материала.

Таблица 1

Результаты испытания на машине трения МТ-22 покрытия из БрАЖ(SiC) при скорости скольжения $V_{ск} = 13$ м/с и разных нагрузках

Нагрузка p , МПа	0,5	1,0	1,5
Коэффициент трения f	0,216	0,22	0,21

Ряд классических работ по исследованию фрикционных материалов в условиях жидкой смазочной среды указывает на то, что коэффициент трения находится в интервале 0,05...0,15.

На рис. 5 представлены разработанные фрикционные диски с плазменным покрытием.

D, мм	d, мм	H, мм	h, мм
216±1	168±0,5	3 _{-0,075}	0,25 ^{+0,06}
176±0,1	133 ⁺¹	3,3 _{-0,075}	0,25 ^{+0,06}

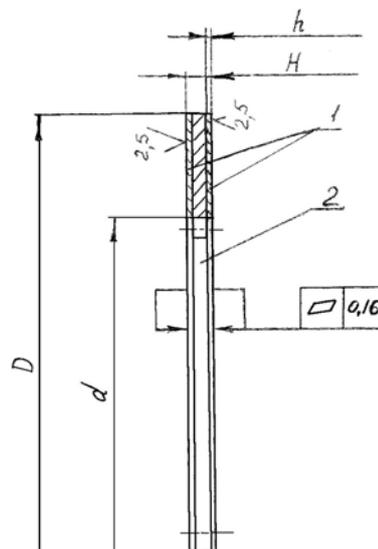


Рис. 5. Фрикционные диски с плазменным покрытием: 1 – фрикционный материал; 2 – основа диска

Технические требования к заготовкам фрикционных дисков с бронзовым покрытием:

- покрытия должны наноситься механической смесью порошков бронзы БрАЖ9-4 ТУ 48-21-642-79 и карбида кремния ГОСТ26327-84 на основу, изготовленную из стали 65Г ГОСТ 1050-74;
- форма и размеры заготовок должны соответствовать рис. 5;
- твердость покрытий по Виккерсу должна быть не менее 1200...1500 МПа (120...150 кгс/мм²);
- адгезионная прочность покрытий должна быть не менее 22,0 МПа (2,2 кгс/мм²);

– пористость покрытий должна быть 15... 20 %;

– микроструктура покрытия должна быть: матрица (твердый раствор алюминия и железа в меди) традиционного бронзового цвета, на отдельных участках матрицы включения интерметаллидов, $\text{Cu}_x\text{Al}_y\text{Fe}_z$ светлосерого с голубизной оттенка. Пример микроструктуры покрытия приведен на рис. 1;

– триботехнические характеристики покрытия при испытании со смазкой ТСЗП-8 ОСТ 38.01365-84 при скорости скольжения 10 м/с

и удельном давлении 4 МПа должны быть: коэффициент трения в паре со сталью 65Г не менее 0,15; темп износа в паре со сталью 65Г не более 4,0 мкм/км;

– при многократных повторениях циклов включения – выключения диски фрикционные должны хорошо противостоять тепловому удару;

– покрытие на заготовке не должно иметь трещин, сколов, отслоений от поверхности основы, видимых невооруженным глазом.

На рис. 6 показаны технологические образцы для определения свойств покрытия.

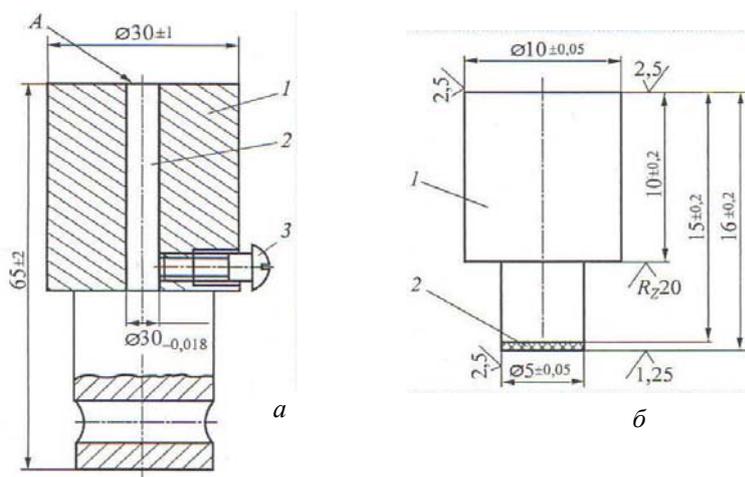


Рис. 6. Технологические образцы для определения свойств покрытий:
а – образец для определения адгезионных свойств покрытий: 1 – обойма; 2 – штырь; 3 – винт; *б* – образец для определения триботехнических свойств: 1 – основа образца из стали 65Г; 2 – фрикционный материал

Требования к методам испытаний заготовок дисков трения: контроль размеров; определение твердости; определение адгезионной прочности по ГОСТ 1497–84 (рис. 6, *а*); определение пористости гидростатическим методом по ГОСТ 18898–73; определение микроструктуры; определение триботехнических характеристик на машине трения по ГОСТ 26614–85 (рис. 6, *б*).

На рис. 7 представлен разработанный диск трения с плазменным фрикционным бронзовым покрытием.

Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота гусеничных машин массой 13,2...18 т представлены в табл. 2.

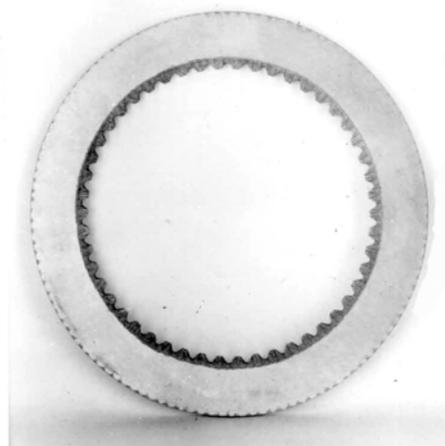


Рис. 7. Разработанный диск трения с плазменным фрикционным бронзовым покрытием $\varnothing 176$ мм толщиной 3,3 мм

Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота

Показатели	Диски трения		
	Диск Ø176 мм		Диск Ø216 мм
	Диск тормоза-синхронизатора	Диск муфты водометного движителя	Диск механизма передач и поворота для второй...пятой передач
Удельная работа трения за одно включение фрикционной муфты, $A_{уд.тр}, кДж/м^2$	29	465	1171...290
Линейная скорость скольжения фрикционного диска относительно контртела на максимальном радиусе $V_{ск}, м/с$	7,17	27	7,06...8,61
Рабочее удельное давление на поверхности трения $q, МПа$	3,3	2,87	3,6...3,1
Время буксования при включении фрикционной муфты $\tau_{букс}, с$	0,03	0,2	1,17...0,31
Температура в зоне трения средняя за один процесс буксования фрикционного диска $t, ^\circ C$;	106	144	192...171
Допустимая температура в зоне трения: – средняя продолжительная работы фрикционного диска $[t_{cp}], ^\circ C$; – максимальная (кратковременная) $[t_{max}], ^\circ C$		500 800	
Диапазон допустимых рабочих температур $[\Delta t], ^\circ C$		-60...+800	
Материал контртела	Сталь 65Г ГОСТ 1050–74, НВ 285...321; Ra 1,25		
Тип трения	В масле ТСЗП-8 ТУ 38-101313-77		

Диски трения с плазменным напылением на основе БрАЖ(SiC) устанавливались в тормоз-синхронизатор в количестве 4 штук (для включения зубчатых муфт реверса и первой передачи) механизма передач и поворота гидромеханической трансмиссии с зубчато-фрикционным переключением передач транспортной гусеничной машины (ГМ) массой 18т и эффективно эксплуатировались на протяжении 1500 км пробега без замечаний.

Вывод

Разработанные диски трения с пористым фрикционным материалом на основе бронзы БрАЖ(SiC) при работе со стальным контртелом со смазкой в условиях эксплуатации фрикционного узла гидромеханической трансмиссии ГМ массой 18 т подтвердили высокие эксплуатационные и технологические качества.

Целесообразно продолжить работу по применению и испытанию предложенных фрикционных дисков с пористой бронзовой поверхностью трения в узлах транспортных гусеничных и колесных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Труханов, В. М. Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов. – М. : Машиностроение, 2001. – 736 с.
2. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия, материалы, технологии, свойства, области применения : справочник / И. М. Федорченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 623 с.
3. Крыхтин, Ю. И. Разработка заготовок дисков трения с молибденовым покрытием для повышения надежности работы в масле в трансмиссионных узлах машин / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – С. 75–78.

УДК 631.361.83

*Н. И. Лебедь, Н. М. Антонов, А. М. Макаров, А. Е. Новиков***РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РОТОРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: nik8872@yandex.ru

Представлены общий вид и описание работы автоматизированного роторного измельчителя плодоовощного сырья. Указаны конструктивные параметры измельчителя и определен положительный эффект его влияния на процесс резания.

Ключевые слова: резание, измельчение, плоский нож, корнеплоды, плоды, режущий аппарат.

*N. I. Lebed, N. M. Antonov, A. M. Makarov, A. E. Novikov***RESULTS OF INVESTIGATIONS OF AUTOMATED ROTARY MIXER OF FRUITS-AND-VEGETABLES RAW MATERIAL****Volgograd State Technical University**

A general view and description of the operation of an automated rotary shredder for fruits-and-vegetables raw materials have been presented. The design parameters of the shredder have been indicated and positive effect of its influence on the cutting process have been determined.

Keywords: cutting, chopping, flat knife, root crops, fruits, cutting apparatus.

Введение

Важным направлением повышения эффективности производства перерабатывающей промышленности Российской Федерации, в частности механической и тепловой обработки продукции растениеводства, является решение проблемы, связанной с глубоким изучением, разработкой и внедрением современных ресурсосберегающих научно-обоснованных технологий, технических средств, обеспечивающих минимизацию всех видов затрат и получение конкурентоспособной готовой продукции, а именно натуральных яблочных и картофельных чипсов с повышенными сроками хранения.

На основе материалов, изложенных в работах Н. М. Антонова [1], С. М. Ведищева, А. В. Брусенкова и других ученых [2], нами выделено направление в совершенствовании процесса резания плодоовощного сырья, а именно снижение общей энергоемкости технологического процесса путем снижения эффекта стесненного резания.

Анализ работ, а также проведенные ранее самостоятельные исследования показали, что указанное направление может быть реализовано уменьшением силы трения продукта о ножи. В результате чего была предложена новая конструкция автоматизированного роторного измельчителя плодоовощного сырья.

Материалы и методы исследования

Устройство (патент № 163146 РФ) относится к сельскому хозяйству, предназначено для

измельчения плодов и корнеклубнеплодов и может быть использовано в индивидуальных фермерских и крестьянских хозяйствах, а также в пищевой промышленности и общественном питании [3].

На рис. 1, *а* изображен роторный измельчитель плодоовощного сырья, общий вид, на рис. 1, *б* – роторный измельчитель плодоовощного сырья, разрез А-А, на рис. 1, *в* – схема расположения ножей ножевого корпуса, вид А.

Устройство работает следующим образом.

Перед загрузкой материала запускали электродвигатель 10 устройства, чтобы задать центробежному ротору 8 необходимую частоту вращения. Обработываемый материал через загрузочный бункер 3 и дозатор барабанного типа 5 поступал в центробежный ротор 8. Посредством передачи крутящего момента валом электродвигателя 10 центробежный ротор 8 равномерно распределял плодоовощной материал по трем направляющим трубам 9. В результате центробежной силы материал удалялся в направлении дугообразных ножей 12 ножевого корпуса 11 с линейной скоростью, необходимой для полного разрезания. При этом плодоовощной материал проникал сквозь дугообразные ножи 12, измельчался на ломтики необходимой толщины и далее через отражатели 16 и выгрузное отверстие 19 поступал в емкость для сбора измельченного материала 18.

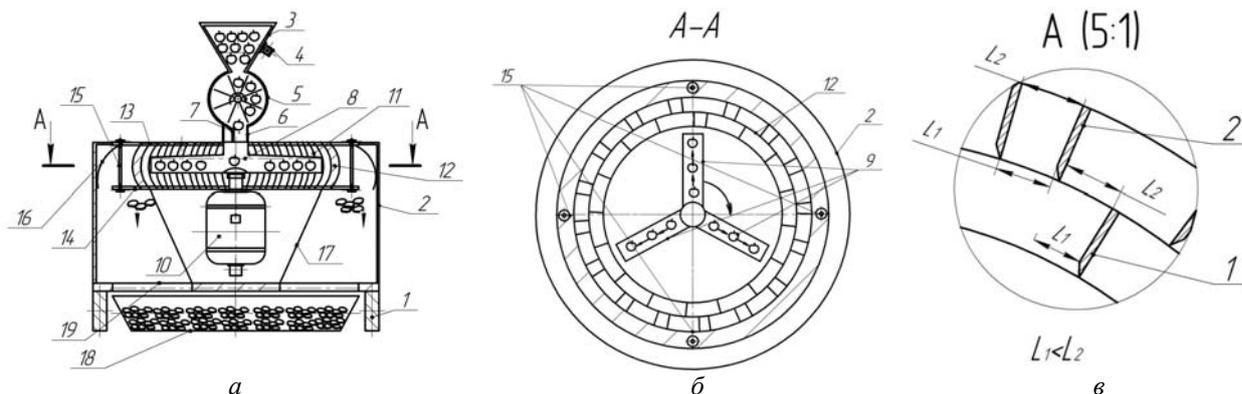


Рис. 1. Роторный измельчитель плодоовощного сырья:

a – общий вид; *б* – разрез А-А: 1 – опоры, 2 – цилиндрический корпус, 3 – загрузочный бункер, 4 – вибратор-встряхиватель, 5 – дозатор барабанного типа, 6 – нижняя горловина, 7 – перекидной клапан, 8 – центробежный ротор, 9 – направляющие трубы, 10 – электродвигатель, 11 – ножевой корпус, 12 – ножи, 13 – верхний диск, 14 – нижний диск, 15 – стяжные болты, 16 – отражатели, 17 – защитный кожух, 18 – емкость для сбора, 19 – выгрузные отверстия; *в* – схема расположения ножей ножевого корпуса, вид А: 1 – ножи первого порядка, 2 – ножи второго порядка

Нами проведены экспериментальные исследования по определению качественных характеристик резания плодоовощной продукции с

использованием экспериментального стенда для исследования процесса резания роторным измельчителем (рис. 2).

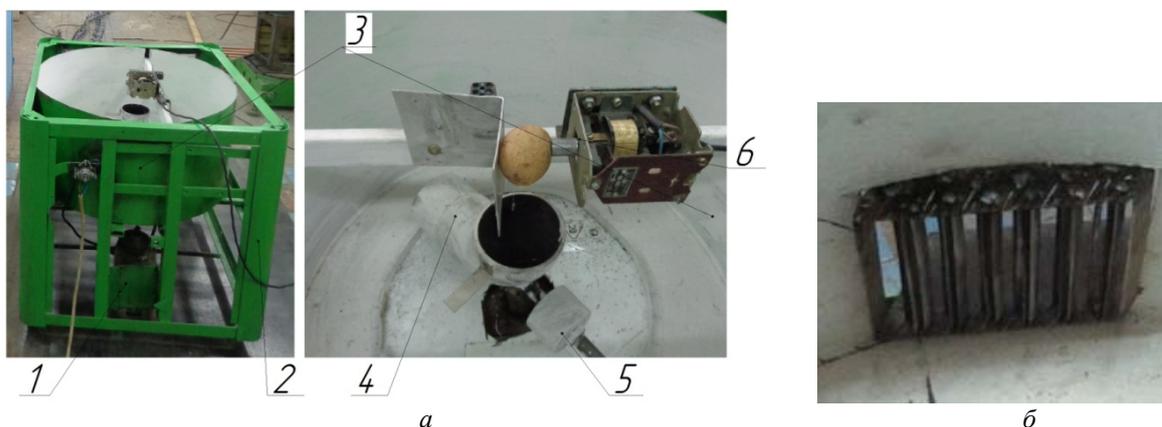


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования процесса резания роторным измельчителем:

a – экспериментальный стенд для исследования процесса резания роторным измельчителем (общий вид), *б* – элемент ножевого корпуса; 1 – привод, 2 – станина, 3 – корпус, 4 – направляющая труба, 5 – балансир, 6 – механизм подачи материала в направляющую трубу

Экспериментальный стенд содержит привод 1, закрепленный на станине 2, корпус 3, внутри которого вращается ротор в виде направляющей трубы 4 с балансиром 5, а также механизм подачи материала в направляющую трубу 6. Внутри корпуса 3 предусмотрена установка ножевого корпуса с различным расположением ножей. Частота вращения ротора регулируется посредством подбора шкивов различного диаметра, а длины ротора – корректировкой количества дополнительных секций трубы. Для целей эксперимента ножевой корпус выполнен не полностью, а представлен в виде сегмента «дуги», с закрепленными в ней ножами.

Привод представлен асинхронным электродвигателем мощностью 1,1 кВт с частотой вра-

щения выходного вала 300...450 мин⁻¹. Электропривод соединен с промышленной сетью 380 В и частотой 50 Гц.

Результаты и их обсуждение

В ходе опытов было определено влияние составляющих элементов процесса резания обрабатываемого сырья на точность соответствия заданной толщине резания с получением оптимальных значений:

- угол атаки ножей – 59...60 град.;
- ширина ножа – 9...11 мм;
- диаметр трубы ротора – 70...72 мм.

При этом точность соответствия заданной толщине резания составит 97,5 %.

Результатами применения разработанного роторного измельчителя является [4, 5]:

- высокая производительность – до 4,5т/час;
- толщина среза ломтика – 2,1 мм;
- низкий процент нестандартного сырья – 4...5 %;
- минимальное соковыделение при резании – не более 1,2 % от массы исходного сырья.

Кроме этого, применение разработанного режущего аппарата с ножами дугообразной формы, радиально расположенных относительно центробежного ротора, позволяет снизить энергоемкость измельчения у корнеплодов картофеля на 35 %, что характеризует более выгодное положение ножей относительно друг друга и разрезаемого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов, Н. М. Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов / Н. М. Антонов, Н. И. Лебедь, А. К. Мамахай // Известия нижевожского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. ВолГАУ. – Волгоград, 2016. – №3 (43). – С. 231–238.

2. Брусенков, А. В. Разработка технологического процесса и устройства для измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Брусенков А. В. – Тамбов, 2015. – 222 с.

3. Патент на полезную модель № 1631461 РФ, МПК В02С18/00. Измельчитель плодов и корнеплодов / Н. М. Антонов, Н. И. Лебедь, В. А. Минаков, Н. А. Линева, Л. С. Цыганкова; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный аграрный университет; заявл. 26.01.2016; опубл. 10.07.2016.

4. Lebed, N. I. Influence of a zigzagging location of the knives in the cutting unit on the energy consumption during the cutting process of horticultural produce / N.M. Antonov, N.I. Lebed, A.M. Makarov. – Электронный периодический научный журнал «Journal of Food Process Engineering». 2015. №3 С. 262-270. URL: <http://authorservices.wiley.com/bauthor/onlineLibraryTPS.asp?DOI=10.1111/jfpe.12162&ArticleID=1420272> (дата обращения 19.04.2015)

5. Antonov, N. M. Energetic calculation of an apple chopper with zigzagging knife location in the cutting unit / N.M. Antonov, N.I. Lebed, A.M. Makarov. – Электронный периодический научный журнал «Journal of Food Process Engineering». 2016. – doi:10.1111/jfpe.12352 – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.12352/full>

УДК 004.514

А. В. Петрухин, Д. О. Марков, К. А. Шевченко, В. Н. Борозенец

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: htr753@list.ru

С целью повышения безопасности работы с автоматизированными системами на производстве предлагается введение новых технологий реализации человеко-машинного интерфейса. Предложен новый метод использования современных технологий для управления автоматизированными системами.

Ключевые слова: eye tracking, голосовое управление, нейроинженерия, автоматизация управление.

A. V. Petrukhin, D. O. Markov, K. A. Shevchenko, V. N. Borozenets

NEW HUMAN-MACHINE INTERFACE IMPLEMENTATION TECHNOLOGIES FOR THE MANAGEMENT OF AUTOMATED SYSTEMS

Volgograd State Technical University

In order to improve the safety of working with automated systems in production, new technologies for implementing the human-machine interface are being considered. A new method of using modern technologies for the management of automated systems has been proposed.

Keywords: eye tracking, voice control, neuroengineering, automation control.

В данной статье исследуются современные технологии реализации человеко-машинного интерфейса для управления автоматизированными системами. Одной из таких технологий является технология управления автоматизированными системами с помощью голосовых команд [1]. Сегодня существуют два основных вида технологий распознавания голоса. Один из них – это распознавание речи, зависящее от диктора, так называемые «Голосозависимые

системы» [2]. При использовании данных систем пользователь должен сначала научить систему распознавать его голос, и только после этого она сможет корректно работать. Второй – это распознавание речи, не зависящее от диктора, так называемые «Голосонезависимые системы» [3]. Эти системы способны распознать речевые команды, независимо от диктора. Системы такого типа самые сложные в разработке и довольно дорогостоящие, а точность распо-

знания не является высокой, но зато эти системы более гибкие. Наиболее простые в реализации являются системы распознавания изолированных слов. Данные системы работают с дискретными словами – в этом случае требуется пауза между словами. Это самая простая форма распознавания, так как в этом случае легко определяется конец речевого сигнала, а признание слова не затрагивает другие слова.

Следующей технологией является технологии управления автоматизированными системами с помощью взгляда, что называется окулографией или *eye tracking* [4]. На данный момент наличие подобных методов способно удовлетворить множество потребностей в различных сферах производства. Современные методы компьютерной окулографии, основанные на видеоанализе, активно набирают популярность. Эти методы предполагают использование широкодоступного видеоборудования, начиная от встроенных *web*-камер до переносных высокоточных устройств получения видеозображения человеческого лица, подключаемых к персональному компьютеру. Во время просмотра объекта человеком перемещение зрачка происходит быстрыми, скачкообразными перемещениями (которые называются саккады), а получает и запоминает информацию человек во время фокусировки зрачка на каком-либо объекте (так называемые фиксации). Так мозг сканирует окружающее пространство, создавая постоянно обновляющуюся карту мира.

Каждая фиксация обладает несколькими характеристиками: время (когда смотрели), координаты (куда смотрели) и продолжительность (в течение какого времени смотрели). На данный момент существует два вида *eye trackers* [5]. Это мобильные *eye trackers* и стационарные. Мобильные устройства как правило выглядят как очки и одеваются непосредственно на голову пользователя перед его глазами. Данный тип *eye trackers* позволяет респонденту свободно двигаться и перемещаться в процессе записывания данных устройством отслеживания глаз. Стационарные устройства как правило более похожи на веб-камеру и располагаются в районе исследуемого объекта, например, на мониторе. При этом пользователь должен находиться непосредственно перед устройством отслеживания глаз на расстоянии достаточно для определения зрачка глаза.

Следующей технологией является самая ожидаемая технология ближайшего будущего.

Это нейроинженерные технологии, позволяющие человеку управлять компьютерами и робототехникой с помощью «силы мысли» – одна из наиболее заметных областей на стыке науки и техники [6]. Наиболее ярким технологиям в этой области посвящены статьи в самых престижных научных журналах, – это так называемые инвазивные устройства считывания мыслей (УСМ). Для «подключения» их к мозгу необходима нейрохирургическая операция, чаще всего – вживление электродов непосредственно в мозг. Это серьезный риск, неприемлемый для здоровых людей и нежелательный даже для тяжелых пациентов. Кроме того, стоимость таких операций на людях слишком высока. Поэтому исследования с использованием инвазивных в течение еще многих лет будут выполняться в основном на животных [7]. Наиболее распространенными коммерческими устройствами являются неинвазивные УСМ. Датчики таких устройств считывают идущие из мозга электрические сигналы прямо с поверхности кожи головы. Другими словами, в этих УСМ используется та самая электроэнцефалограмма (ЭЭГ).

В нашем решении мы предлагаем использовать одну из вышеперечисленных технологий на производстве для повышения безопасности труда. Рассмотрим данное решение на примере оператора на конвейере. Во время работы у данного специалиста, в частности, может возникнуть необходимость экстренного отключения конвейера в целях безопасности сотрудников производства. Технология управления автоматизированной системой с помощью мысли тяжело реализуема и слишком дорогостоящая. Поэтому для реализации данного решения была выбрана технология управления автоматизированной системой с помощью взгляда. Данная технология значительно быстрее по отклику в сравнении с технологией управления с помощью голосовых команд, а также наиболее отказоустойчива поскольку в экстренной ситуации голос человека может измениться, и технология голосового управления может сработать некорректно либо не сработать вовсе. Наша разработка представляет собой надстройку для автоматизированной системы, которая располагается поверх интерфейса и занимает всего две итерации.

При необходимости экстренного отключения конвейера работнику необходимо посмотреть на красную область, расположенную поверх интерфейса программы. Это первая итера-

ция. При переводе взгляда на данную область подготавливаются все службы необходимые для отключения конвейера и на экране появляется вторая область. При переводе взгляда на вторую область все службы запускаются и конвейер отключается. Это является второй итерацией. Обе итерации занимают менее одной секунды. Считывающим устройством для распознавания взгляда используется обыкновенная веб-камера с разрешением Full HD. Также можно использовать более высокоточное профессиональное видеоборудование, что ускорит работу надстройкой.

Использование данной технологии призвано обеспечить максимально быстрое отключение конвейера на производстве, что приведет к увеличению безопасности.

Так же стоит отметить, что данная технология управления взглядом может использоваться и в других сферах, например, экономической. В качестве примера, можно привести использование в работе с комплексами инструментальных программных средств автоматизации биржевых технологий [8–11]. Игрок, который торгует внутри дня, должен совершать огромное количество операций в секунду, все действия он выполняет с помощью своих рук, используя мышь и клавиатуру. Комплексируя традиционные способы интерактивного взаимодействия с компьютером и технологию управления с помощью взгляда, он значительно ускорит выполнение всех операций, за счет оптимизации и сокращения времени, уходящего на механическое (ручное) взаимодействие с программным интерфейсом.

УДК 621.9.015

А. Л. Плотников, Ж. С. Тихонова, П. Е. Еплов, А. С. Павлов

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ТЕРМОЭ.Д.С. ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЕРМОПАРЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ КОНТАКТНЫХ ПАР «БЫСТРОРЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ – СТАЛЬНАЯ ЗАГОТОВКА»

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tihonova-ganna@rambler.ru

С позиций физики твердого тела рассматривается всегда сопутствующий процессу металлообработки термоэлектрический эффект естественной термопары «быстрорежущий инструмент – стальная заготовка» и возможность использования его для оперативной оценки изменяющихся свойств контактных пар. Предложена скорректированная математическая модель расчета скорости токарной обработки с использованием этого сигнала из зоны резания в условиях предварительного пробного прохода.

Ключевые слова: быстрорежущий инструмент, термоэ.д.с. пробного прохода, математическая модель расчета скорости резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гребнов, С. В. Аналитический обзор методов распознавания речи в системах голосового управления / С. В. Гребнов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2009. – №. 3. – С. 83–85.
2. Щербатов, И. А. Система интерпретирования голосовых команд для управления мобильным роботом / И. А. Щербатов, И. О. Проталинский, В. А. Бородин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №. 6. – С. 14–18.
3. Шелепов, В. Ю. Построение системы голосового управления компьютером на примере задачи набора математических формул / В. Ю. Шелепов, А. В. Ниценко, А. В. Жук // Штучный интеллект. – 2010.
4. Хузягулова, К. Л. Разработка интерфейса «Глаз-компьютер» / К. Л. Хузягулова, Т. В. Мирина // Перспективы науки-2015. – 2015. – С. 114–116.
5. Duchowski A. T. Eye tracking methodology //Theory and practice. – 2007. – Т. 328.
6. Румянцева, В. А. Использование теории цепей Маркова для описания нейрокомпьютера / В. А. Румянцева, В. Д. Цыганков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2015. – №. 2. – С. 3–11.
7. Павловский, И. С. Формальная интеграция научно-технической информации в области разработки и применения нейрокомпьютеров / И. С. Павловский // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2014. – №. 1. – С. 011–015.
8. Петрухин, А. В. Архитектура биржевого робота для работы в среде торгового терминала QUIK / А. В. Петрухин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (157) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 138–141.
9. Петрухин, А. В. Компьютерная визуализация биржевых данных о динамике фондового рынка / А. В. Петрухин, А. С. Стешенко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (163) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 124–129.
10. Петрухин, А. В. Мультидисциплинарный подход к реализации инструментальных средств информационного поиска и поддержки принятия решений / А. В. Петрухин, А. С. Колесников, А. А. Фролов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (163) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 186–190.
11. Петрухин, А. В. Структуризация рисков при формировании комплексов инструментальных программных средств автоматизации на основе спиральной модели Бозема / А. В. Петрухин, А. А. Фролов, А. С. Колесников // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (163) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 190–196.

A. L. Plotnikov, Zh. S. Tikhonova, P. E. Eplov, A. S. Pavlov

THE PHYSICAL BASIS OF USING THE VALUE OF THERMO-EMF NATURAL THERMOCOUPLE FOR THE RAPID ASSESSMENT OF THE PROPERTIES OF THE CONTACT PAIRS "HIGH SPEED TOOL – STEEL BILLET"

Volgograd State Technical University

From the standpoint of physics of a solid body is considered always accompanied by the process of metals thermoelectric effect in a natural thermocouple "high speed tool – steel billet", and the possibility of its use for the rapid assessment of the changing properties of the contact pairs. The proposed adjusted mathematical model calculate the speed of turning with using this signal from the cutting zone in the conditions of pre-trial pass.

Keywords: high speed tool, thermo-EMF. test pass, a mathematical model for calculating cutting speeds.

В практике токарной обработки коррозионно-стойких сталей на универсальных станках и станках с ЧПУ часто применяют резцы из быстрорежущей стали марок P18, P9, P6M5 и других модификаций. В силу своих высоких прочностных свойств по сравнению с твердосплавными инструментами, они обеспечивают надежность протекания процесса резания на тех операциях, где прочность инструмента является определяющей. При аналитическом способе расчета скорости резания в справочно-нормативной литературе рекомендуется использовать известную расчетную формулу вида:

$$V = \frac{C_v}{T^m I^x S^y} K_v, \quad (1)$$

где C_v – безразмерный коэффициент; m , x , y – показатели степени; K_v – результирующий поправочный коэффициент, равный произведению ряда поправочных коэффициентов, которые учитывают: изменение главного угла резца в плане φ , K_φ ; изменение вспомогательного угла резца в плане φ_1 , K_{φ_1} ; радиуса при вершине резца r , K_r , марку (режущие свойства) инструментального материала, K_u ; механические свойства обрабатываемого материала, K_m .

При аналитическом способе расчета скорости резания с использованием справочно-нормативной литературы разных авторов следует иметь в виду, что для принятых одинаковых условий обработки, величины расчетной скорости резания значительно отличаются друг от друга. Анализ численных значений показателей степени при подаче, глубине резания и принятой стойкости, анализ значений поправочных коэффициентов в формуле (1), рекомендуемых различными справочниками [1], [2], [3], [4] показал, что основная причина расхождения результатов расчета состоит в том, что справочники используют различные значения скоростного безразмерного коэффициента C_v . Его значения для диапазона подач менее 0,25 мм/об с применением охлаждения лежат в ин-

тервале 60,8–94. Следует отметить, что каждый источник расчета на основании проведенных стойкостных испытаний приводит средние значения этого безразмерного коэффициента, при этом ориентируясь на применение основных марок быстрорежущих инструментов P18, P6M5. Априорно принято условие, что все другие марки быстрорежущих инструментов обладают такими же режущими свойствами. Практика металлообработки не подтверждает это условие. Разброс справочного значения величины скоростного безразмерного коэффициента C_v приводит к тому, что на этапе проектирования технологического процесса токарной обработки расчетные значения скорости резания отличаются друг от друга на 35–70 %, что не обеспечивает заданной стойкости инструмента.

В. А. Синопальников в работе [5] увязывает различные значения рассчитанных скоростей резания, полученных с использованием различных справочников, с вероятностной природой допустимого разброса режущих свойств инструментальных и обрабатываемых материалов в партиях поставки и с тем, что каждая группа исследователей работала с какой-то частью из них. Эти значения верны только для тех условий, в которых проводились стойкостные испытания. Использование их во всем диапазоне допустимого разброса неизбежно приводит к несовпадению значений фактической стойкости инструмента, которая должна обеспечиваться выбранной скоростью резания.

В. К. Старковым [6] выдвинута концепция обеспечения стабильности и качества процесса металлообработки путем совершенствования математических моделей расчета его параметров за счет получения предварительной информации о свойствах каждого инструмента и обрабатываемой заготовки.

В развитие этой концепции в работе [7] предложена принципиально новая методика расчета параметров процесса токарной и фрезерной обработки сталей, основанная на полу-

чении предварительной информации о свойствах контактных пар за счет всегда сопутствующего резанию эффекта естественной термопары (сигнал термоэ.д.с.), величина которого фиксируется в строго постоянных условиях предварительного пробного прохода. Предложено использовать величину термоэ.д.с. пробного прохода контактной пары инструмент – стальная заготовка как оценочную характеристику всего диапазона изменения их свойств, с введением этой характеристики в математические модели расчета параметров процесса резания. Введение в расчетные модели оперативного параметра, характеризующего свойства контактной пары позволило значительно повысить точность расчета. Величина погрешности сократилась до 10–15 % против 70–90 %. Разработки ориентированы на применение твердосплавного инструмента.

Целью статьи является исследование возможности применения этих методик при расчете скорости резания в условиях токарной обработки сталей, когда используется быстрорежущий инструмент. Почему выбран способ оценки свойств, основанный на проведении пробного прохода и измерении возникающей при этом величины термоэ.д.с.?

В пользу выбора метода пробного прохода для оценки свойств контактных пар и обеспечения на этой основе точности расчета параметров процесса металлообработки, послужили следующие доводы:

1. Существующие в настоящее время способы оценки свойств инструментов и стальных заготовок дают информацию отдельно по инструментальному или по обрабатываемому материалу. В то же время при работе станка реальная контактная пара собирается случайным образом из допустимых диапазонов разброса ее составляющих и наличие информации о ее свойствах предопределяет надежность выбора (точность расчета) скорости резания для этой случайной пары.

2. Наличие неотъемлемого, всегда сопутствующего процессу резания сигнала термо-э.д.с. естественной термопары, дающего возможность вести 100 % контроль сочетания всего диапазона разброса свойств контактируемых пар без дополнительных специализированных систем сбора информации, (виброакустические системы, лазерные системы).

3. Труднодоступность зоны резания длястройки каких-либо датчиков с целью получе-

ния оперативной информации о свойствах контактируемых пар и условиях резания.

Традиционно, в металлообработке, для измерения температуры резания используется величина термоэлектродвижущей силы (термо-э.д.с.) естественной термопары резец – стальная заготовка. Этому предшествует тарировка естественной термопары, которая позволяет по графику зависимости температуры от термо-э.д.с. судить об уровне температуры в зоне обработки для этой контактной пары. При смене хотя бы одного элемента естественной термопары тарировочный график новой контактной пары будет другим, хотя режимы обработки остаются неизменными. Точность определения температуры нарушается. Причина в том, что изменяется электрохимический потенциал новой контактной пары. Если же обеспечить постоянство режимов резания тестового пробного прохода при смене контактных пар, то появляется возможность оперативно оценить изменение их электрохимического потенциала, а значит, косвенно, и их свойств. Используя положения физики твердого тела можно найти взаимосвязь химических и физических свойств контактируемых материалов с их термоэлектрическими свойствами.

В общем виде значение термоэ.д.с. естественной термопары определяется выражением [8]

$$E = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (\Theta_a - \Theta_b) = \alpha_{1-2} (\Theta_a - \Theta_b), \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – значения удельной или дифференциальной термоэ.д.с. для двух различных материалов (инструмент и стальная заготовка); $\alpha_{1-2} = \alpha_2 - \alpha_1$ – удельная или дифференциальная термо-э.д.с. для данной пары, зависящая от природы контактируемых тел и температуры; Θ_a и Θ_b – установившиеся температуры горячего и холодного спая естественной термопары.

Результирующее значение удельной термоэ.д.с. пары складывается из трех составляющих: фоновой, объемной и контактной [8]. В режиме пробного прохода при обработке сталей быстрорежущими инструментами уровень температур в зоне резания находится в интервале 400–450 °С, поэтому влияние фоновой и объемной составляющих ввиду их малого значения можно не учитывать. Контактная составляющая удельной термоэ.д.с. обусловлена зависимостью контактной разности потенциалов от температуры, связанной с зависимостью химического потенциала μ от температуры. Из условия выравнивания электрохимических по-

тенциалов электронов в контактируемых поверхностях металлов следует, что:

$$\alpha_k = \frac{\mu_1 - \mu_2}{e} = \frac{\chi_2 - \chi_1}{e}, \quad (3)$$

где χ_2 – работа выхода электронов из детали; χ_1 – работа выхода электронов из быстрорежущего инструмента; e – заряд электрона.

Анализ выражения (3) показывает, что при постоянных режимах резания пробного прохода различная величина термоэ.д.с. пары сталь – быстрорежущий инструмент определяется разностью работ выхода электронов из стали и инструмента, то есть величиной α_k и разностью температур горячего и холодного спая естественной термопары.

В работе [9], показано, что работа выхода

чувствительна к объемным изменениям в сплавах при изменении состава, структуры и образовании новых фаз и отражает, наряду с другими свойствами металлов (плотностью, температурой плавления, модулем упругости, электропроводностью, теплопроводностью) силу межатомной связи. При неизбежном допустимом разбросе свойств быстрорежущих сталей, связанным с допуском по ГОСТ 19265–73 на их химический состав (указаны в таблице) и допуском на химический состав обрабатываемых сталей, с учетом того, что на станке контактные пары собираются случайным образом, актуальной является проблема предварительной оперативной оценки их свойств. Наличие такой информации способствует повышению точности расчета скорости резания.

Марки стали	Содержание легирующих элементов, %					
	C	W	Mo	Cr	V	Co
P18	0,7–0,8	17–19	0,5–1	3,8–4,4	1–1,4	–
P6M5	0,8–0,9	5,5–6,5	4,5–5,5	3,8–4,4	1,8–2,2	–
P9Ф5	1,4–1,5	9–10,5	До 1	3,8–4,4	4,3–5,1	–
P6M5K5	0,8–0,9	5,7–6,7	4,8–5,3	3,8–4,3	1,7–2,4	4,7–5,2

С другой стороны, стальные заготовки, поступающие на обработку, являются продуктом определенного металлургического процесса. Их физико-механические свойства, химический состав, структура, фазовый состав также подвержены колебаниям в пределах допуска, что приводит к изменению их обрабатываемости до 20–25 % и более. Работа выхода электронов из стали позволяет учесть эти колебания.

При изменении свойств контактируемой пары (новый резец или новая стальная заготовка) величина термоэ.д.с. пробного прохода меняется под воздействием удельной термоэ.д.с., представляющей собой разность работ выхода электронов из стали и твердого сплава. Следует отметить, что величина термоэ.д.с. пробного прохода линейно связана с геометрическими параметрами инструмента и оперативно учитывает эти изменения [7]. При изменении режущих свойств инструмента внутри его марочного состава и значительном разбросе обрабатываемости стальных заготовок одной марки, существующие методики выбора режимов резания не обеспечивают достаточного уровня точности расчета скорости резания. Предложено ввести в математическую модель расчета скорости резания величину термоэ.д.с. пробно-

го прохода как дополнительный информационный параметр о свойствах контактируемых пар. Скорректированная формула (4) выглядит следующим образом:

$$V = \frac{24,33 - 2,75E}{T^{0,125} t^{0,25} S^{0,33}} \cdot \quad (4)$$

В формуле (4) безразмерный скоростной коэффициент представлен как функция от величины термоэ.д.с. пробного прохода, несущей информацию о свойствах пары «быстрорежущий инструмент – стальная заготовка» [10]. Введение дополнительного информационного параметра в расчетную формулу скорости резания позволило рассчитывать эту величину с ошибкой не более 10–12 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет режимов резания при точении : метод. рекомендации / под ред. В. И. Байкалова, А. М. Колокатова, И. Д. Малинина. – Москва, 2000. – 234 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / под ред. А. И. Малова. – М.: Машиностроение, 1972. – 568 с.
3. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для машиностроительных вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М., 1986. – 304 с.
4. Справочник нормировщика-машиностроителя. Т. 2 / под ред. Е. И. Стружестраха. – Москва : Машгиз, 1961. – 674 с.

5. Синопальников, В. А. Надежность и диагностика технологических систем : учеб. / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – М. : Высш. шк., 2005. – 343 с.

6. Старков, В. К. Физика и оптимизация режимов резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.

7. Плотников, А. Л. Автоматизированные способы определения значений параметров процесса токарной и фрезерной обработки на станках с ЧПУ : монография / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Т. В. Уварова. – Старый Оскол : ТНТ, 2017. – 212 с.

8. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела : учеб. посо-

бие / Г. И. Епифанов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1977. – 288 с.

9. Савицкий, Е. М. Электрические и эмиссионные свойства сплавов / Е. М. Савицкий, М. В. Буров. – М. : Наука, 1978. – 294 с.

10. Способ автоматизированного расчета скорости резания при токарной обработке коррозионно-стойкой стали быстрорежущим инструментом на станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, С. Н. Вальковский, Н. Г. Зайцева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7 (110) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 9). – С. 99–101.

УДК 621.382

Д. В. Сотников, Р. Н. Кулагин, О. С. Харькин, А. М. Макаров

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрен принцип действия компенсационного стабилизатора напряжения, а также методика выбора составляющих элементов схемы стабилизатора по заданным условиям. Разработан алгоритм и представлена программа, которая позволяет проводить автоматический расчет и выбор элементов компенсационного стабилизатора напряжения на основе базы данных, содержащей информацию о параметрах этих элементов. Программа может быть использована при проектировании и изготовлении компенсационных стабилизаторов напряжения.

Ключевые слова: компенсационный стабилизатор напряжения, база данных, алгоритм, программа, автоматизированный расчет.

D. V. Sotnikov, R. N. Kulagin, O. S. Harkin, A. M. Makarov

AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING THE BASIC PARAMETERS OF THE COMPENSATION VOLTAGE STABILIZER

Volgograd State Technical University

The principle of compensation voltage stabilizer and the method of selection of component circuit elements of the stabilizer at the specified conditions has been considered. The algorithm and the program has been developed. It allows has been carried out an automatic calculation and selection of elements the compensation voltage stabilizer, witch basis of a database, containing information about the parameters of these elements. The program can be used in the design and manufacture of a compensation voltage stabilizers.

Keyword: compensation voltage stabilizer, database, algorithm, program, automated calculation.

Стабилизаторы напряжения являются вторичным источником питания и предназначены для поддержания постоянной величины выходного напряжения при изменении входного напряжения или тока. Также могут использоваться в качестве сглаживающего фильтра для уменьшения пульсаций выходного напряжения.

Компенсационный стабилизатор напряжения (КСН) представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования (САР). В схеме КСН производится сравнение образцового напряжения с выходным сигналом, разность между которыми усиливается и через регулирую-

щий элемент воздействует на выходное напряжение, приближая его к заданному значению.

Рассмотрим схему КСН, представленную на рис. 1. В качестве источника образцового напряжения U_0 используется стабилитрон VD1, включенный через резистор R_1 . Регулирующий элемент (РЭ) – это транзистор VT1. Делитель напряжения (ДН) на резисторах R_2 и R_3 выполняет функцию датчика напряжения, то есть создает сигнал обратной связи U_{oc} . Сравнение выходного напряжения с образцовым осуществляет операционный усилитель DA1, имеющий два входа.

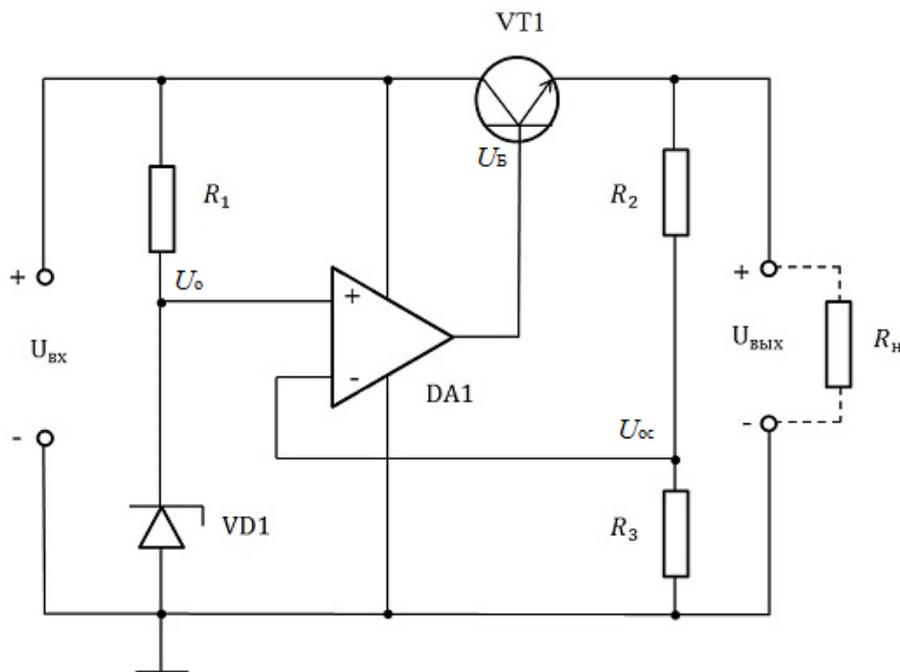


Рис. 1. Схема компенсационного стабилизатора напряжения

Принцип действия схемы рассмотрим на примере возмущающего воздействия по току нагрузки I_H .

Транзистор VT1 управляется усиленной разностью напряжений $U_B = K_U(U_o - U_{oc})$, где K_U – коэффициент усиления DA1. При подключении нагрузки R_H в первый момент выходное напряжение $U_{вых}$ и сигнал U_{oc} уменьшаются за счет конечных значений выходных сопротивлений VT1 и источника входного напряжения. Разность напряжений $U_o - U_{oc}$ и сигнал U_B на базе VT1 при этом увеличиваются, транзистор VT1 открывается в большей степени и выходное напряжение восстанавливается до исходного с заданной степенью точности. Погрешность стабилизации схемы определяется в общем случае выражением [1]:

$$\varepsilon_h = \frac{hK_h}{1 + K_U K_{oc} K_{PЭ}}$$

где $\varepsilon_h = \Delta U_{вых}$ – ошибка по возмущающему воздействию, $h = \Delta I_H$ – возмущающее воздействие, $K_h = R_{вых}$ – коэффициент передачи по возмущающему воздействию, K_U – коэффициент усиления DA1, $K_{oc} = K_{дн}$ – коэффициент передачи цепи обратной связи, $K_{PЭ} = K_{VT1}$ – коэффициент передачи R_3 .

Действие схемы при изменении $U_{вх}$ происходит аналогично.

Основными параметрами компенсационного стабилизатора напряжения, по которым вы-

бираются его элементы, являются выходное напряжение $U_{вых}$ и ток нагрузки I_H . Приведем методику расчета компенсационного стабилизатора напряжения [2].

1. Определяем необходимое входное напряжение стабилизатора $U_{вх} = K_3(U_{КЭ} + U_{вых})$, где $U_{КЭ}$ – это перепад напряжений для нормальной работы транзистора в качестве PЭ ($U_{КЭ} = 3 \div 5$ В), $K_3 = 1,1 \div 1,2$ – коэффициент запаса, учитывающий допустимое снижение входного напряжения $U_{вх}$.

2. Выбираются параметры ОУ DA1:

$U_{п} = 0,5U_{вх}$ – напряжение питания; K_U – коэффициент усиления; $R_{выхОУ}$ – выходное сопротивление; $I_{ОУ_{макс}}$ – максимальный ток; $R_{выхОУ}$ и K_U могут быть определены из графиков зависимостей $R_{выхОУ} = f(U_{п})$ и $K_U = f(U_{п})$ соответственно.

3. Выбираются параметры стабилитрона VD1:

$U_{ст}$ – напряжение стабилитрона; $I_{ст_{мин}}$ – минимальный ток стабилитрона.

4. Выбирается тип силового транзистора VT1:

по току: $I_{K_{макс}} = 1,25I_H$ – максимальный ток коллектора; по напряжению: $U_{КЭ_{макс}} = 1,25U_{КЭ}$ – максимальное напряжение коллектор – эмит-

тер; по мощности: $P_{K_{\text{ПВКК}}} = 1,5U_{KЭ}I_N$ – мощность, рассеиваемая на коллекторе.

Проводится проверка по коэффициенту передачи:

$$\beta \geq \frac{I_N}{I_{\text{ОУ ПВКК}}}$$

$\beta_{\text{факт}} > \beta$ – определяется при $I_K = I_N$ из графика зависимости $\beta = f(I_K)$

5. Рассчитывается сопротивление резисторов:

$$R_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{СТ}}}{I_{\text{СТ МИН}}} \quad \begin{cases} I_{\text{ДН}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2 + R_3} \\ U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{СТ}}}{K_{\text{ДН}}} \end{cases}$$

где $K_{\text{ДН}} = K_{\text{ОС}} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ – коэффициент ДН, $I_{\text{ДН}}$ – ток ДН ($I_{\text{ДН}} = 5 \div 10$ мА).

6. Определяется падение выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ при подключении нагрузки

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{I_N r_{\text{ВЫХ}}}{1 + K_{\text{ДН}} K_U K_T}$$

где $r_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{R_{\text{ВЫХОД}}}{\beta_{\text{факт}}}$, $K_T \approx 0,95$ – коэффициент передачи силового транзистора.

На основе данной методики была разработана программа расчета параметров компенсационного стабилизатора напряжения. На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма расчета программы.

На основе этого алгоритма с помощью пакета программ *Borland Delphi 7.0* компании *Borland Software Corporation* была разработана программа «Выбор компенсационного стабилизатора напряжения» на языке программирова-

ния *Delphi*. Исходное окно программы представлено на рис. 3.

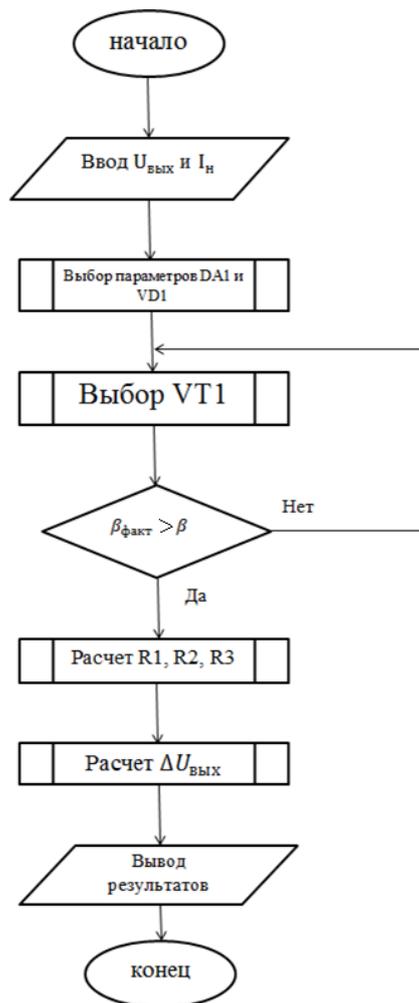


Рис. 2. Блок-схема программы

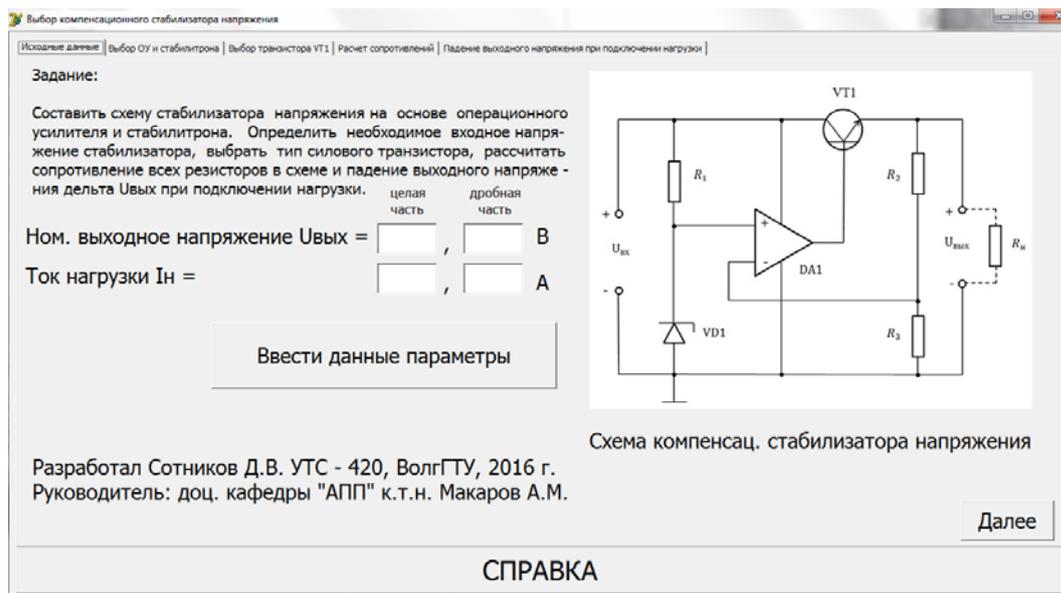


Рис. 3. Исходное окно программы

Для начала работы с программой вводятся значения выходного напряжения и тока нагрузки. Для перехода между вкладками программы используются кнопки «Назад» и «Далее».

Выбираются модели операционного усилителя и стабилитрона. Важной особенностью программы является интеграция в программу баз данных, которые содержат в себе модели элементов и их характеристики. Имеется возможность редактирования баз данных с внесением новых моделей, удалением или изменением характеристик уже существующих. Пример

интегрированной в программу базы данных представлен на рис. 4.

Также для пункта 2 методики расчета параметров компенсационного стабилизатора напряжения предусмотрено задание значений ОУ по графикам.

Далее расчет параметров идет в соответствии с алгоритмом. Стоит также отметить, что выбор подходящих моделей транзисторов VT1 и резисторов R_1 , R_2 , R_3 осуществляется с помощью проверки на соответствие условиям баз данных, интегрированных в программу.

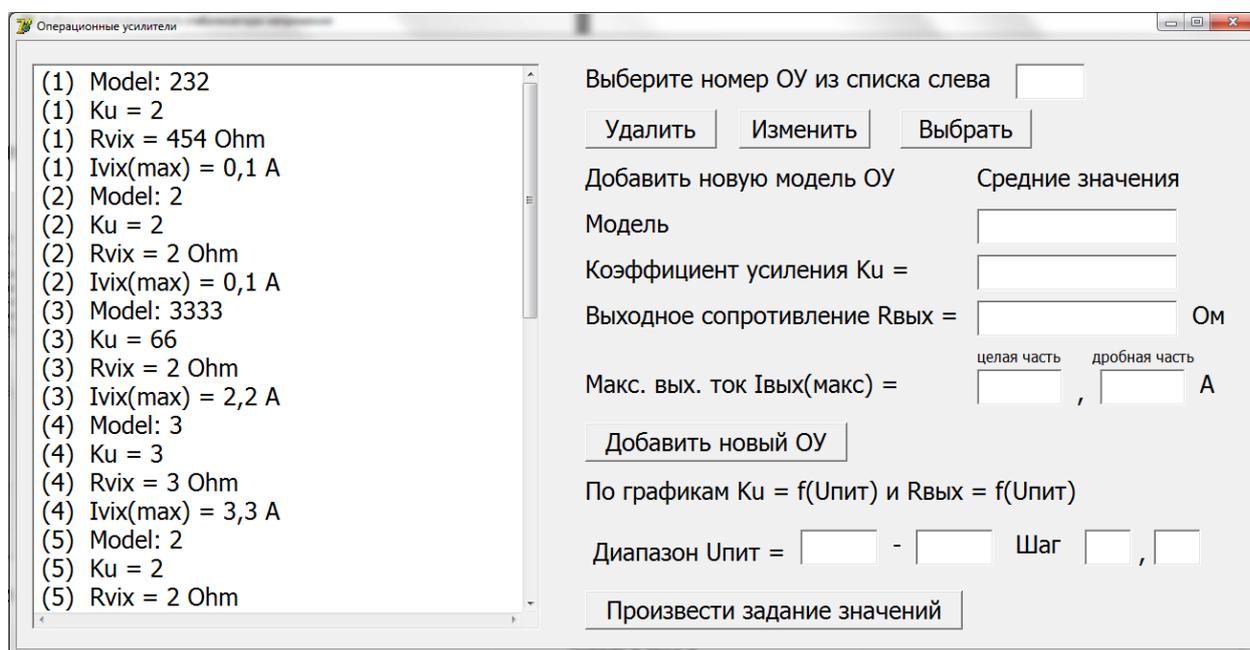


Рис. 4. База данных ОУ

Программа имеет функцию проверки на правильность ввода данных. При вводе неправильного значения выводятся соответствующие предупреждения, которые останавливают процесс расчета, пока не будет введено корректное значение. При возникновении сложностей или проблем работы с программой можно обратиться к справке, нажав на кнопку «СПРАВКА» внизу основного рабочего окна. В ней подробно расписана последовательность работы с программой и описаны причины возникновения ошибок и условия их предупреждения.

После расчета параметров компенсационного стабилизатора напряжения все подобранные модели элементов и их характеристики могут быть сохранены в файл формата *.txt. Для этого необходимо нажать на соответствующую кнопку.

На рис. 5 показаны результаты работы программы, представленные в виде txt-файла. Исходные данные для расчета: выходное напряжение $U_{вых} = 4,6 \text{ В}$, ток нагрузки $I_n = 0,44 \text{ А}$. ОУ DA1 – K140УД5А [3], стабилитрон VD1 – KC133А [4]. Транзистор выбирается по справочнику [5].

```

Выбор компенсационного стабилизатора напряжения — Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
Исходные данные: Номинальное выходное напряжение Uвых = 4,6 В Ток нагрузки In = 0,44 А Операционный усилитель: K140Y5A Стабилизатор: KC133A
Результаты расчета:
1): Входное напряжение стабилизатора Uвх должно превышать выходное Uвых на величину падения напряжения на силовом транзисторе Uвт - Uвых = Uкэ. Этот перепад напряжений необходим для нормальной работы силового транзистора как результирующего элемента и должен быть не менее 3 В (Uкэ = 3 - 5 В).
Принимаем Uкэ = 4 В. Тогда Uвх = Kз(Uвых + Uкэ) = 1,2(4,6 + 4) = 8,6 В.
Uпит = 0,5 * 8,6 = 4,3 В
2): Характеристики ОУ при заданном Uпит: (1) Model: K140Y5A Ku = 800 Rvix = 200 Ohm Ivix(max) = 0,002 A
Характеристики стабилизатора (1) Model: KC133A Ust = 3,3 V Ist(min) = 0,003 A
3): Выбираем тип силового транзистора VT1 по следующим условиям:
по току: Ik(max) >= 1,25 * In = 1,25 * 0,44 = 0,55 А
по напряжению: Uк(max) >= 1,25 * Uкэ = 1,25 * 4 = 5 В
по мощности: Pк(max) >= 1,5 * Uкэ * In = 1,25 * 4 * 0,44 = 2,24 Вт
По данным условиям выбираем транзистор: (1) Model: KT683E Ik(max) = 1 А Uк(max) = 40 В Pк(max) = 8 Вт B(fact) = 160
Проверим транзистор по коэффициенту передачи: B >= In/Ivix(max)(OУ) Iвхх(max)(OУ) = 0,02 А B >= 0,44/0,03 = 15 B(fact) = 160 (определим из графика B=f(Iк))
160>15>B(fact) > B - верно
4): Расчет сопротивлений:
R1 задает номинальный ток стабилизатора: R1 = (Uвх - Uст)/Iст(мин) = (8,6 - 3,3)/0,03 = 177 Ом
Выбираем R1 из ряда E24: R1 = 180 Ом +/- 5 % Проверим R1 по мощности: P1(max) = (Uвх - Uст)*Iст(мин) = (8,6 - 3,3)*0,03 = 0,159 Вт
Тогда выберем резистор: (1) Model: MPT Pmax = 0,25 W
Определим сопротивления резисторов R2 и R3 в делителе напряжения: Iдн = Uвых/(R2+R3) Uвых = Uст/Kдн = Uст*(R2+R3)/R3 где Kдн = Kос = R3/(R2+R3)
Тогда: Iдн = 5 - 10 mA, примем Iдн = 0,007 A
R2+R3 = Uвых/Iдн = 4,6/0,007 = 657,142857142857 (R2+R3)/R3 = Uвых/Uст = 4,6/3,3 = 1,39393939393939
Отсюда R3 = 471,428571428571 Ом и R2 = 185,714285714286 Ом
Выбираем R2 из ряда E24: R2 = 200 Ом +/- 5 %
Выбираем R3 из ряда E24: R3 = 510 Ом +/- 5 %
Проверим R2 по мощности: P2(max) = U2*Iдн(max) = Uвых*R2/(R2+R3)*Iдн(max) =(4,6*200)/(200 + 510)*0,01 = 0,0129577464788732 Вт
Тогда выберем резистор: (1) Model: MPT Pmax = 0,25 W
Проверим R3 по мощности: P3(max) = U3*Iдн(max) = Uвых*R3/(R2+R3) =(4,6*510)/(200 + 510)*0,01 = 0,0330422535211268 Вт
Тогда выберем резистор: (1) Model: MPT Pmax = 0,25 W
5): Определим падение выходного напряжения при подключении нагрузки: Выходное сопротивление r(вых) = Rвых(OУ)/B(fact) = 200/160 = 1,25 Ом
Коэффициент делителя напряжения Kдн = R3/(R2+R3) = 510/(200 + 510) = 0,71830985915493 Коэффициент усиления OУ Ku = 800 Коэффициент Kт = 0,9
Падение выходного напряжения при подключении нагрузки delta Uвых = In*r(вых)/(1 + Kдн * Ku * Kт) = 0,44 * 1,25/(1 + 0,71830985915493 * 800 * 0,9) = 0,00106140088608627 В

```

Рис. 5. Результаты расчета

Данная программа позволяет проводить автоматический расчет и выбор элементов компенсационного стабилизатора напряжения на основе базы данных, содержащей информацию о параметрах этих элементов. Программа может быть использована при проектировании и изготовлении компенсационных стабилизаторов напряжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы / Д. П. Ким. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

2. Кулагин, Р. Н. Технические средства автоматизации : учеб. пособие / Р. Н. Кулагин, Н.В. Казаков, Е. В. Стегачев ; ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – 103 с.

3. Булычев, А. Л. Аналоговые интегральные схемы : справочник / А. Л. Булычев, В. И. Галкин, В. А. Прохоренко. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Минск : Издательство «Беларусь», 1993.

4. Горюнов, Н. Н. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы : справочник / А. В. Баюков, А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 744 с.

5. Горюнов, Н. Н. Полупроводниковые приборы: транзисторы : справочник / А. В. Баюков, А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 904 с.

УДК 004.383.3

М. Д. Хорошевский, А. М. Макаров, Н. С. Гришанкова, Т. В. Андронов

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В работе приведена структурная и принципиальная схема разработанного лабораторного стенда для изучения микропроцессорной системы управления параллельной работой шаговых двигателей. Описан принцип работы лабораторного стенда. Приведен простейший пример программы управления шаговыми двигателями.

Ключевые слова: микроконтроллер, шаговый двигатель, система управления, принципиальная схема, программа управления.

M. D. Horoshevskiy, A. M. Makarov, N. S. Grishankova, T. V. Andronov

LABORATORY STAND FOR THE STUDY OF THE MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR PARALLEL OPERATION OF STEPPING MOTORS

Volgograd State Technical University

The structural and principle diagram of the developed laboratory stand for the study of the microprocessor control system for parallel operation of stepping motors were provided. The principle of operation of the laboratory stand was described. A Simple example of the program for control stepper motors was given.

Keywords: microcontroller, stepper motor, control system, principle diagram, control program.

Введение

При изучении дисциплин технического профиля важную роль играет не только освоение каких-либо принципов, лежащих в основе автоматизированных систем контроля и управления, но и возможность применения данных принципов на практике. В последнее время современные технические системы чаще ориентируются на использовании программируемых контроллеров, что обусловлено их быстрым развитием. Актуальным в этой области является вопрос управления шаговыми двигателями, которые широко применяются в современной науке и технике.

Разработка лабораторного стенда

Для возможности практического применения знаний о параллельном управлении несколькими шаговыми двигателями, авторами на основе проведенного моделирования [1] был разработан и реализован лабораторный стенд для изучения системы управления параллельной работой шаговых двигателей на базе микроконтроллера семейства *Atmel*. Структурная схема (рис. 1) стенда, включает в себя следующие элементы:

1. БП – блок питания;
2. МК – микроконтроллер, управляющий всей периферией устройства;
3. ДШД (1-3) – драйвер шагового двигателя;
4. ШД (1-3) – шаговый двигатель;
5. БРН (1-3) – блок регулировки направления вращения шагового двигателя;
6. БС (1-3) – блок регулировки скорости вращения;

Основным узлом разработанного лабораторного стенда является микроконтроллер, который обрабатывает данные, и, в зависимости от программы, отправляет управляющие сигналы на драйвер шагового двигателя. В системе реализовано также ручное управление, состоящее из блоков БРН 1-3 и БС 1-3, с помощью которых можно управлять направлением и скоростью вращения двигателя [1].

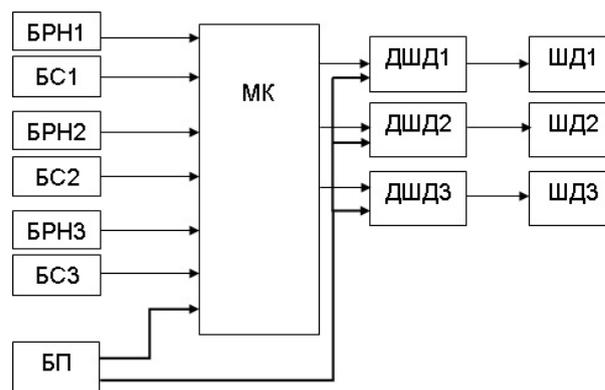


Рис. 1. Структурная схема лабораторного стенда

На основе выбранной элементной базы была разработана принципиальная схема стенда (рис. 2). В состав схемы входят восемь ключей (*SW1..7, SA1*), десять токоограничивающих резисторов (*R1..10*), три переменных резистора (*R11..13*), десять светодиодов (*VD1..10*), три драйвера (*ULN2003A*) и отладочная плата. Система управления реализована микроконтроллером, управляющим всеми исполнительными элементами по заданной программе. Для питания системы управления используется блок питания постоянного тока, позволяющий получить на выходе 5 и 12 В [4].

Входы каждого драйвера шагового двигателя соединены с цифровыми выходами 2..13 отладочной платы, а выходы – с фазами соответствующих шаговых двигателей.

Схема работает следующим образом. При включенном напряжении питания замыкание ключа *SW1* подает питание на весь стенд, что подтверждается включением светодиода *VD1*. Замыкание ключа *SW2* подает питание на первый шаговый двигатель что подтверждается включением светодиода *VD2*. Аналогичным образом, замыканием ключей *SW3* и *SW4*, подается питание на второй и третий шаговые двигатели соответственно.

Изменение направления вращения ротора, например, для первого шагового двигателя, происходит переключением ключа *SW5*. При пере-

ключении ключа в положение 7 (8) сигнал подается через соответствующий цифровой вход отладочной платы и затем происходит изменение направления вращения, о чем свидетельствует

включенный светодиод VD5 (VD6). Аналогичным образом изменение направления вращения ротора производится для второго и третьего двигателя (ключами SW6 и SW7 соответственно).

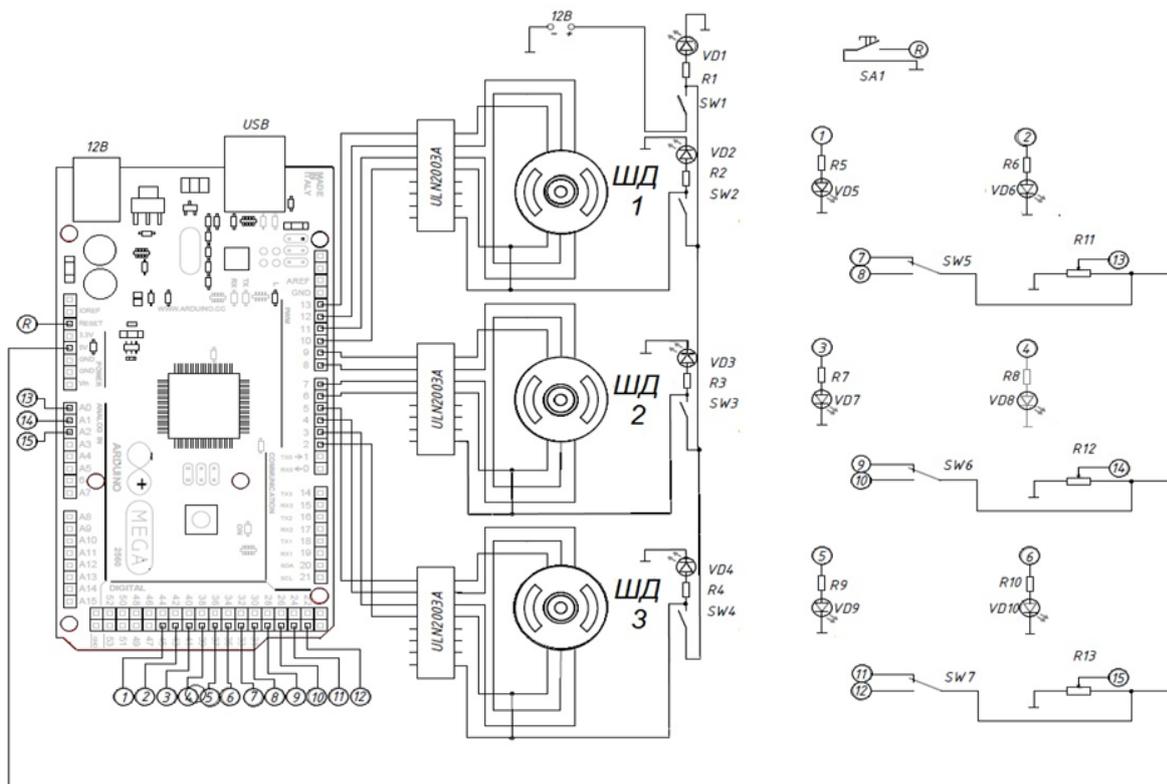


Рис. 2. Принципиальная схема разработанного стенда

Варьирование скорости вращения роторов происходит за счет изменения сопротивления переменного резистора соответствующего двигателя. То есть отладочная плата в заданной кодировке переводит значение измененного напряжения на аналоговом входе в нужную скорость вращения.

Замыканием ключа SA1 можно произвести перезагрузку отладочной платы.

Лабораторный стенд (рис. 3) для изучения параллельной работы шаговых двигателей с микро-

процессорным управлением, содержит три униполярных шаговых электродвигателя; отладочную плату *ArduinoDue*, являющуюся достаточно мощной платой компании *Arduino* и основанной на 32-битном *ARM*-процессоре AT91SAM3X8E от компании *Atmel*; силовую плату на основе микросхем *ULN2003A* (для питания двигателя); блок питания; набор тумблеров для включения и выключения стенда, двигателей, изменения направления их вращения; переменные резисторы для варьирования скорости вращения двигателей [2, 5].



Рис. 3. Лабораторный стенд

Программная реализация системы управления

Основной задачей системы управления является управление параллельной работой трех шаговых двигателей. Как было сказано выше, система управления основана на отладочной плате *ArduinoDue*, которая имеет 54 цифровых и 16 аналоговых входов/выходов, что достаточно для подключения имеющихся шаговых двигателей, набора тумблеров и переменных резисторов [3].

Для изучения системы управления студенту предлагается написать программу в специальной среде разработки для данной отладочной платы, которая имеет Си-подобный язык программирования *Processing/Wiring*. После удачной компиляции студенту необходимо произвести загрузку программы управления на отладочную плату, затем запустить стенд и убедиться в правильности выполнения загруженной программы. Пример листинга загруженной программы приведен на рис. 4.

```

MAIN | Arduino 1.6.13
-----
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь
-----
MAIN
-----
#include <AccelStepper.h> // Библиотека для работы с несколькими шаговыми двигателями
#include <AFMotor.h>
// Два шаговых двигателя по одному на каждом порту
AF_Stepper motor1(200, 1);
AF_Stepper motor2(200, 2);
// Вы можете изменить их на DOUBLE или INTERLEAVE или MICROSTEP
// Запись для первого двигателя
void forwardstep1() {
  motor1.onestep(FORWARD, SINGLE);
}
void backwardstep1() {
  motor1.onestep(BACKWARD, SINGLE);
}
// Запись для второго двигателя
void forwardstep2() {
  motor2.onestep(FORWARD, SINGLE);
}
void backwardstep2() {
  motor2.onestep(BACKWARD, SINGLE);
}
// Motor shield имеет два порта двигателя, теперь мы будем списывать их в
// объекте AccelStepper
AccelStepper stepper1(forwardstep1, backwardstep1);
AccelStepper stepper2(forwardstep2, backwardstep2);

void setup()
{
  stepper1.setMaxSpeed(200.0);
  stepper1.setAcceleration(100.0);
  stepper1.moveTo(24);

  stepper2.setMaxSpeed(300.0);
  stepper2.setAcceleration(100.0);
  stepper2.moveTo(1000000);
}

void loop()
{
  // Изменение направления в пределах
  if (stepper1.distanceToGo() == 0)
    stepper1.moveTo(-stepper1.currentPosition());
  stepper1.run();
  stepper2.run();
}
-----
44 Arduino/Genuino Uno на COM1

```

Рис. 4. Пример листинга управляющей программы

В приведенном примере происходит управление шаговыми двигателями с помощью специальной библиотеки шаговых двигателей – *AccelStepper.h*, позволяющей производить управление несколькими шаговыми двигателями одновременно. Для решения задачи параллельного управления задается перемещение каждого двигателя на определенную для каждого

двигателя координату. Скорости вращения ротора заданы одинаковыми.

Данный пример программы является простейшим из возможных вариантов реализации системы управления параллельной работой шаговых двигателей на разработанном лабораторном стенде.

Заключение

Разработана принципиальная схема лабораторного стенда, подобраны необходимые комплектующие, на основе которых был собран лабораторный стенд. Тестирование возможностей всей системы управления шаговыми двигателями произведено путем запуска тестовых программ после сборки стенда.

Разработанный стенд позволяет изучить основы микропроцессорного управления параллельной работой шаговых двигателей. Данная установка внедрена в учебный процесс кафедры «Автоматизация производственных процессов» Волгоградского государственного технического университета и используется при проведении лабораторных работ по дисциплине «Автоматизированный электропривод» при подготовке бакалавров по направлениям 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и 27.03.04 «Управление в технических системах».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хорошевский, М. Д.* Имитационное моделирование микропроцессорной системы управления параллельной работой шаговых двигателей / М. Д. Хорошевский, Н. В. Полежаев, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 110–113.
2. *Хорошевский, М. Д.* Лабораторный стенд для исследования системы управления совместной работы шаговых двигателей / М. Д. Хорошевский, А. А. Швец, А. М. Макаров // Сборник тезисов докладов по внутривузovскому смотрu-конкурсу научных конструкторских и технологических работ студентов (г. Волгоград, 12–15 мая 2015 г.) / ВолгГТУ, Совет СНТО. – Волгоград, 2015. – С. 36–37.
3. *Хорошевский, М. Д.* Микропроцессорная система управления параллельной работой шаговых двигателей / М. Д. Хорошевский, А. М. Макаров, Н. В. Полежаев // Актуальные проблемы информационных технологий, электроники и радиотехники – 2015 (ИТЭР – 2015) : сб. науч. ст. всерос. молодежной школы семинара / редкол.: Е. С. Огурцов (отв. ред.) [и др.] ; ЮФУ, РФФИ, АНПОО «Кроп. жел.-дор. техникум. – Таганрог, 2015. – С. 536–538.
4. *Хорошевский, М. Д.* Системы управления параллельной работой шаговых двигателей : монография / М. Д. Хорошевский, А. М. Макаров. – Saarbrücken (Germany) : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 79 с.
5. *Хорошевский, М. Д.* Установка для изучения системы управления параллельной работой шаговых двигателей / М. Д. Хорошевский, Н. В. Полежаев, А. М. Макаров // Реальность – сумма информационных технологий : сб. науч. ст. междунар. молодежн. науч.-практ. конф. (8–10 сент. 2016 г.) / редкол. : М. С. Разумов (отв. ред.) [и др.] ; Юго-Западный гос. ун-т [и др.]. – Курск, 2016. – С. 256–259.

УДК 681.536.6:631.554.4

Д. А. Шведкой, В. Г. Барабанов

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕПЛИЧНОМ ПОМЕЩЕНИИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В данной статье представлена разработка системы автоматического управления температурным режимом тепличного помещения. Проведен анализ объекта автоматизации и разработана структура автоматизированной системы управления. Разработан алгоритм автоматической работы теплицы.

Ключевые слова: тепличное помещение, микроклимат, датчик тепловых потерь, система автоматического управления (САУ), тепловой баланс.

D. A. Shvedkoy, V. G. Barabanov

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC TEMPERATURE SUPPORT SYSTEM IN THE TREATMENT ROOM

Volgograd State Technical University

This article presents the development of an automatic control system for the temperature regime of a greenhouse room. The analysis of the object of automation is carried out and the structure of the automated control system is developed. An algorithm for the automatic operation of the greenhouse is developed.

Keywords: hothouse room, microclimate, heat loss sensor, automatic control system (ACS), heat balance.

Тепличное производство это одно из наиболее энергоемких сельскохозяйственных производств. Затраты на обогрев теплиц составляют 30..50 % от себестоимости продукции. В современном производстве потребности в электрической и тепловой энергии растут быстрее, чем энергетические мощности. Из-за этого возникает нужда ограничивать потребление энергии энергосистемами и экономии энергии потребителем. Эти меры ограничения в большинстве случаев малоэффективны, а так же в ряде случаев приводят к снижению производства продукции. Поэтому экономить энергию надо системой специальных, научно обоснованных технических мероприятий. Наиболее важными являются создание энергосберегающих технологий и систем автоматического управления (САУ) [1].

Задача САУ сводится к стабилизации температуры для максимальной продуктивности теплицы и энергосбережения. При внедрении САУ температурным режимом возможно обеспечить экономию 15–18 % тепла. Особенно эффективны такие системы в периоды переменной облачности и в зонах частого или резкого изменения окружающей среды, когда ручное управление температурным режимом затруднено [2].

Поддержания температурного режима, в котором развивается растение, крайне важно

и оказывает огромное влияние на все процессы жизнедеятельности, а именно:

- фотосинтез;
- дыхание;
- испарение;
- корневое питание.

Для растений любое отклонение от благоприятного температурного режима негативно влияет на качество и величину урожая. Также надо учесть, что у растений существуют различные фазы жизненного цикла и для разных циклов требуется разная температура окружающей среды. Влага и углекислый газ необходимы растению для нормального роста и плодоношения, причем в определенных соотношениях в зависимости от температуры воздуха. Следует учитывать, что температурная среда в тепличном помещении должна определяться уровнем освещенности.

Отсюда следует, что на растение влияет одновременно несколько факторов окружающей среды. Учитывать это влияние и создавать наилучшее сочетание параметров микроклимата в теплице возможно только при автоматизации технологического процесса [3].

Представим объект управления (теплицу) в виде черного ящика (рис. 1), выходные величины которого указаны справа (температура, влажность, освещенность внутри теплицы) [4].

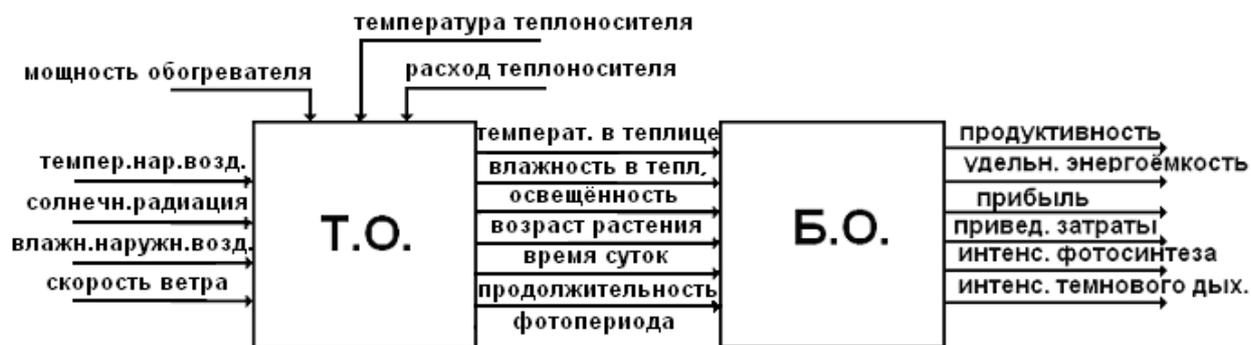


Рис. 1. Теплица как объект управления (биологический и технический)

На данном рисунке представлены биологический объект – состоящий из множества единичных живых организмов и технический объект – любое изделие (элемент, устройство, подсистема, функциональная единица или система), которое можно рассматривать в отдельности.

Управляемые величины на рис. 1 изображены сверху. К ним относятся параметры теплоносителя. Контролируемые факторы на рисунке изображены слева. К ним относятся: температура наружного воздуха, солнечная радиация,

влажность наружного воздуха, скорость ветра. Перечисленные выше контролируемые факторы можно отнести к возмущениям, вызывающим отклонение от оптимальных режимов. Справа от биологического объекта показаны параметры которые зависят от входящих величин. Это такие параметры как: производительность, прибыль, приведенные затраты, энергоёмкость.

Разработанная система автоматического управления поддержания температурного режима тепличного помещения представлена на рис. 2.

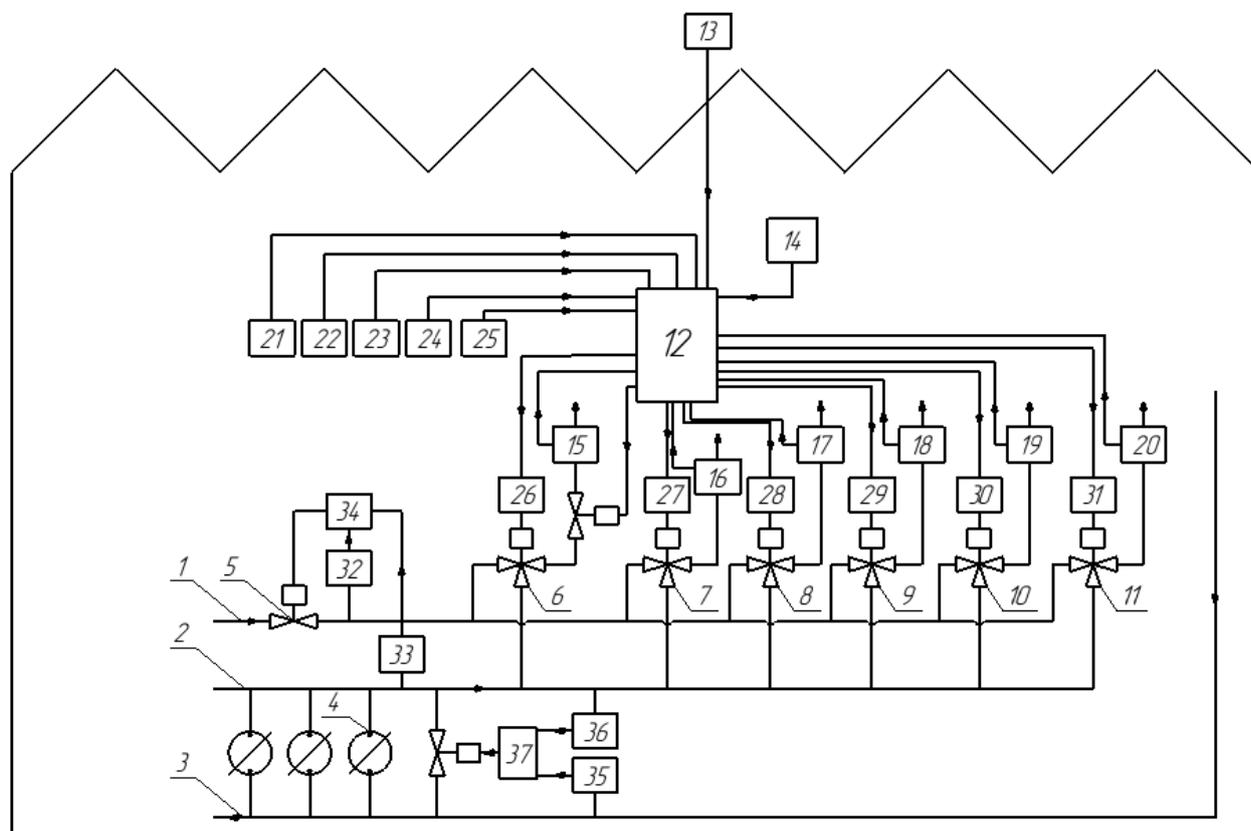


Рис. 2. Система управления микроклиматом тепличного помещения

Данная система позволяет регулировать температуру воздуха в теплице. Она содержит подающие и отводящий трубопроводы (1, 2, 3), трехходовые смесительные клапаны (6..11), вычислительный блок (12) и блоки управления (26..31), датчик требуемой температуры (14), датчики температуры наружного (13) и внутреннего воздуха и теплоносителя (21..25) [5]. Технической задачей является повышение равномерности температуры по всей площади теплицы в объеме ценоза. Эта задача решается тем, что теплица разделена на зоны обогрева, содержащие системы отопления, снабженные датчиками температуры воздуха и теплоносителя. Вычислительный блок подключен к входу каждого блока управления, поддерживающего температуру теплоносителя в системе отопления зон обогрева. Перед смесительными клапанами установлены блоки регулирования перепада давлений между двумя подающими и вторым подающим и отводящими трубопроводами и имеющие собственные блоки управления и датчики давления в подающих трубопроводах и включающие перепускные насосы, они также включают два проходных регулирующих клапана с собственными блоками управления, входы которых связаны с выходами датчиков давления в подающих и отводящих трубопроводах.

Это позволяет осуществить раздельное управление системами отопления по зонам теплицы в зависимости от текущих параметров внешней среды.

Таким образом, САУ обеспечивает автоматическое поддержание необходимой температуры, микроклимата и защиту от перепадов давления. Выгода от внедрения автоматизированной системы заключается в уменьшении трудоемкости ухода за растениями и освобождении обслуживающего персонала. Также к положительному экономическому эффекту можно отнести увеличение объема продукции, производительности и рентабельности при эксплуатации теплицы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будзко, И. А. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов / И. А. Будзко. – М. : Агропромиздат, 2012.
2. Изаков, Ф. Я. Энергосберегающие системы автоматического управления микроклиматом / Ф. Я. Изаков, С. А. Попова. – ЧГАУ, 2008.
3. Беликов, Ю. М. Автоматизация управления микроклиматом в тепличных комбинатах / Ю. М. Беликов. – 2007.
4. Федченко, С. С. Теплицы садово-огородные / С. С. Федченко, Б. А. Попов. – М. : Росагропромиздат, 2007.
5. Бабилов, М. А. Элементы и устройства автоматики / М. А. Бабилов, А. В. Коссинский. – М. : 2005.

Редактор
Н. Н. Кваша

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2017 г. Поз. № 5ж. Подписано в печать 11.12.2017 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,30.
Тираж 70 экз. Свободная цена. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научном журнале «Известия Волгоградского государственного технического университета», серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований и представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области прогрессивных технологий в машиностроении.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной–двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.