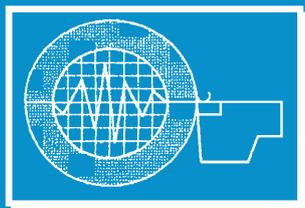


ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия

Прогрессивные технологии
в машиностроении

16+

№ 2 (212)
2018

ISSN 1990-5297



9 771990 529000 >

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, доц. 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, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ 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., чл.-корр. 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 (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, 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)
Поляничков 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
Щербачков М. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ

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

Поляничков 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.

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.
(МГУПБ, г. Москва)

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

Плотников А. Л., д.т.н., проф.

Фролов Е. М., 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

№ 2 (212)

Февраль

2018

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*

© Волгоградский государственный технический университет,

«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2018

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., Corresponding Member of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Le Kvet Tan, PhD, Kanto University (Kanto, Vietnam)

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)

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

Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), 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)

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

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.
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.
Frolov E.M. (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

№ 2 (212)

February

2018

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

- Авдеев А. Р. 58, 78
Авдеев О. В. 10
Алексейчук В. И. 24
Алехин А. Г. 56, 92
Аллабердиев А. Б. 72
Антонюк А. А. 56, 92
Банников А. И. 24
Бобровский А. В. 10
Бурлаков С. В. 40
Вайнер Л. Г. 7
Ветлицын Н. Ю. 37
Воробьева А. Н. 69
Горбунова Т. А. 37
Грязнов И. Е. 63, 80, 83
Губицкая Е. В. 85
Гущин И. А. 58, 60
Драчев О. И. 10
Дроботов А. В. 58, 60, 78
Дронин В. В. 60
Егоров Н. И. 13, 37
Еплов П. Н. 33
Земцов А. Ф. 63
Иванюк А. К. 88
Капитанов А. В. 67
Карлов В. И. 15, 20
Козловцева Н. В. 67
Коновалова Ю. Г. 44
Корзун Э. А. 53
Крайнев Д. В. 13
Крутикова А. А. 26
Крылов Е. Г. 67, 74
Крыхтин Ю. И. 15, 20
Кухтик М. П. 69, 72
Ладыгина О. М. 30
Лапиков М. А. 74
Липатов А. А. 47
Мазина Л. В. 85
Макаров А. М. 67, 74
Макарова О. А. 24
Мартынович И. В. 78
Митрофанов А. П. 26
Михайлов А. А. 94
Муравьев А. А. 26
Мушкин О. В. 74
Носенко В. А. 30
Ольштынский С. Н. 44
Омаров А. В. 80, 83
Павлов А. С. 33
Панченко М. В. 88
Паршева К. А. 26
Плотников А. Л. 33
Полянчиков Ю. Н. 13, 37
Полянчикова М. Ю. 13, 37
Поступаева С. Г. 63, 94
Пузырькова В. Е. 30
Репников А. И. 80, 83
Руденко А. С. 44
Русакова Г. Г. 85
Русакова М. М. 85
Рябчук В. А. 88
Санинский В. А. 40, 50
Сергеев А. С. 33
Сердобинцев Ю. П. 88
Сидякин Ю. И. 44
Смирнова Е. Н. 40
Солодков В. А. 13
Сторчак Н. А. 50
Тихонова Ж. С. 33, 53
Тупиков М. М. 44
Фам Х. Ч. 47
Федянов Е. А. 50
Фетисов А. В. 30
Фролов Е. М. 53
Харькин О. С. 94
Хатюхин С. В. 56, 92
Худяков К. В. 40
Чигиринский Ю. Л. 47
Шаталин Д. Ю. 72
Швец А. А. 58
Яковлев А. А. 94

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Вайнер Л. Г.</i> Технологическое управление абразивной обработкой на основе моделирования процессов формообразования.....	7
<i>Драчев О. И., Бобровский А. В., Авдеев О. В.</i> Система автоматического управления процессом электрохимической обработки штампов.....	10
<i>Егоров Н. И., Полянчиков Ю. Н., Солодков В. А., Крайнев Д. В., Полянчикова М. Ю.</i> Повышение качества и производительности обработки отверстий путем модернизации хонинговальной головки.....	13
<i>Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.</i> Математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия диска трения ГМТ и исследование влияния параметров напыления на прочность его сцепления с основой.....	15
<i>Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.</i> Математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ и проверка ее испытанием синхронизаторов на изделиях.....	20
<i>Макарова О. А., Алексейчук В. И., Банников А. И.</i> Исследование процесса обработки труб большого диаметра.....	24
<i>Митрофанов А. П., Крутикова А. А., Паршева К. А., Муравьев А. А.</i> Исследование поверхностного слоя титанового сплава после шлифования импрегнированным абразивным инструментом.....	26
<i>Носенко В. А., Фетисов А. В., Ладыгина О. М., Пузырькова В. Е.</i> Влияние скорости микроцарапания на морфологию площадки износа карбида кремния и перенос металла.....	30
<i>Плотников А. Л., Сергеев А. С., Тихонова Ж. С., Еплов П. Н., Павлов А. С.</i> Об условиях выбора режима пробного прохода как метода тестирования свойств сменных контактных пар.....	33
<i>Полянчикова М. Ю., Полянчиков Ю. Н., Егоров Н. И., Ветлицын Н. Ю., Горбунова Т. А.</i> Формирование упругих характеристик однокомпонентного абразивного инструмента в результате его спекания.....	37
<i>Санинский В. А., Худяков К. В., Смирнова Е. Н., Бурлаков С. В.</i> Способ повышения точности сборки подшипников качения взаимной компенсацией погрешностей комплектующих деталей.....	40
<i>Сидякин Ю. И., Коновалова Ю. Г., Ольштынский С. Н., Руденко А. С., Тупиков М. М.</i> Динамика многократного контактного соударения тел в процессах упрочняющей обработки деталей чеканкой.....	44
<i>Фам Х. Ч., Чигиринский Ю. Л., Липатов А. А.</i> Неустойчивость стружкообразования при резании высоколегированных сталей твердосплавным инструментом.....	47
<i>Федянов Е. А., Санинский В. А., Сторчак Н. А.</i> Совершенствование технологии гидроабразивной обработки трубных заготовок.....	50
<i>Фролов Е. М., Корзун Э. А., Тихонова Ж. С.</i> Адаптация метода управления режимами резания к промышленным условиям.....	53

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Антонюк А. А., Хатюхин С. В., Алехин А. Г.</i> Разработка и расчет осушителя воздуха коптильни.....	56
<i>Гуцин И. А., Авдеев А. Р., Швец А. А., Дроботов А. В.</i> Влияние химической обработки 3D печатных изделий на их прочность.....	58
<i>Дронин В. В., Дроботов А. В., Гуцин И. А.</i> Система автоматизации составления фондов оценочных средств.....	60
<i>Земцов А. Ф., Грязнов И. Е., Поступаева С. Г.</i> Сравнительный анализ и исследование работы классического ПИД-регулятора с «нечеткими» его разновидностями.....	63
<i>Капитанов А. В., Крылов Е. Г., Макаров А. М., Козловцева Н. В.</i> Повышение точности обработки тел вращения на станках с ЧПУ.....	67
<i>Кухтик М. П., Воробьева А. Н.</i> Управление работой методической печи на основе нечеткой логики.....	69
<i>Кухтик М. П., Шаталин Д. Ю., Аллабердиев А. Б.</i> Автоматизированная система управления работой эндотермического генератора.....	72
<i>Латииков М. А., Мушкин О. В., Макаров А. М., Крылов Е. Г.</i> Управление автоматизированной расфасовкой сыпучих материалов в гибкие контейнеры.....	74
<i>Мартинович И. В., Авдеев А. Р., Дроботов А. В.</i> Моделирование работы магнитогидродинамического насоса с дозированной подачей.....	78
<i>Омаров А. В., Репников А. И., Грязнов И. Е.</i> Решение задач прогнозирования с помощью нечетких нейронных сетей в пакете «MATLAB».....	80
<i>Репников А. И., Омаров А. В., Грязнов И. Е.</i> Управление освещением на основе беспроводной сети ZigBee.....	83
<i>Русакова Г. Г., Русакова М. М., Мазина Л. В., Губицкая Е. В.</i> Результаты эксплуатации гребковой сушилки для сушки безэфирного горчичного жмыха.....	85
<i>Сердобинцев Ю. П., Иванюк А. К., Рябчук В. А., Панченко М. В.</i> Алгоритм определения напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов, испытывающих внешнее давление.....	88
<i>Хатюхин С. В., Антонюк А. А., Алехин А. Г.</i> Разработка и расчет установки электрохимического полирования цилиндрических алюминиевых изделий.....	92
<i>Яковлев А. А., Харькин О. С., Поступаева С. Г., Михайлов А. А.</i> Алгоритм для разработки новых конструкций технологических лазеров с газообразной активной средой.....	94

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.923.1

Л. Г. Вайнер

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Тихоокеанский государственный университет

E-mail: lgvainer@mail.ru

В работе рассмотрены методологические аспекты технологического управления поточной абразивной обработкой на основе имитационных моделей формообразования. Поточную абразивную обработку предложено рассматривать как континуальный процесс формообразующих воздействий: абразивных кругов на обрабатываемые детали и потока заготовок на круги. Математическая модель качества взаимного формообразования позволяет определить область эффективных управляющих технологических параметров.

Ключевые слова: технологическое управление, взаимное формообразование, моделирование, доминирующие факторы, погрешности обработки, технологические параметры.

L. G. Vainer

TECHNOLOGICAL CONTROL OF ABRASIVE PROCESSING BASED ON MODELING OF FORM-SHAPING PROCESSES

Pacific National University

In the study methodological aspects of technological management by a flow abrasive processing are considered on the basis of imitation models of form-shaping. The flow abrasive treatment is proposed to be considered as a continuous process of shaping effects: abrasive wheels on the workpieces and the flow of workpieces to the wheels. The mathematical model of the quality of mutual shaping allows us to determine the area of effective control technological parameters.

Keywords: technological control, end surfaces, mutual form-shaping, computer simulation, dominating factors, processing errors, technological parameters.

Эффективное технологическое управление процессом механической обработки основывается на методологической основе, включающей: отображение физических основ процесса; разработку концептуальных подходов к его рассмотрению; систему взаимосвязей и взаимовлияния факторов процесса; систему адекватных моделей составляющих процессов-детерминантов; алгоритмы управления на основе системы функциональных и критериальных ограничений. Процесс формообразования является основным целевым процессом в технологической металлообрабатывающей системе, отражающим начальное состояние технологической системы, воздействие на нее различных физико-механических факторов и определяющим выходные геометрические характеристики обработанных деталей.

Технологическое управление на основе имитационных моделей формообразования приобретает особую значимость при поточной абразивной обработке в условиях крупносерийного производства (бесцентровое шлифование, двустороннее торцешлифование и др.), т. к. позволяет избежать больших затрат на наладку оборудования методом проб и ошибок (расход заготовок и абразивного материала), негативных последствий влияния субъективного фактора в виде имеющейся квалификации конкретного наладчика и открывает возможность создания интегрированной информационной среды, использующей результаты моделирования в качестве входных параметров системы управления оборудованием в рамках системы глобальной оптимизации изделий и процессов PLM (Product Lifecircle Management).

В настоящей работе рассмотрены методологические вопросы создания имитационных моделей формообразования и их применения для эффективного управления процессом поточной абразивной обработки.

Базовые концептуальные положения, принятые при создании моделей обеспечения качества формообразования при поточной абразивной обработке: процесс технологического взаимодействия инструментов и потока заготовок принимается континуальным (непрерывным); процесс формообразования рассматривается с учетом взаимовлияния трансформаций поверхностей заготовок и инструментов; формообразование рассматривается как динамический процесс (во времени) с учетом фазовых

параметров цикла съема припуска и цикла шлифования партии заготовок; обрабатываемая поверхность представляет собой геометрическое место мгновенных поверхностей шлифования с учетом их интерференции; рассматривается реальное формообразование с учетом действия системных факторов различной физической природы (упругие, тепловые смещения и др.), обуславливающих фактически геометрию и относительные движения заготовок и инструментов.

На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема обеспечения качества взаимного формообразования установлением требуемых значений управляющих технологических параметров.



Рис. 1. Определение требуемых значений управляющих технологических параметров

Основные этапы и модули построения многовариантной модели прямого формообразования – формообразования обрабатываемых поверхностей [1] (на примере двустороннего тор-

цешлифования): 1) идентификация вариантов реализации данного вида обработки, установление схемных и факторных идентификаторов формообразования; 2) генерация обобщенных

базовых функций положения и инструмента; 3) генерация расчетного варианта функции формообразования [2]; 4) определение текущих активных формообразующих точек поверхности инструмента; 5) определение значений геометрических и кинематических параметров и их функциональных связей через фазовый параметр q_i ; 6) анализ условия съема припуска в данной точке обрабатываемой поверхности; 7) определение вектора координат точек обрабатываемых поверхностей 8) оценка текущих и выходных погрешностей обрабатываемых поверхностей.

В работах [3] изложены методологические вопросы построения модели, результаты моделирования и экспериментальных исследований обратного формообразования – трансформации поверхности шлифовального круга.

Математическая модель взаимного формообразования в общем параметрическом виде

$$\begin{aligned} r_0 &= r_0(q_1, q_2, \dots, q_{k+2}), \\ r_i &= r_i(q_{k+2}, q_{k+1}, \dots, q_1), \end{aligned} \quad (1)$$

здесь r_0 и r_i – функции прямого и обратного формообразования; q_1, \dots, q_{k+2} – параметры цепи формообразования (цепь общая, различается направлением).

В общем случае параметры цепи формообразования – аргументы матриц преобразования [2] зависят от технологических параметров. Исключив из совокупности параметров условно-постоянные, получим вектор управляющих технологических параметров $X(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)$ при $i=1, \dots, m$ и выражение для аргументов цепи формообразования

$$q_k = q_k(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (2)$$

Отдельное критериальное условие обеспечения качества формообразования можно представить в виде

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq C_j, \quad (3)$$

где C_j – критериальная характеристика или ограничение, $j = 1, \dots, n$.

Объединяя (1), (2) и (3) получим математическую модель качества взаимного формообразования в общем параметрическом виде

$$\begin{cases} r_0 = r_0(x_1, x_2, \dots, x_m), & r_i = r_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq C_1, & f_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq C_2, \dots \\ f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq C_j, & \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq C_n \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) в пространстве управляющих параметров определяет области существования допустимых значений параметра x_i при различных основных критериях $b, c, d - \{x_{ib}\}, \{x_{ic}\}, \{x_{id}\}$ (рис. 2).

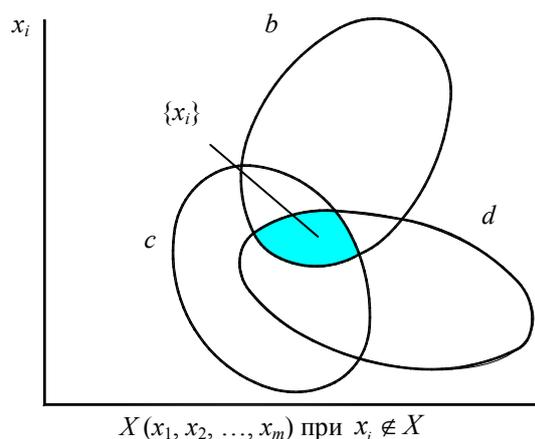


Рис. 2. Область эффективных значений $\{x_i\}$ в параметрическом пространстве

Область эффективных значений параметра $\{x_i\}$ определяется как пересечение множеств

$$\{x_i\} \in \{x_{ib}\} \cap \{x_{ic}\} \cap \{x_{id}\}. \quad (5)$$

В общем случае $\{x_i\}$ определяется во всем диапазоне изменения вектора управляющих технологических параметров X , определяющего полный спектр состояний технологической системы.

На рис. 3 дано графическое отображение определения эффективных параметров настройки угловых смещений шлифовальных кругов в вертикальной α и горизонтальной γ плоскостях при торцешлифовальной обработке цилиндрических роликов подшипников качения с применением актуальных критериальных и функциональных ограничений.

Ограничения 1 и 2 обусловлены реализацией требуемой характеристики вращения ролика [4]; семейство прямых 3 отражают минимально допустимый уровень значений α / γ , от которого, как следует из модели формирования технологического пространства [5], зависит координата окончания съема припуска; семейство прямых 4 отражают ограничения на верхний уровень значений α / γ , от которого, как следует из модели трансформации технологического пространства [3], зависит стабильность формы рабочих поверхностей шлифовальных кругов; ограничения 5 направлены на обеспечение точности формы торца; ограничения 6 обеспечивают работу ШК всей рабочей поверхностью. В результате определяется область 7 эффективных значений параметров настройки углового положения ШК $\{\alpha, \gamma\}$.

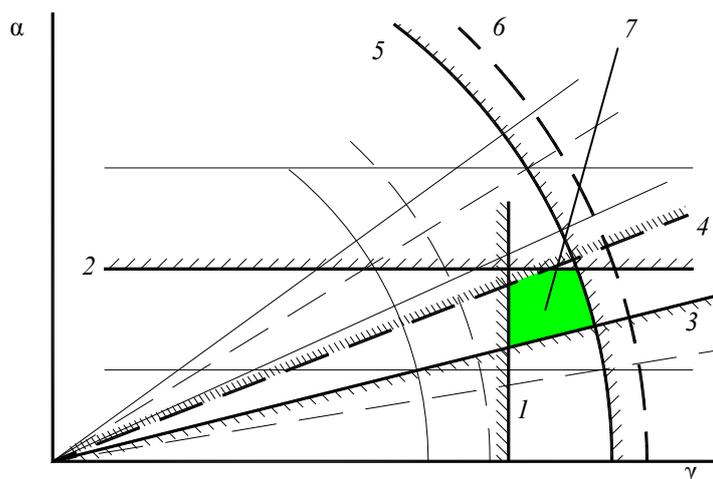


Рис. 3. Графическое отображение синтеза параметров настройки

Эффективность предложенного алгоритма определения технологических управляющих параметров с применением виртуальной имитации процесса взаимного формообразования была подтверждена результатами шлифования в производственных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнер, Л. Г. Методология построения модели реального формообразования в процессе съема припуска на примере шлифования торцевых поверхностей / Л. Г. Вайнер // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 2–6 (292). – С. 21–27.
2. Решетов, Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
3. Vainer L. G., Nosenko V. A. The Regularities of Grinding Wheels Wear at In-Line Machining of Bearing Rings Ends // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems - MEACS 2015, December 1-4, 2015; Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 2015*. - 04-17-MERMT.
4. Вайнер, Л. Г. Характер вращения роликов и точность обработки при двустороннем торцешлифовании / Л. Г. Вайнер // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2010. – № 4(19). – С. 111–120.
5. L. G. Vainer. Determining the parameters of the technological space in bilateral end grinding / *Russian engineering research*. 2011, vol. 31, No. 12, pp. 1233-1238.

УДК 621.923 :- 621.9101

О. И. Драчев, А. В. Бобровский, О. В. Авдеев

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ШТАМПОВ

Тольяттинский государственный университет

E-mail: doi05@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной точности пространственно сложных поверхностей штампов. Представлена установка для электрохимической обработки рабочих поверхностей штампа, оснащенная автоматической системой стабилизации межэлектродного зазора.

Ключевые слова: штамп, электрохимическая обработка, электрод-инструмент, пространственно сложные поверхности, система автоматического управления.

О. I. Drachev, A. V. Bobrovskij, O. V. Avdeev

AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF DIES

Togliatti State University

In the article examined issue of increasing operational accuracy of spatially complex surfaces of dies are considered. An installation for electrochemical machining of the working surfaces of a die is provided, equipped with an automatic system for stabilizing the interelectrode gap.

Keywords: stamp (die), electrochemical machining, electrode - tool, spatially complex surfaces, automatic control system.

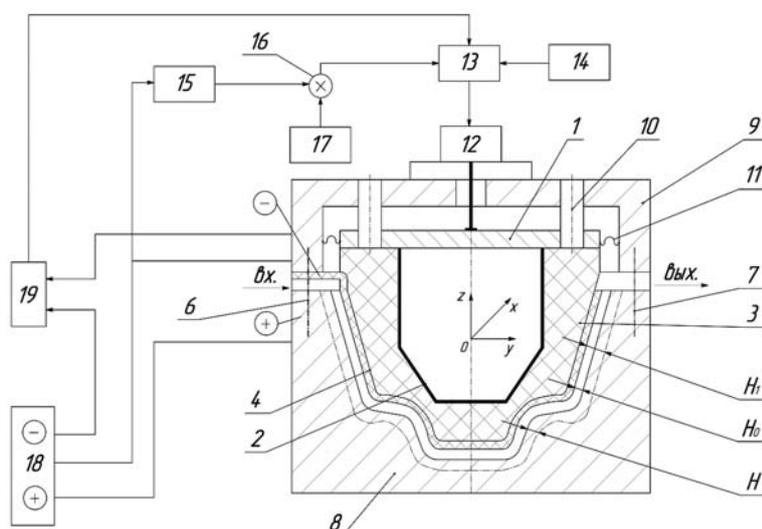
В современном машиностроении постоянно повышаются требования к точности и качеству поверхности изготавливаемых больших габаритных штампов. На долю механической обработки лезвийным и абразивным инструментом приходится до 80 % всего объема обрабатываемых деталей, получение высокой точности и качества поверхности требует значительных дополнительных затрат на проведение финишных отделочных операций. В таких случаях единственными методами могут быть электрохимические [1].

Преимущество последних, по сравнению с механическими, являются высокая размерная и геометрическая точность (до 2 мкм), высокое качество поверхности (Ra до 0,02 мкм), отсут-

ствие поверхностного дефектного слоя и остаточных напряжений на рабочих поверхностях штампов [3].

Повышение требований к точности и качеству штампов позволяет значительно увеличить силовые и температурные нагрузки при эксплуатации последних, повысить срок их службы и их конкурентоспособность.

Предлагаемая разработка установки для ЭХО обработки штампов с пространственно сложными поверхностями и оснащенная системой автоматического управления включает в себя инструмент-электрод, оснащенный линейным электроприводом, датчиками контроля контакта и межэлектродного зазора (МЭЗ) и тремя контурами управления.



Общий вид установки

Особенность разработки инструмента-электрода [2] состоит в том, что он включает в себя пластину 1 (см. рисунок) на которой симметрично относительно вертикальной оси крепится пустотелый короб, а на нем модель из отвердевшего неметаллического, стойкого к воздействию электролита, материала, на наружной объемной поверхности, которой смонтирована металлическая безычеистая сетка, подключенная к отрицательному полюсу источника питания.

Сама модель изготовлена по внутренней поверхности мастер-модели, которой является обрабатываемая заготовка корпуса штампа, с учетом величины зазора для прокачки электролита и диаметра проволоки сетки.

Установка функционирует следующим образом пластина 1 с моделью 3, на поверхности которой смонтирована сетка 4, устанавливается на торце заготовки 8. С помощью штифтов 6

и крепежных винтов 7 обеспечивают центровку корпуса 9 относительно заготовки 8.

При изготовлении модели 3 на заготовку 8, которая является мастер-моделью для модели 3 наносят тонким слоем силиконовую жидкость или техническое масло и устанавливают на торце заготовки 8 корпуса 9.

Далее объем между внутренней поверхностью заготовки 8 и пластины 1 с пустотелым кожухом 2 заполняют жидким неэлектропроводящим материалом, например эпоксидной смолой с отвердителем или другим полимерным материалом, стойким к действию электролита.

После затвердевания пластина 1, пустотелый кожух 2 и модель 3 представляют единый монолитный инструмент-электрод, трехкоординатная пространственно-сложная поверхность которого механически обрабатывается на фрезерном станке. Глубина снимаемого по-

верхностного слоя эквидистантна величине $H_2 = H_0 + H$, которая включает зазор H_0 для прокладки электролита, необходимый для процесса электрохимического полирования (0,2...2 мм), и глубине H_2 равной диаметру проволоки сетки (1,5...1 мм).

Проволока сетка может быть изготовлена из меди, коррозионно-стойкой стали и т. д. сетка изготавливается по выкройке с учетом объемной конфигурации обрабатываемой полости. На пластине 1 симметрично вертикальной оси короба 2 закреплены две скалки 10 по которым перемещается электрод-инструмент относительно корпуса 9 который крепится с помощью винтов 6 и заготовки штампа 8.

В зазор между пластиной 1 и корпусом 9 смонтирована одно гофрированное уплотнение 11. Система автоматического управления содержит линейный электропривод 12 жестко соединенный с инструментом-электродом, который управляется блоком управления 13. Величина (МЭЗ) задается задатчиком 14, а контролируется датчиком потери постоянного тока потребления 15, выход которого подключен к входу сравнивающего элемента 16, на вход которого подключен источник эталонного питания. Источник питания 18 соединен с катодом со знаком минус (металлическая сетка) и с анодом (заготовка 8) со знаком плюс. Первый вход датчика контактов 19 подключен к сетке 4, а второй к заготовке 8.

Устройство для электрохимической обработки работает следующим образом. К заготовке 8 подводят электрод-инструмент который жестко закреплен на роторе линейного электропривода 12 и перемещается от блока управления 13 до контакта с заготовкой, причем момент контакта контролируется датчиком контакта 15. Выход, которого подключен к выходу блока управления 13. В момент контакта инструмента-электрода с заготовкой 8 происходит замыкание электрической цепи, которое контролируется датчиком 19. Момент контакта является точкой отсчета при установлении заданного МЭЗ. Далее электрод инструмент отходит на заданный датчиком 14 зазор H_0 , с помощью линейного электропривода 12. Далее включают пролив электролита (на рисунке показан условно) с расчетной скоростью и источник постоянного тока 18 который своими выходами подключен к заготовке 8 (анод) со знаком плюс и инструмент-электрод со знаком минус к сетки и поддерживает заданный режим ЭХО по току и напряжению.

В цепи источника питания 18 включен датчик потери постоянного тока потребления 15, выход которого подключен на вход сравнительного элемента 16, на второй вход которого подключен выход источника эталонного питания постоянного тока 17.

Система автоматического управления начинает работать по принципу астатического регулирования, т. е. поддерживает МЭЗ постоянным и бесконтактно контролирует величину съема металла. При увеличении МЭЗ на величину H равную глубине съема металла, ток потребления падает.

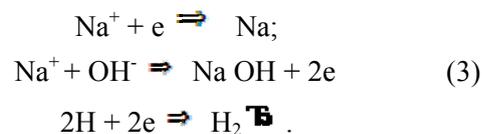
В качестве электролита используют водный раствор поваренной соли (NaCl), при растворении которой в воде образуются положительные ионы Na^+ и отрицательно заряженные ионы хлора Cl^- . При включении источника питания между инструментом-электродом и обрабатываемой деталью возникает постоянный ток, а в электролите происходит следующие химические реакции. Вода частично диссоциирует на ионы водорода и гидроксильной группы:



Анионы хлора движутся к детали, так как она является анодом, и соединяются с железом, образуя растворимый в воде хлорид железа:



Катионы натрия движутся к катоду, получают от него недостающие электроны и образуют металлический натрий. Натрий очень активный элемент, поэтому он сразу же реагирует с водой, образуя растворимый гидроксид натрия и газообразный водород:



Гидроксид натрия и хлорид железа в водном растворе реагируют друг с другом, образуя вновь растворимую поваренную соль и нерастворимый гидроксид железа. Нерастворимые соединения выпадают в осадок и далее в реакциях не участвуют [2]:



При небольшой силе тока (50...100 ампер) анодному растворению подвергаются в первую очередь выступы шероховатости на обрабатываемой поверхности. Вследствие этого выступы удаляются электрохимическим путем и шеро-

ховатость поверхности снижается. Так как зазор между инструментом-электродом и обрабатываемой поверхностью является равномерным то, и обработка происходит равномерно по всей поверхности. Для поддержания равномерного процесса электрохимического полирования и удаления осадков из рабочей зоны электролит прокачивают. Для предотвращения коррозии обрабатываемой детали в электролит добавляют вещества-ингибиторы коррозии, например нитрид натрия Na_2N . После полирования инструмент-электрод извлекают из заготовки 8 путем съема со штифтов 7 и промывается водой полированная поверхность заготовки.

Установка, для ЭХО оснащенная системой автоматического управления стабилизации МЭЗ и контролю величины перемещения инструмента-электрода позволяет повысить точность формы и качество обрабатываемой по-

верхности больше габаритных штампов сложной пространственной формы за счет введения контура обратной связи по бесконтактному контролю и управлению МЭЗ. Одновременно устранит концентраторы напряжения, которые остаются после механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мороз, И. И. Электрохимическая обработка металлов / И. И. Морозов, Г. А. Алексеев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 208 с., ил.
2. Патент № 2561556 РФ, МПК В23Н 3/04, С25F 7/00. Инструмент-электрод для электрохимического полирования пространственно-сложных поверхностей / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев ; заявитель Тольяттинский государственный университет. – № 2013142543/02 ; заявл. 17.09.2013 ; опубликован 10.04.2015, Бюл. № 4. – 4 с.
3. Мендельсон, В. С. Технология изготовления штампов и прессформ / В. С. Мендельсон, Л. И. Рудман. – М. : Машиностроение, 1982. – 208 с., ил.

УДК 621.923

Н. И. Егоров, Ю. Н. Полянчиков, В. А. Солодков, Д. В. Крайнев, М. Ю. Полянчикова

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ХОНИНГОВАЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

Волгоградский государственный технический университет,

E-mail: egorov_ni@mail.ru

Предложена новая конструкция хонинговальной головки для увеличения точности и качества поверхности отверстия с максимальной производительностью. Хонинговальная головка состоит из корпуса, колодок с абразивными брусками, возвратных пружин и разжимного штока с гидропластмассой. Разжимной шток с гидропластмассой обеспечивают при обработке радиальное и осевое перемещение колодок брусков за счет наклона торцевых поверхностей колодок под углом 2–6°.

Ключевые слова: точность, качество поверхности, производительность, отверстие, хонинговальная головка, гидропластмасса, колодки, абразивные бруски, разжимной шток, возвратные пружины.

N. I. Egorov, Yu. N. Polyanchikov, V. A. Solodkov, D. V. Krajnev, M. Yu. Polyanchikova

IMPROVING THE HOLES TREATMENT QUALITY AND PRODUCTIVITY BY UPGRADING THE HONING HEAD

Volgograd State Technical University

A new design of the honing head to increase the precision and surface quality of the hole with maximum efficiency. The honing head consists of a housing, a pad with abrasive bars, return springs, and unclamp the stock with hydroplastic. Unclamp the stock with hydroplastic provide in the processing of radial and axial displacement of the pads of the bars due to the inclination of the end surfaces of the pad at an angle 2–6°.

Keywords: accuracy, surface quality, performance, hole, honing head, hydroplastic, pads, abrasive pads, unclamp the stock, return springs.

Известно, что для финишной абразивной обработки отверстий, например гидроцилиндров, используются хонинговальные головки с закрепленными на них раздвижными абразивными брусками, которые совершают вращательное и возвратно-поступательное движения

на специализированных станках [1, 2]. Хонингование позволяет получить отверстие с отклонением от цилиндричности до 5 мкм и шероховатостью $Ra=0,63\pm 0,04$ [3, 4]. Известные конструкции хонинговальных головок имеют ограниченные возможности для обеспечения

высокой точности формы, шероховатости обработанной поверхности и производительности при финишной обработке отверстий. Поэтому перед исследованием стоит задача разработки конструкции хонинговальной головки с простым механизмом поджатия колодок с абразивными брусками, обеспечивающим радиальное и осевое их перемещение, распределенное приложение усилия к колодкам, с возможностью максимального увеличения их количества.

Предложена новая конструкция хонинговальной головки (рис. 1, 2).

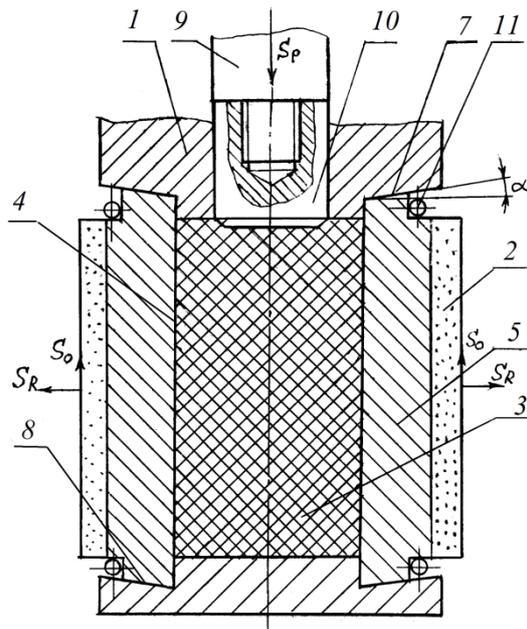


Рис. 1. Хонинговальная головка:

1 – корпус; 2 – абразивные бруски; 3 – гидропластмасса; 4 – основание несущей колодки; 5 – несущие колодки; 6 – радиальные прорези; 7, 8 – торцевые поверхности несущих колодок и соответствующие ответные поверхности прорезей корпуса; 9 – разжимной шток; 10 – плунжер; 11 – возвратные пружины; α – угол торцевых поверхностей несущих колодок; S_R – радиальное перемещение абразивных брусков; S_O – осевое перемещение абразивных брусков; S_P – осевое перемещение разжимного штока

Хонинговальная головка содержит корпус 1, механизм осевого и радиального перемещения абразивных брусков 2 выполненный в виде гидропластмассы 3, расположенной во внутренней полости корпуса 1 и контактирующей с основаниями 4 несущих колодок 5, установленных в радиальных прорезях 6 корпуса 1 с возможностью радиального (S_R) и осевого (S_O) перемещения торцевыми поверхностями 7, выполненными под углом 2–6 градусов к радиусу хонинговальной головки по ответным поверхностям 8 (направляющим поверхностям) корпуса 1. Разжимной шток 9, установленный в корпусе 1, снабжен плунжером 10, контактирующим с гидро-

пластмассой 3. Несущие колодки 5 с установленными на них абразивными брусками 2 зафиксированы возвратными пружинами 11.

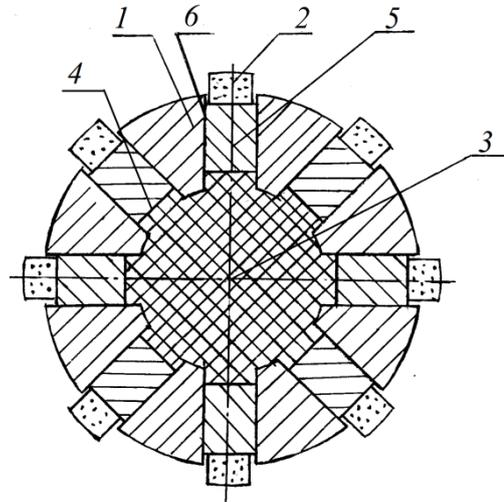


Рис. 2. Поперечный разрез хонинговальной головки: 1 – корпус; 2 – абразивные бруски; 3 – гидропластмасса; 4 – основание несущей колодки; 5 – несущие колодки; 6 – радиальные прорези

После ввода хонинговальной головки в обрабатываемое отверстие включается вращение и ее возвратно-поступательное движение, после чего вступает в действие механизм радиального и осевого перемещения, осуществляющий радиальное S_R и осевое S_O перемещение несущих колодок 5 с абразивными брусками 2. После каждого двойного хода хонинговальной головки разжимной шток 9 с присоединенным плунжером 10 воздействует на гидропластмассу 3, которая давит на колодки 5 с абразивными брусками 2 и они перемещаются в радиальном S_R и осевом S_O направлениях на определенную величину.

Возвратные пружины 11 предназначены для возвращения несущих колодок 5 в исходное положение после подъема разжимного штока 9.

Из условия незжимаемости гидропластмассы можно определить осевое перемещение S_P разжимного штока 9 с плунжером 10 для достижения радиальной подачи S_R по формуле:

$$S_P = \frac{4 \cdot n \cdot l \cdot b \cdot S_R}{\pi \cdot d_p^2},$$

где n – количество колодок 5 с абразивными брусками 2; l – длина колодок 5 с абразивными брусками 2; b – ширина колодок 5 с абразивными брусками 2; d_p – диаметр плунжера 10.

Рассчитаем предельные значения угла наклона α торцевых боковых торцевых поверхностей 7 колодки 5 с абразивными брусками 2. Наибольшее значение выбираем из условия са-

мотормощности торцевых поверхностей 7 по формуле

$$\operatorname{tg}\alpha_{\max} \leq \operatorname{tg}\varphi,$$

где $\operatorname{tg}\varphi = f = 0,1$ – коэффициент трения стали по стали;

тогда

$$\alpha_{\max} \leq 6^{\circ}.$$

Таким образом, угол наклона α_{\max} торцевых поверхностей 7 колодки 5 равен 6° .

Наименьшее предельное значение угла наклона α_{\min} торцевых поверхностей 7 колодки 5 определяем из условия осевого смещения S_O равного размеру абразивного зерна при подаче S_R равной глубине резания $S_R = t$ по формуле

$$\frac{d_{\text{зерна}}}{t_{\max}} = \operatorname{tg}\alpha_{\min},$$

где $d_{\text{зерна}} = 0,01$ мм – минимальный размер абразивного зерна; $t_{\max} = 0,25$ мм – максимальная глубина резания, мм

$$0,04 = \operatorname{tg}\alpha_{\min}$$

$$\alpha_{\min} = 2^{\circ}.$$

Таким образом, угол наклона α_{\min} торцевых боковых направляющих поверхностей 7 колодки 5 равен 2° .

Гидропластмасса применяется двух составов:

1) СМ: 20 % полихлорвинила, 78 % дибутилфталата, 2 % стеарата кальция; t плавления 135°C , объемная усадка 12 % при охлаждении до 10°C .

2) 10 % полихлорвинила, 88 % дибутилфталата, 2 % стеарата кальция. Более текуч, имеет t плавления 120°C и усадку 10 %.

В результате осевого перемещения колодки 5 S_O хонинговальная головка позволяет исключить появление глубоких рисок и улучшает качество поверхности. Гидропластмасса 3, заполняющая внутреннюю полость корпуса 1,

обеспечивает равномерно распределенное приложение радиальной нагрузки, что обеспечивает соосное расположение колодок брусков, что гарантирует точность формы обрабатываемого цилиндрического отверстия и повышает качество его поверхности. Кроме того цилиндрическая поверхность внутренней полости корпуса 1, заполненного гидропластмассой 3 обеспечивает возможность установки максимального количества колодок 5 с абразивными брусками 2, что обеспечивает повышение производительности.

В ы в о д

Хонинговальная головка, содержащая корпус, несущие колодки с торцевыми поверхностями, выполненными под углом 2–6 градусов к радиусу хонинговальной головки, абразивные бруски, закрепленные на колодках, разжимной шток, снабженный плунжером и установленный с возможностью взаимодействия с колодками брусков, обеспечивает увеличение точности формы при повышенном качестве поверхности обрабатываемого отверстия с максимальной производительностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент RU 2108902, В24В33/08, 1996г. Хонинговальная головка / В. М. Оробинский, Ю. Н. Полянчиков, А. И. Курченко, А. Г. Головкин, Ю. В. Бобыкин
2. Пат. 2596574 Российская Федерация, МПК В24D18/00. Способ изготовления абразивных изделий / А. П. Бабичев, М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров; ВолгГТУ. – 2016.
3. Полянчиков, Ю. Н. Формирование структурных связей в абразивном инструменте при дополнительном дроблении зерен электрокорунда / Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров, М. Ю. Полянчикова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7 (110) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 9). – С. 37–39.
4. Redistribution of hydrogen in steel on machining / Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров, О. А. Курсин, М. Ю. Полянчикова, В. Н. Егорова // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 4. – С. 282–284.

УДК 629.114.2-235

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЖЕНИЯ ФРИКЦИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ ДИСКА ТРЕНИЯ ГМТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПЫЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЕГО СЦЕПЛЕНИЯ С ОСНОВОЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: au@vstu.ru

Представленный материал посвящен созданию диска трения с фрикционным плазменным покрытием для работы в масле во фрикционных устройствах гидромеханических трансмиссий транспортных гусеничных машин. Разработана конструкция диска, математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия диска трения ГМТ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства, и проведено исследование влияния параметров напыления на прочность его сцепления с основой.

Ключевые слова: гидромеханическая трансмиссия, фрикционные устройства, диски трения, контртело, трение в масле, напыление, плазменное фрикционное покрытие, сцепление с основой.

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

**A MATHEMATICAL MODEL OF LOADING THE FRICTION PLASMA COATING
OF THE FRICTION GMT DISC AND THE STUDY OF THE COATING PARAMETERS
INFLUENCE ON THE STRENGTH OF ITS ADHESION WITH THE BASE**

Volgograd State Technical University

The presented material is devoted to the creation of a friction disk with a friction plasma coating for working in oil in friction devices of hydraulic transmissions of transport tracked vehicles. The design of the disk, a mathematical model of loading the friction plasma coating friction disk GMT taking into account the geometric characteristics of the friction device and a study of the impact of spraying parameters on the strength of its adhesion to the base.

Keywords: hydromechanical transmission, frictional devices, friction disks, a counterbody, friction in oil, dusting, a plasma frictional covering, coupling with a basis.

Для достижения высоких эксплуатационных свойств деталей трения наиболее целесообразным, с экономической и технической точек зрения, является нанесение покрытий. Одним из наиболее перспективных методов формирования покрытий является метод плазменного напыления, который позволяет получить различные по составу покрытия, прочно связанные с основным металлом [1,2,3].

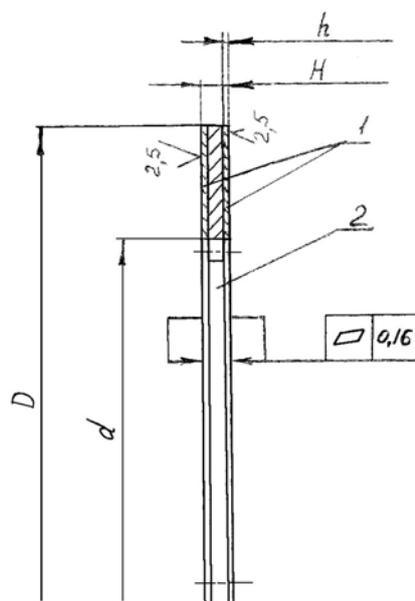
Плазменные фрикционные покрытия с коэффициентом трения $f = 0.12 \dots 0.18$ при работе со стальным контртелом в масле используются с целью повышения служебных характеристик дисков фрикционных устройств и конусов инерционных синхронизаторов трансмиссий легких транспортных гусеничных машин (ГМ).

Целью настоящей работы является созда-

ние диска трения с фрикционным плазменным покрытием для работы в масле во фрикционных устройствах ГМТ транспортных ГМ.

Новизной работы является конструкция диска с плазменным фрикционным покрытием, математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия диска трения ГМТ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства и выявленные закономерности влияния параметров напыления на прочность его сцепления со стальной основой.

На рис. 1 представлены разработанные фрикционные диски с плазменным покрытием. На рис. 2 представлена фрикционная муфта переключения передач коробки передач (КП) с дисками трения с плазменным фрикционным покрытием.



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

Рис. 1. Фрикционные диски с плазменным покрытием:

1 – фрикционный материал – сталь У10А, сталь 40Х13, Мо; 2 – основа диска – сталь 65Г

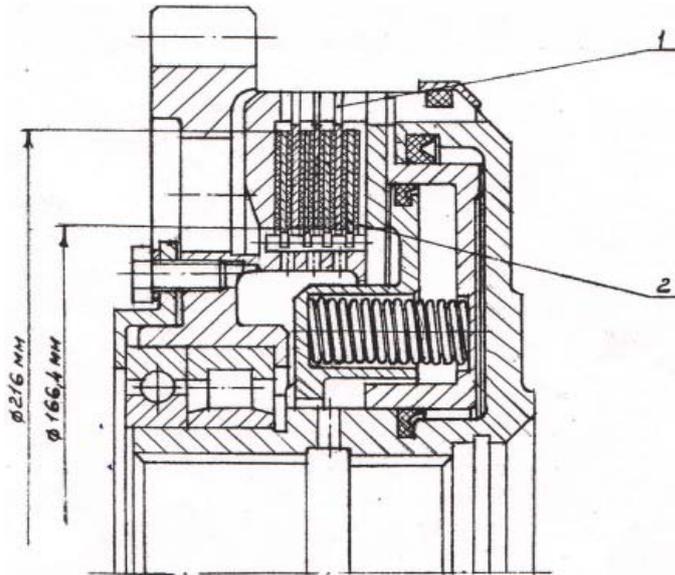


Рис. 2. Фрикционная муфта переключения передач:
1 – ведущие стальные диски; 2 – ведомые диски трения с плазменным фрикционным покрытием

Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины.

В транспортном машиностроении широко

применяются в гидромеханических трансмиссиях (ГМТ) фрикционные устройства, работающие в масле. Кинематическая схема ГМТ транспортной ГМ массой 18 т представлена на рис. 3.

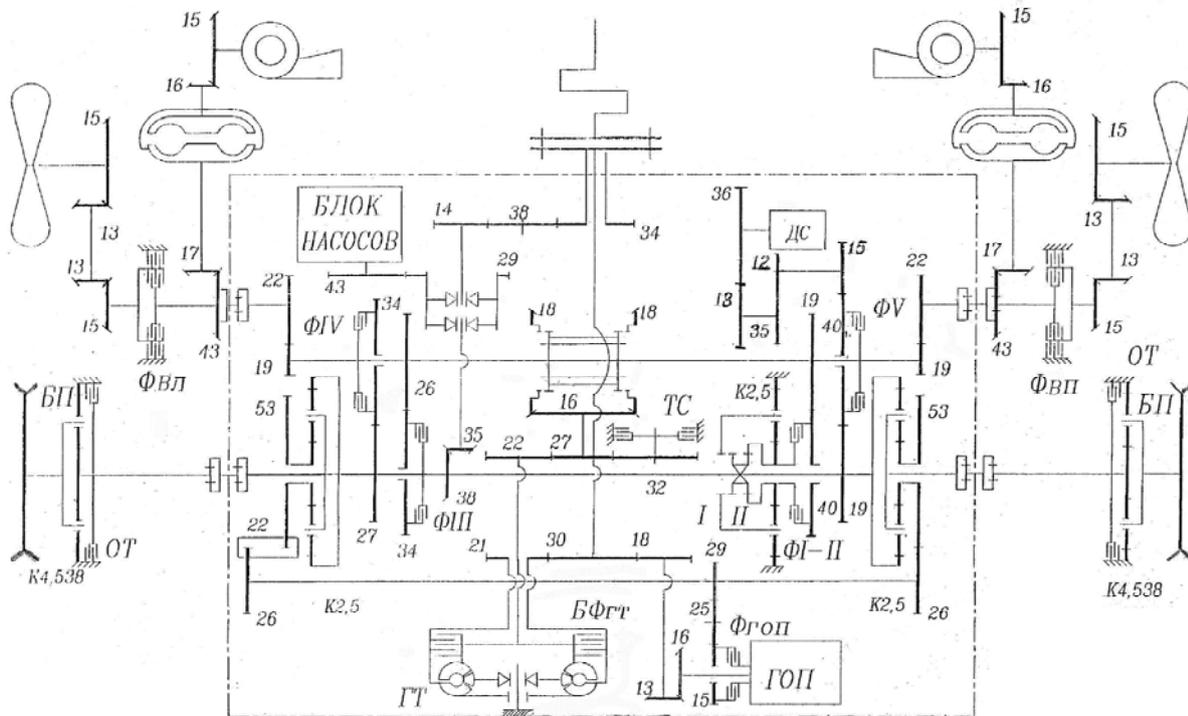


Рис. 3. Кинематическая схема гидромеханической трансмиссии ГМ:

БФгт – фрикцион блокировки гидротрансформатора (ГТ), ТС – тормоз-синхронизатор ГТ, ФП-И, ФШ, ФIV, ФV – фрикционные муфты КП, Фгоп - фрикционная муфта отключения гидрообъемной передачи механизма поворота (МП), Фвл, Фвп – фрикционные муфты включения левого и правого водометных движителей (ВД), БП – бортовая передача, ОТ – остановочный тормоз; ДС – датчик спидометра; I, II, III, IV, V – передачи КП

Разработана математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия диска фрикционного устройства трансмиссии транспортной ГМ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства. Эта модель, разработанная для фрикционного диска

$$\frac{G \cdot \varphi \cdot R_{\text{БК}}}{i_{\text{БП}} \cdot i_1 \cdot \eta_{\text{ТП1}}} > (M_{\text{дв}}^{\text{max}} + I_{\text{дв}} \cdot \ddot{\varphi}_{\text{вщ}} \cdot i_{\text{р1}} \cdot k \cdot i_{\text{р2}} \cdot i_{\text{к}}) \cdot i_{\text{р1}} \cdot k \cdot i_{\text{р2}} \cdot i_{\text{к}} \cdot \eta = f \cdot P \cdot R_{\text{ср}} \cdot z < [\tau_{\text{кр}}] \cdot 0.2 D_{\text{н}}^3 \left(1 - \frac{D_{\text{в}}^4}{D_{\text{н}}^4}\right),$$

где G – вес ГМ; φ – коэффициент сцепления гусениц с грунтом; $R_{\text{БК}}$ – радиус ведущего колеса; $i_{\text{БП}}$ – передаточное число бортовой передачи; i_1 – передаточное число механизма передач и поворота на первой передаче; $\eta_{\text{ТП1}}$ – к.п.д. трансмиссии на первой передаче; $M_{\text{дв}}^{\text{max}}$ – максимальный момент двигателя; $I_{\text{дв}}$ – момент инерции частей двигателя, приведенный к ведущим элементам; $\ddot{\varphi}_{\text{вщ}}$ – ускорение ведущих частей двигателя; $i_{\text{р1}}$ – передаточное число редуктора перед гидротрансформатором; k – коэффициент трансформации гидротрансформатора; $i_{\text{р2}}$ – передаточное число редуктора после гидротрансформатора; $i_{\text{к}}$ – передаточное число конической пары КП; η – к.п.д. совокупности входных звеньев (редуктор 1, редуктор 2, коническая пара КП) перед фрикционной муфтой; f – коэффициент трения; P – нормальное усилие; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус трения; z – число пар трения; $[\tau_{\text{кр}}]$ – допускаемые напряжения на кручение в сопряжении «плазменное фрикционное покрытие – основа под напыление», определяемые расчетом по математической модели нагружения фрикционного диска; $D_{\text{н}}$, $D_{\text{в}}$ – соответственно наружный и внутренний диаметры покрытия на диске.

С помощью математической модели вычисляются напряжения $\tau_{\text{кр}}$ при кручении фрикционного сопряжения «плазменное покрытие – стальная основа». Результаты вычисления сравниваются с результатами экспериментальных испытаний. Для фрикционного диска диаметром 176 мм с плазменным фрик-

ГМТ легкой транспортной ГМ, установленного на промежуточном валу КП, полученная с учетом принципа Даламбера при замедлении ведущих частей фрикционной муфты (Φ_{IV} , Φ_{V}), представлена выражением:

ционным покрытием на основе Mo , установленного в тормозе-синхронизаторе для включения зубчатой муфты реверса ГМТ на изделия массой 18 тонн и с $[\tau_{\text{кр}}] \geq 220 \text{ кгс/см}^2$ пробег испытуемого изделия составил 2500 км без замечаний.

По результатам испытаний для фрикционных плазменных покрытий можно рекомендовать адгезионную прочность $[\tau_{\text{кр}}] \geq 220 \text{ кгс/см}^2$.

Для проверки требуемых расчетных $[\tau_{\text{кр}}]$ было проведено исследование влияния параметров напыления на прочность сцепления покрытий с основой.

Оптимальными параметрами дробеструйной обработки деталей стальной крошкой перед плазменным напылением, обеспечивающей получение максимально развитой поверхности (шероховатости), являются следующие: давление – 4...5 ати; дистанция дробеструйной обработки – 45...50 мм; время обработки – 0,1 мин/см²; угол наклона пистолета – 70...90 градусов.

Основной фактор, определяющий возможность практического применения напыленных покрытий, это прочность их сцепления с основой. Методы определения прочности сцепления базируются на отрыве покрытия в нормальном к поверхности основы направлении, осевом или тангенциальном сдвиге. Более точные результаты прочности сцепления получают при отрыве покрытия от основы в нормальном направлении [4,5].

Прочность сцепления по результатам испытаний штифтовой пробой и на сдвиг для плазменных покрытий, нанесенных из высокоуглеродистой стали (0,1 % С), МПа [5] представлена в таблице.

Прочность сцепления по результатам испытаний штифтовой пробой и на сдвиг для плазменных покрытий, нанесенных из высокоуглеродистой стали (0,1 % С), МПа

Вид испытаний	Обработка для придания шероховатости поверхности		
	пескоструйная обработка	напыление подслоя Мо	нанесение рваной резьбы и напыление Мо
штифтовая проба	18,3	14,8	20,9
на сдвиг	47,9	60,8	110,1

На рис. 4 представлена зависимость прочности сцепления σ плазменных покрытий от параметров напыления проволочных и порошковых материалов из высокоуглеродистых сталей У8, У10.

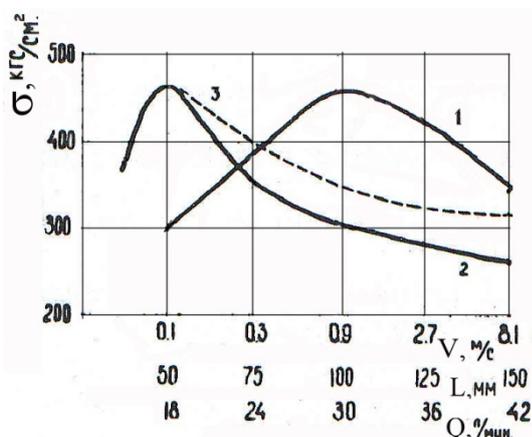


Рис. 4. Зависимость прочности сцепления плазменных покрытий от параметров напыления:

1 – от скорости V перемещения подложки (при $L = 50$ мм, $Q = 18$ л/мин, порошок); 2 – от дистанции напыления L (при $V = 0,1$ м/с, $Q = 18$ л/мин, проволока); 3 – от расхода Q газа (при напылении аргоновой струей, $L = 50$ мм, $V = 0,1$ м/с, проволока)

Характер кривых зависимости прочности сцепления от параметров процесса напыления свидетельствует о существовании определенных закономерностей, которые, как показали эксперименты, являются общими для процесса напыления всех исследуемых материалов. Максимальное значение прочности сцепления получено при напылении с дистанции 50 мм для проволоки (кривая 2) и 100 мм для порошкового материала (кривая 1). Установлено, что величина прочности сцепления в зависимости от параметров напыления проходит через экстремум.

Исследование прочности сцепления из порошковых композиций и проволочных материалов от силы тока показывает, что оптимальные результаты для порошковых композиций получены при силе тока 450 А, а при напылении проволоки – 500...550 А. Оптимальные результаты по прочности сцепления получены при расходе аргона 30 л/мин. Оптимальные

толщины плазменных покрытий - 0,4...1,2 мм.

В результате исследований установлены режимы напыления:

а) для нанесения покрытий из высокоуглеродистых сталей - дистанция напыления $L = 120$ мм; сила тока $I = 450$ А; напряжение $U = 30$ В; расход плазмообразующего газа $Q = 17$ л/мин; б) для легированных сталей – $L = 90...110$ мм; $I = 450...500$ А; $U = 30...32$ В; $Q = 26...28$ л/мин.

Выводы. Предложена конструкция диска трения с фрикционным плазменным напылением, результаты исследования которого подтвердили соответствие математической модели его нагружения эксперименту. Выявлено влияния параметров плазменного напыления фрикционного материала на прочность его сцепления с основой. Результаты могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих трансмиссий легких транспортных ГМ.

Материалы статьи подготовлены с использованием ПО КОМПАС 3D и PTC Mathcad, приобретенного в рамках реализации инфраструктурного проекта по конкурсу Минобрнауки «Новые кадры ОПК» 2014 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чайка, Б. И. Плазменные покрытия для поршневых колец автотракторных двигателей / Б. И. Чайка [и др.] // Порошковая металлургия, 1978. – № 3. – С. 86–91.
2. Крыхтин, Ю. И. Разработка заготовок дисков трения с бронзовым на основе БрАЖ(SiC) покрытием для надежной работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 69–74.
3. Крыхтин, Ю. И. Разработка новой блокирующей обоймы конического инерционного синхронизатора фрикционных устройств трансмиссий транспортных машин для повышения надежности и долговечности работы в масле / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 85–91.
4. Шаривкер, С. Ю. Прочность сцепления плазменных покрытий / С. Ю. Шаривкер // Порошковая металлургия, 1967. – № 6. – С. 70–73.
5. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М., Машиностроение, 1985. – 239 с.

УДК 629.114.2-235

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЖЕНИЯ ФРИКЦИОННОГО
ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ КОНУСА ИНЕРЦИОННОГО СИНХРОНИЗАТОРА МТ
И ПРОВЕРКА ЕЕ ИСПЫТАНИЕМ СИНХРОНИЗАТОРОВ НА ИЗДЕЛИЯХ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: au@vstu.ru

Представленный материал посвящен созданию конуса инерционного синхронизатора с фрикционным плазменным покрытием для работы в масле во фрикционных устройствах механических трансмиссий (МТ) транспортных гусеничных машин. Разработана конструкция конуса инерционного синхронизатора МТ, математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства, и проведена проверка модели испытанием синхронизаторов на изделиях.

Ключевые слова: механическая трансмиссия, фрикционные устройства, конус инерционного синхронизатора, контртело, трение в масле, напыление, плазменное фрикционное покрытие, сцепление с основой.

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

**A MATHEMATICAL MODEL OF LOADING THE FRICTION PLASMA COATING
OF THE INERTIAL MT SYNCHRONIZER CONE AND ITS VERIFICATION
BY TESTING THE SYNCHRONIZERS ON THE PRODUCTS**

Volgograd State Technical University

The presented material is devoted to the creation of a cone inertial synchronizer with a friction plasma coating to work in oil in friction devices of mechanical transmissions (MT) transport tracked vehicles. The design of the MT inertial synchronizer cone, the mathematical model of loading the MT inertial synchronizer cone friction plasma coating taking into account the geometric characteristics of the frictional device are developed and the model is checked by testing synchronizers on products.

Keywords: mechanical transmission, friction devices, cone of inertial synchronizer, counterbody, friction in oil, spraying, plasma friction coating, adhesion to the base.

Предлагаемое техническое решение предназначено для использования в механических коробках передач (КП) с зубчатыми муфтами и постоянно зацепленными шестернями трансмиссий гусеничных машин (ГМ) или колесных машин (КМ), например, гусеничных тягачей, колесных тракторов, автомобилей и т. д., в которых применяются инерционные конусные синхронизаторы для безударного включения передач.

Известны конструкции монолитных стальных блокирующих обойм (конусов синхронизатора) инерционных синхронизаторов для трансмиссий ГМ и КМ с коническими рабочими поверхностями [1].

На рис. 1 показан серийный инерционный конусный синхронизатор КП.

Монолитная стальная блокирующая обойма серийного инерционного синхронизатора имеет недостатки: при значительных нагрузках не обеспечивается надежность и долговечность узла. При работе стальной (сталь 12ХН3А, HRC≥52)

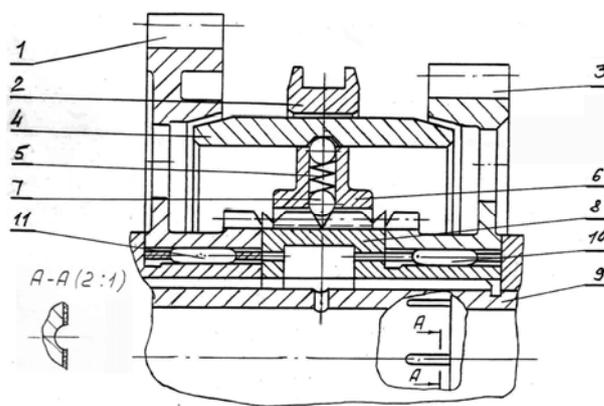


Рис. 1. Серийный инерционный конусный синхронизатор коробки передач:

1 – ведущая шестерня IV передачи; 2 – кольцо; 3 – ведущая шестерня III передачи; 4 – блокирующая обойма; 5 – пружина фиксатора; 6 – зубчатка; 7 – шарик; 8 – зубчатая муфта; 9 – промежуточный вал коробки передач; 10, 11 – ролики. Пара трения сталь 12ХН3А (конус синхронизатора) – сталь 20 Х2Н4А (контртело)

обоймы синхронизатора со стальным (сталь 20Х2Н4А, HRC≥58) контртелом в зоне трения происходит следующее.

Скольжение двух сопряженных однородных стальных поверхностей приводит к возникновению процессов, присущих граничному трению, т. е. имеет место периодический разрыв масляной пленки и происходит металлическое контактирование двух тел на локальных участках поверхностей трения, на которых в результате высоких контактных нагрузок возникает пластическая деформация металла, достигающая критических значений, приводящих к деформированию поверхностных слоев металла и его износу. Наряду с этим на локальных участках поверхностей трения имеет место процесс локального схватывания, который при повышении нагрузок может распространиться на всю поверхность трения, т. е. привести к выходу блокирующей обоймы синхронизатора из строя [1, 2].

Целью предлагаемого технического решения является повышение надежности и долговечности работы конуса синхронизатора (блокирующей обоймы) инерционного синхронизатора.

Новизной предлагаемого технического решения является то, что на конических поверхностях блокирующей обоймы инерционного синхронизатора выполнено покрытие из материала триботехнического назначения с пористостью 10...25 % и равномерно расположенные по образующим конуса продольные радиусные (полуцилиндрические) канавки глубиной 1...1,2 мм, а также разработана математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства для вычисления напряжения при кручении фрикционного сопряжения «плазменное покрытие - стальная основа». Результаты сравниваются экспериментом.

Для достижения высоких эксплуатационных свойств деталей трения наиболее целесообразным, с экономической и технической точек зрения, является нанесение покрытий. Одним из наиболее перспективных методов формирования покрытий является метод плазменного напыления, который позволяет получить различные по составу покрытия, прочно связанные с основным металлом [2].

Плазменные фрикционные покрытия с коэффициентом трения $f = 0.12...0.18$ при работе со стальным контртелом в масле используются с целью повышения служебных характеристик дисков фрикционных устройств и конусов инерционных синхронизаторов трансмиссий ГМ и КМ.

Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины.

На рис. 2 изображена перспективная блокирующая обойма инерционного синхронизатора с фрикционным газотермическим покрытием. На наружные конические поверхности стальной основы обоймы синхронизатора нанесено покрытие из материала триботехнического назначения толщиной 0,5 мм [4].

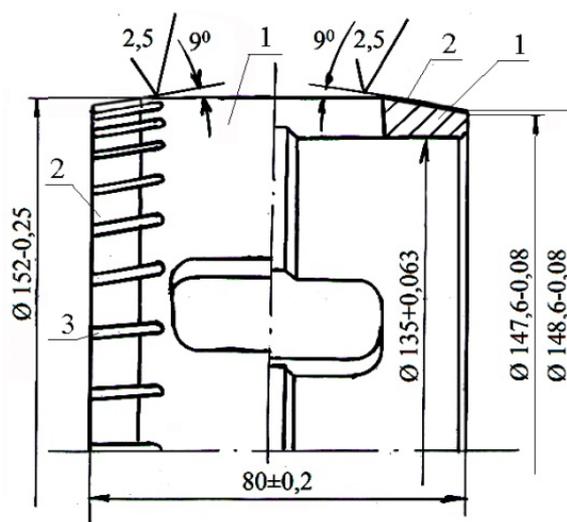


Рис. 2. Блокирующая обойма инерционного синхронизатора с фрикционным газотермическим покрытием:
1 – основа (сталь 12ХН3А); 2 – покрытие: сталь У10А, сталь 40Х13, Мо, БрАЖ9-4(SiC); 3 – канавка

На конических поверхностях выполнены равномерно расположенные по образующим конуса продольные радиусные (полуцилиндрические) канавки глубиной 1...1,2 мм для удаления смазки и продуктов износа с рабочих поверхностей.

При скольжении конических поверхностей блокирующей обоймы и контртел пористое покрытие на блокирующей обойме способно деформироваться и уплотняться в локальных объемах, что существенно уменьшает возможность схватывания на локальных участках поверхностей трения и, следовательно, предотвращает распространение процесса схватывания на всю поверхность трения.

На рис. 3 изображена кинематическая схема механической трансмиссии с четырехскоростной КП, в которой на промежуточном валу установлены конические инерционные синхронизаторы III и IV передач, для легкой транспортной ГМ массой 7...8 тонн.

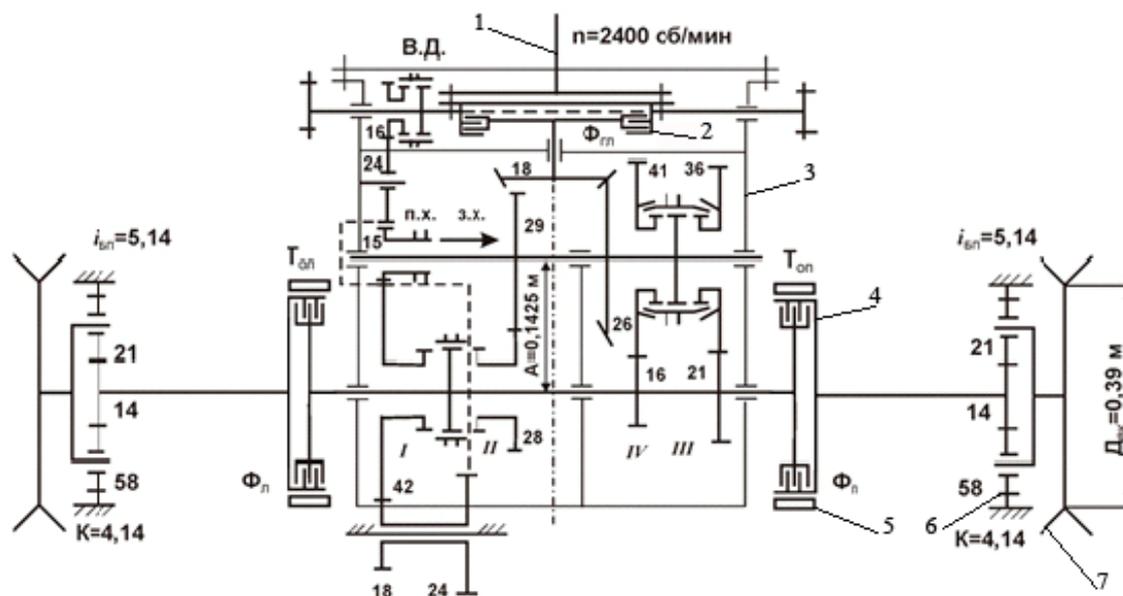


Рис. 3. Кинематическая схема механической трансмиссии ГМ:

1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – главный фрикцион; 3 – коробка перемены передач, двухвальная, с синхронизаторами III–IV передач; 4 – механизм поворота (бортовой фрикцион); 5 – остановочный тормоз, ленточный; 6 – бортовая передача планетарная; 7 – ведущее колесо; пх, зх – соответственно передний и задний ход

Разработана математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса (блокирующей обоймы) инерционного синхронизатора КП механической трансмиссии транспортной ГМ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства.

$$I_1 \cdot \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{T_c} + \frac{M_2}{I_2} \right) = \frac{f \cdot P \cdot R_{\text{ср}}}{\sin \alpha} < [\tau_{\text{кр}}] \cdot \frac{\pi \cdot R_{\text{вн}}^3 \cdot t}{\sin(90^\circ - \alpha)}; \quad M_2 = \frac{f_c \cdot G \cdot R_{\text{вк}}}{i_T \cdot \eta_T}; \quad I_2 = \frac{\delta_2 \cdot G \cdot R_{\text{вк}}^2}{g \cdot (i_T')^2},$$

где I_1 – момент инерции ведомых частей ГФ, ведущего вала, промежуточного вала и жестко связанных с ним деталей, приведенных к оси промежуточного вала; ω_1, ω_2 – выравниваемые угловые скорости соответственно ведущих и ведомых элементов КП; T_c – время синхронизации (задается 0,5...0,7 с); M_2 – момент сопротивления движению, приведенный к ведомым дискам ГФ; I_2 – момент инерции ведомых частей ГФ, приведенные к ним моменты инерции вращающихся деталей трансмиссии и момент инерции поступательного движения ГМ в целом на II передаче; f – коэффициент трения; P – осевое усилие, действующее на конус синхронизатора; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус трения; α – угол образующей конуса; $[\tau_{\text{кр}}]$ – допускаемые напряжения на кручение сопряжения «плазменное фрикционное покрытие – стальная основа»; $R_{\text{вн}}$ – средний внутренний радиус покрытия на конусе синхронизатора; t – толщина покрытия; f_c – коэффициент суммарного сопро-

Математическая модель процесса нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ при выключенном главном фрикционе (ГФ) представлена следующими выражениями:

тивления движению ГМ; G – вес ГМ; $R_{\text{вк}}$ – радиус ведущего колеса ГМ; i_T – передаточное число трансмиссии от вала, на котором установлен синхронизатор, до ведущего колеса; η_T – к.п.д. трансмиссии и ходовой части; δ_2 – коэффициент учета вращающихся масс трансмиссии и ходовой части, приведенных к оси промежуточного вала КП ($\delta_2 = 1,21$); g – ускорение свободного падения; i_T' – передаточное число от ведущего колеса к промежуточному валу КП на IV передаче.

С помощью математической модели вычисляются напряжения $\tau_{\text{кр}}$ при кручении фрикционного сопряжения «плазменное покрытие – стальная основа». Результаты сравниваются с экспериментом.

ГМ массой 7,2 т с удельной мощностью $N_{\text{уд}} = 33,3$ л.с./Тс с опытными конусами синхронизатора III-й и IV-й передач испытывались по грунтовым проселочным дорогам в различных погодных и дорожных условиях.

В процессе полевых испытаний опытный синхронизатор с бронзовым плазменным покрытием на конических поверхностях обеспечил нормальную работу ГМ с общей протяженностью пробега 5770 км. Отклонений в работе синхронизатора при переключении передач не обнаружено, обеспечивалось быстрое

безударное включение передач, что свидетельствует о достаточной величине коэффициента трения.

На рис. 4 показаны конус синхронизатора с фрикционным слоем из состава Бр.АЖ9-4 (SiC) и контртела из стали 20Х2Н4А после пробега изделия 5770 км.

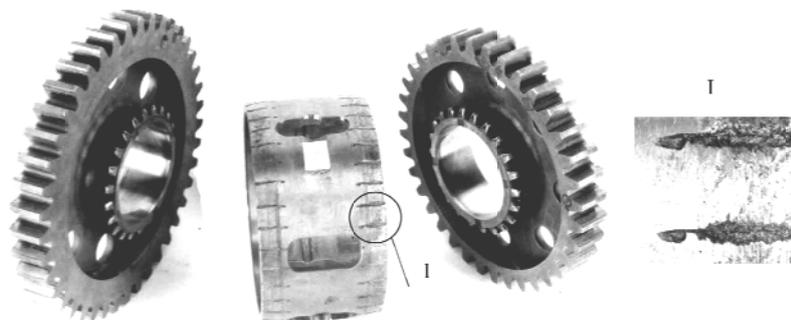


Рис. 4. Конус синхронизатора с фрикционным слоем Бр.АЖ9-4 (SiC) и контртела из стали 20Х2Н4А после пробега изделия 5770 км

Величины износа поверхностей трения конуса синхронизатора с бронзовым покрытием после пробеговых испытаний представлены в таблице. Из таблицы следует, что конус син-

хронизатора, с газотермическим бронзовым покрытием по эксплуатационным свойствам значительно превосходит серийный конус синхронизатора.

Результаты натуральных испытаний конусов синхронизаторов

№ машины	Пробег, км	Фрикционное покрытие на конусе	Износ поверхности трения конуса синхронизатора, мм		Износ поверхности трения контртела, мм	
			III передача	IV передача	III передача	IV передача
1	2	3	4	5	6	7
1	5770	Бр.АЖ9-4 (SiC)	0,0375	0,036	0,0265	0,009
2	3790	Mo	0,124	0,059	0,07	0,065
3	10000	40X13	0,25	0,24	0,16	0,159
4	10000*	Сталь 12ХНЗА	0,225	0,2	0,1	0,1

*– штатная эксплуатация ГМ (серийные конуса синхронизатора)

По результатам испытаний конусов синхронизаторов на ГМ на практике для фрикционных плазменных покрытий можно рекомендовать адгезионную прочность $[\tau_{кр}] \geq 220 \text{ кгс/см}^2$.

Выводы

Предложена конструкция конуса инерционного синхронизатора с фрикционным плазменным напылением для КП механической трансмиссии, результаты исследования которого на изделиях подтвердили соответствие математи-

ческой модели его нагружения эксперименту.

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. Крыхтин, Ю. И. Физические основы разработки заготовок дисков трения с молибденовым покрытием для повышения надежности работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Вестник машиностроения, 2016. – № 12. – С. 70–74.

УДК 621.9.02-589.2

*О. А. Макарова, В. И. Алексейчук, А. И. Банников***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: makarova@rambler.ru

В статье рассмотрены основные методы, применяемые на АО «Волжский трубный завод» для обработки концов труб большого диаметра. Ни один из методов, существующих на заводе, не может отвечать требованиям современных условий рынка, поэтому появилась необходимость предложения нового способ обработки.

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

*O. L. Makarova, V. I. Aleksejchuk, A. I. Bannikov***THE RESEARCH OF THE LARGE DIAMETER PIPES PROCESSING****Volgograd State Technical University**

In article the main methods applied on JSC Volzhsky trubny zavod to processing of the ends of pipes of big diameter are considered. Each of methods, existing at the plant, can't meet the requirements of modern conditions of the market therefore need of the offer new a way of processing has appeared.

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

Одной из отраслей машиностроения является трубная, актуальной проблематикой в которой является обработка конца трубы, т. е. снятие полиэтиленового покрытия не повредив праймер. Поверхность определенных видов сварных труб большого диаметра покрывается двумя изоляционными слоями: праймер – эпоксидный слой и слой полиэтилена. Такое покрытие позволяет сохранять поверхность трубы от воздействия внешних сред и продлевать ее срок эксплуатации.

Для решения проблемы на производстве

существуют две технологии. Рассмотрим подробно каждый из них.

При производстве трубы завод должен следовать ряду технических условий (рис. 1) [4]. Необходимо соблюдение геометрических параметров слоев праймера и полиэтилена, а также существуют жесткие требования к виду и качеству слоя праймера. Поверхность эпоксидного слоя не должна быть меньше заданной толщины, и на ней не должно оставаться следов полиэтилена.

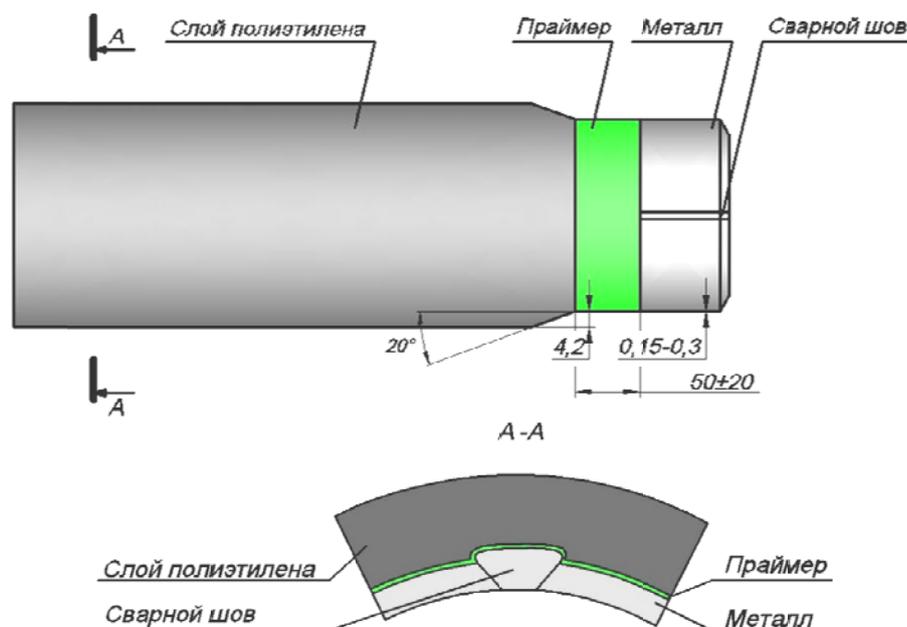


Рис. 1. Внешний вид прямошовной трубы

На АО «ВТЗ» края трубы ведутся двумя методами: обработка жесткими жгутиковыми щетками и обработка гибким ножом.

Обработка края тубы жгутиковыми щетками показана на рис. 2.

При данном методе обработки так же высока

производительность, сама щетка намного долговечнее ножа (рис. 3), так как имеет высокую стойкость. При обработке жгутиковыми щетками слой полиэтилена снимается полностью, но при этом повреждается праймер, что недопустимо для обработки концов труб (рис. 1).

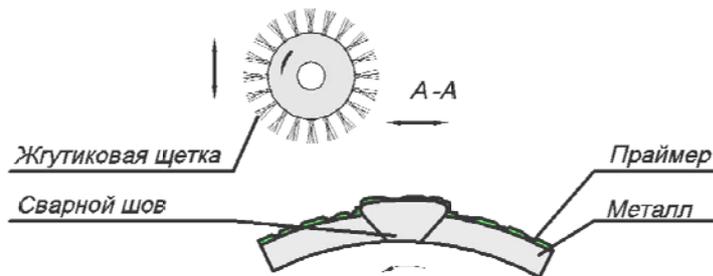


Рис. 2. Схема обработки края трубы жесткой жгутиковой щеткой

Обработка гибким ножом концов труб представлена на рис. 3.

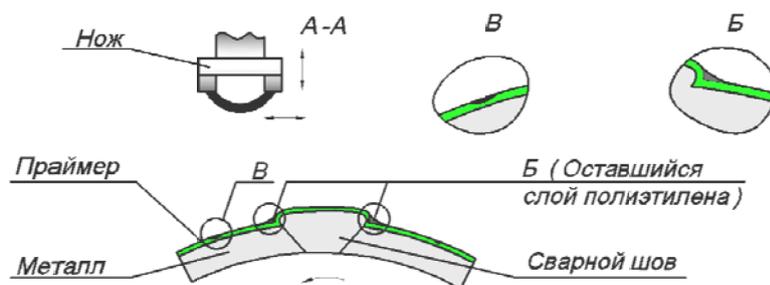


Рис. 3. Схема обработки края трубы гибким ножом

При данном методе обработки достигается высокая производительность, а также установка закрепления инструмента, и сама обработка трубы является достаточно простой. При этих достоинствах у данного метода есть существенный недостаток: нож не может полностью удалить слой полиэтилена с поверхности праймера и оставляет вкрапления, а в местах стыка

сварного шва с трубой сплошную линию эпоксидного слоя (полиэтилена).

Для обработки концов трубы было предложено использовать цилиндрическую однорядную щетку (рис. 4). Для подтверждения гипотезы о возможности срезания цилиндрическими щетками полиэтилен, не затрагивая праймер, нами была произведена серия экспериментов.

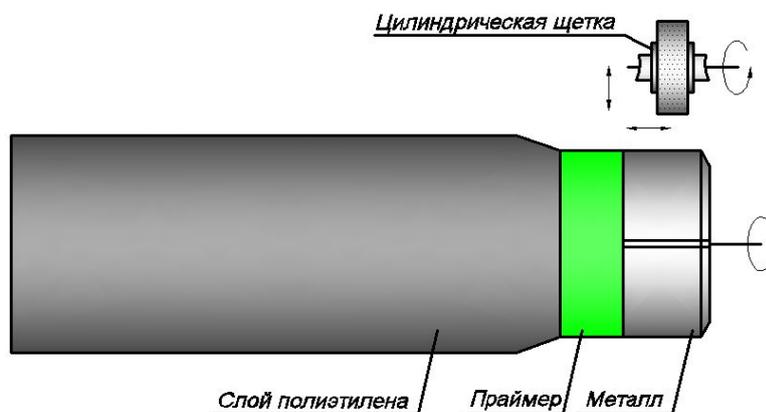


Рис. 4. Схема обработки цилиндрической щеткой края тубы

Рассмотрим подробнее характеристики щетки и образца.

Для проведения эксперимента АО «ВТЗ» выделил экспериментальный образец, который был вырезан с трубы (рис. 1). Образец состоит из: металла и изоляционного слоя, состоящего из двух слоев: праймера и полиэтилена (рис. 5).

При данной технологии покрытия праймер уже включает в себя адгезионные материалы, которые позволяют избавиться от необходимости покрывать праймер дополнительным слоем адгезии, что ускоряет и удешевляет технологию производства труб (рис. 5).

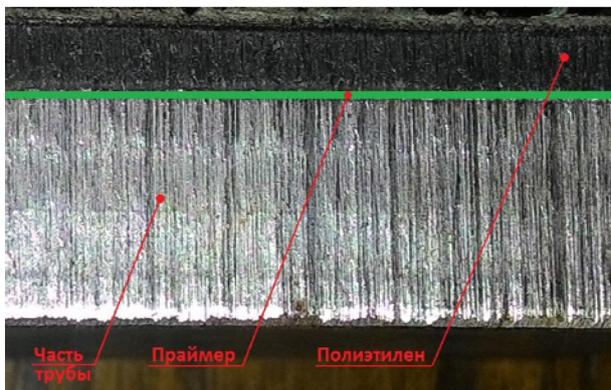


Рис. 5. Экспериментальный образец

Обработка производилась на числах оборотов шпинделя от 630 до 900 об/мин, именно при данных числах оборотов достигалась съем полиэтилена с поверхности экспериментального образца.

УДК 621.9.011

А. П. Митрофанов, А. А. Крутикова, К. А. Паршева, А. А. Муравьев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ШЛИФОВАНИЯ ИМПРЕГНИРОВАННЫМ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ*

Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета

E-mail: vto@volpi.ru

В работе представлены экспериментальные исследования влияния внешней среды при шлифовании посредством импрегнирования абразивного инструмента на состояние поверхностного слоя титанового сплава ВТ6. Методом инструментального индентирования установлено, что микротвердость тонкого поверхностного слоя увеличивается на 1–1,5 ГПа, значительно изменяется зеренная структура и размер кристаллитов, что в конечном итоге отражается на характере контактных процессов и шероховатости обработанной поверхности.

Ключевые слова: поверхностный слой, титановый сплав ВТ6, шлифование, импрегнирование абразивного инструмента, микротвердость, зеренная структура.

Как показал эксперимент, «наилучшие» поверхности получаются при обработке на 630 об/мин и на 700 об/мин, при 630 оборотах в минуту обработка осуществляется за три прохода. При 700 об/мин сокращается до двух проходов, поверхность после обработки не только остается «чистой», то есть без следов полиэтилена, а дополнительно получает эффект «выглаживания».

В результате проведенных экспериментов мы пришли к нескольким выводам:

– лучшим инструментом для снятия слоя полиэтилена с конца трубы по ТУ АО «ВТЗ» является цилиндрическая однорядная щетка;

– в зависимости от числа оборотов шпинделя зависит и качество получаемой поверхности как это было показано ранее;

– анализ экспериментальных данных, полученных с использованием однорядной щетки показал, что лучшее качество поверхности конца трубы обеспечивается на скорости вращения шпинделя 700 об/мин, обработка осуществляется за 2 прохода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Office of Pipeline Safety under the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration – OPS PHMSA [Electronic resource]. URL: <http://www.phmsa.dot.gov> (accessed: 04.09.2013).
2. Aguirre-Vargas. F. / Novel technology to improve adhesion of fusion-bonded epoxy coating. DOW Coating Materials. [Electronic resource] – International conference «Pipeline Coating 2012». – 1 (CD-ROM).

A. P. Mitrofanov, A. A. Krutikova, K. A. Parsheva, A. A. Muraviev

THE STUDY OF THE SURFACE LAYER OF THE TITANIUM ALLOY AFTER GRINDING IMPREGNATED ABRASIVE TOOL

**Volzhsy Polytechnic Institute (branch)
of «Volgograd State Technical University»**

The paper presents experimental studies of the influence of the external environment during grinding, by means of impregnation of abrasive tools, on the state of the surface layer of titanium alloy VT6. It was established that the microhardness of the thin surface layer increases by 1-1.5 GPa, the grain structure and the size of the crystallites change significantly, which ultimately affects the nature of the contact processes and the roughness of the treated surface by the method of instrumental indentation.

Keywords: surface layer, titanium alloy VT6, grinding, impregnation of the abrasive tool, microhardness, grain structure.

Введение

Современное машиностроительное производство предполагает использование конструкционных материалов обладающих высокими технологическими свойствами. Одними из таких материалов являются сплавы на основе титана, набирающие популярность в таких активно развивающихся отраслях, например как металлургия и аэрокосмонавтика. Однако, превосходные технические характеристики, одновременно являются и достаточно значимой проблемой при механической обработке титановых сплавов резанием, в частности шлифованием. Значительная сложность связана с высокой адгезией материала к абразивному зерну и низкой теплопроводностью, что негативно сказывается на качестве обработанной поверхности и значительно влияет на износ шлифовального круга. В мировой практике [1–2] имеется опыт повышения эффективности шлифования титановых сплавов за счет применения специальных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), транспортируемых в зону резания различными способами, в том числе, посредством импрегнирования абразивного инструмента.

Введение в зону резания внешней среды в виде импрегнатора изменяет механизмы контактных процессов, безусловно, это отражается на приобретенных в результате такого воздействия свойствах поверхностного слоя. Соответственно, исследование изменения свойств поверхностного слоя, возникших в результате шлифования импрегнированным абразивным инструментом, являлось целью данной работы.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования служил титановый сплав VT6. Рабочую поверхность образцов подвергали плоскому врезному шлифованию. Характеристика базового абразивного инстру-

мента – 64CF60K7V. Режимы обработки: скорость круга $v = 30$ м/с; скорость подачи стола $v_s = 12$ м/мин; подача на глубину $t = 0,02$ мм/дв.ход. Обработку осуществляли методом полива водным раствором кальцинированной соды (0,3 %).

В качестве пропитки для абразивного инструмента использовали два состава: на основе гексахлорпарахлорсилы (состав 1) (Пат. 2532615 РФ [3]) и на основе борной кислоты (состав 2). Импрегнирование абразивного инструмента осуществляли методом свободного капиллярного поднятия.

Шероховатость поверхности R_a измеряли непосредственно в рабочей зоне станка профилографом-профилометром «СЕЙТРОНИК ПШ8-4 С.С.» в 20 сечениях по длине образца.

Исследование структуры приповерхностных слоев обработанных образцов проведено с использованием двухлучевого электронного растрового микроскопа Versa 3D LoVac.

Твердость поверхностного слоя образцов H измеряли с помощью метода инструментального индентирования используя микро/нано твердомер «Константа МНТ». Нагрузку на индентор варьировали в интервале от 20 до 500 мН, данные усредняли по значениям не менее пяти измерений на каждой нагрузке.

Результаты исследований и их обсуждение

Импрегнирование абразивного инструмента предложенными составами довольно значимо сказывается на одном из основных технологических параметров качества обработки – шероховатости обработанной поверхности. Так, при глубине резания $t = 0,02$ мм/дв.ход, шероховатость поверхности ниже на 23 % при шлифовании импрегнированным абразивным инструментом (ИАИ), пропитанным составом 2, и на 30 % меньше при шлифовании кругом пропи-

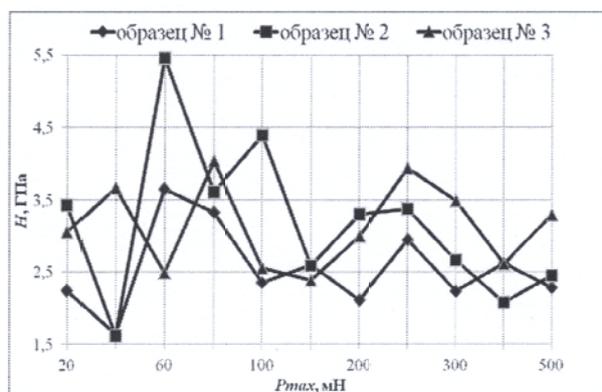
танном составом 1, в сравнении с шероховатостью $R_a = 2,5$ мкм полученной после шлифования стандартным абразивным инструментом (САИ). Соответственно, полученные результаты говорят о влиянии импрегнаторов на состояние поверхностного слоя через изменение его свойств, исследование которых представлены далее.

В период приработки абразивного инструмента наблюдаются значительные колебания микротвердости в тонких поверхностных слоях при малых нагрузках на индентор у образцов после шлифования САИ (образец №1) и ИАИ (состав 1 – образец № 2). Микротвердость поверхности образца № 3 (после шлифования ИАИ пропитанным составом 2) более стабильна, и при всех нагрузках варьируется в пределах 2,5–4 ГПа. Также можно констатировать однотипное поведение микротвердости у всех образцов на больших усилиях нагрузки на индентор. В начале процесса шлифования локальное воздействие на тонкий поверхностный слой наиболее значительно при использовании ИАИ пропитанного составом 1, с самыми высокими значениями микротвердости, вплоть до 5,5 ГПа (рис. 1, *а*). Рассматривая результаты исследования микротвердости поверхностного слоя в конце обработки шлифованием, контраст

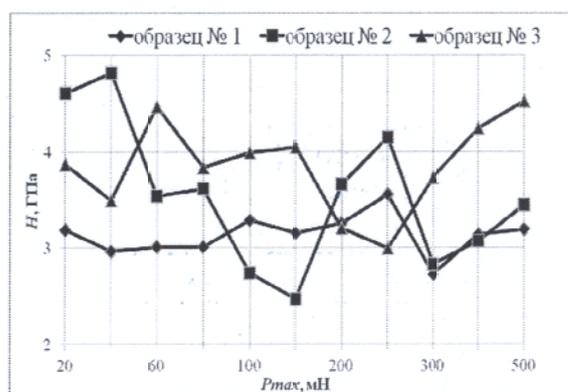
значений у образцов становится более ярким, особенно на малых усилиях нагрузки при индентировании. Здесь у обоих образцов после шлифования ИАИ микротвердость поверхностей выше на 1–1,5 ГПа, до усилия нагрузки в 100 мН. При увеличении нагрузки индентирования, микротвердость образцов № 1 и № 2 обработанных соответственно САИ и ИАИ (состав 1) становится практически одинаковой, тогда как у образца № 3, имеется тенденция на увеличение микротвердости более глубоких слоев (рис. 1, *б*). Стоит отметить достаточно стабильные значения микротвердости поверхности образца № 1 после шлифования САИ. Вне зависимости от усилия нагрузки результаты получались в районе 3 ГПа.

Титановый сплав ВТ6 по структуре относится к $\alpha+\beta$, у таких сплавов возможен целый ряд превращений, степень которых зависит от тепловых и силовых факторов [4].

Рассматривая полученные результаты исследования зеренной структуры поверхностного слоя, определенной за счет высокой контрастности ионного пучка к кристаллографическим плоскостям, можно увидеть изменения в распределение размеров зерен и их расположении по глубине (рис. 2).



а



б

Рис. 1. Микротвердость образцов титанового сплава ВТ6 после 8 проходов (*а*) и 40 проходов (*б*) абразивным инструментом

При исследовании поверхностного слоя полученного после шлифования САИ наблюдается равномерность распределения фаз и величины зерна по всей исследуемой глубине (рис. 2, *а*), что подтверждает и полученные значения микротвердости (рис. 1, *б*). Шлифование образца ИАИ пропитанным составом 1 способствует изменению ориентировки зерен в тонком поверхностном слое (рис. 2, *б*). Далее, по мере роста глубины ис-

следования, происходит увеличение размеров зерен, и их направление становится ориентировано перпендикулярно поверхности. Полученные результаты согласуются с анализом микротвердости поверхностного слоя образца № 2, а переход в более глубокие слои, где обнаруживаются уже зерна значительно крупнее, и их расположение носит направленность, что в совокупности содействует понижению микротвердости.

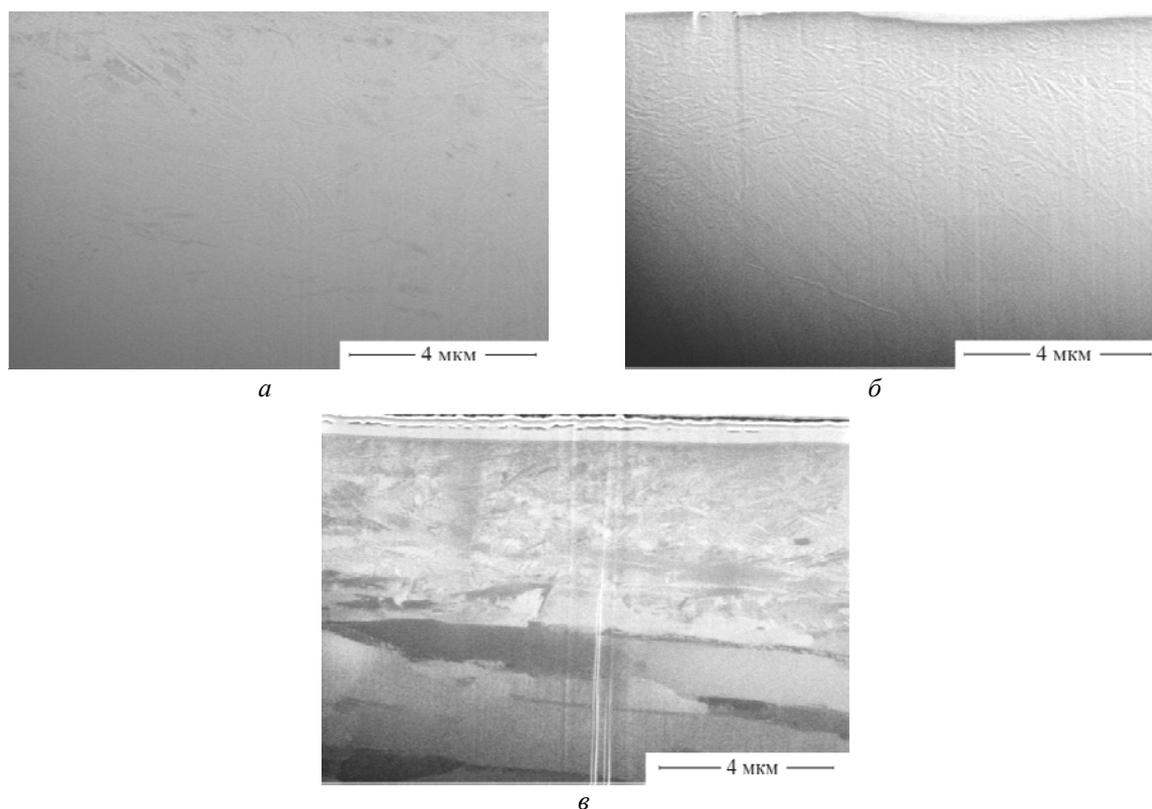


Рис. 2. Зеренная структура поверхностного слоя, полученного после шлифования:
 а – стандартный АИ; б – АИ пропитанный составом 1; в – АИ пропитанный составом 2

Совершенно иная картина зеренной структуры наблюдается при анализе поверхностного слоя полученного после шлифования АИ импрегнированным составом 2 (рис. 2, в). Здесь в самом начале, так же имеется небольшой слой наноструктурированного зерна, идентичный по размеру и форме, полученного после шлифования АИ пропитанным составом 1, но контрастность ионного пучка говорит о значительной разориентации зерен. Затем прослеживается резкая граница, где довольно отчетливо наблюдаются достаточно крупные вытянутые кристаллы, которые, скорее всего, представляют собой полосы скольжения, возможно с мартенситной структурой, направленные вдоль вектора приложенного напряжения. Этим как раз можно объяснить тот факт, что микротвердость поверхностного слоя при высоких усилиях нагрузки у образца № 3 имеет тенденцию на увеличение по сравнению с двумя другими образцами.

Выводы

Использование импрегнированного абразивного инструмента при шлифовании титанового сплава ВТ6 влияет на шероховатость обработанной поверхности. Так при глубине ре-

зания $t = 0,02$ мм/дв.ход значения по параметру R_a уменьшились на 30 %.

Установлено, что при шлифовании титанового сплава ВТ6 микротвердость приповерхностных слоев в целом имеет тенденцию на увеличение. Особенно высокие значения, до 4,5 ГПа, характерны для поверхности полученной после шлифования абразивным инструментом пропитанным составом на основе гексахлорпарацисилола.

Процессы, протекающие в зоне контактного взаимодействия при шлифовании импрегнированным абразивным инструментом, значительно влияют на структуру поверхности, меняя ее зеренную ориентированность и размер кристаллитов. При этом полученные механические характеристики поверхности в значительной мере зависят от приобретенной в результате пластической деформации зеренной структуры тонкого поверхностного слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. K. Nadolny, Effects of sulfurization of grinding wheels on internal cylindrical grinding of Titanium Grade 2 / K. Nadolny, W. Kapłonek, M. Wojtcwicz, W. Sienicki // Indian

Journal of Engineering & Materials Sciences. –April 2013. – Vol. 20. – pp. 108-124.

2. K. Nadolny 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. Wojtevicz // Archives of civil and mechanical engineering. – 2015. – Vol. 15. – pp. 71-86.

3. Пат. 2532615 РФ, МПК В24D3/34. Состав для пропитки абразивного инструмента / А.А. Крутикова, В.А. Носенко, О.М. Новополецова, А.П. Митрофанов; ВолгГТУ. – 2014.

4. R. G. Guan Effect of microstructure on deformation behavior of Ti–6Al–4V alloy during compressing process / Ren Guo Guan // Materials and Design. – 2012. – Vol. 36. – pp. 796–803.

УДК 621.922

V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, O. M. Ladygina, V. E. Puzyrkova

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ МИКРОЦАРАПАНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ ПЛОЩАДКИ ИЗНОСА КАРБИДА КРЕМНИЯ И ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ, г. Волжский

E-mail: vto@volpi.ru

Состояние поверхности площадки износа кристалла карбида кремния зеленого после микроцарапания титана и циркония исследовали на двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D. Химический состав поверхностного слоя определяли методом локального микрорентгеноспектрального анализа. Микроцарапание осуществляли на прецизионном профилешлифовальном станке с ЧПУ со скоростью 35 и 60 м/с. В качестве абразивного материала использовали специально подготовленные кристаллы карбида кремния зеленого. С увеличением скорости микроцарапания в 1,7 раза от 35 до 60 м/с перенос титана и циркония на площадку износа карбида кремния возрастает в 1,6–1,9 раза. При микроцарапании на скорости 35 м/с значимого различия в переносе титана и циркония на площадку износа карбида кремния не установлено. При микроцарапании на скорости 60 м/с содержание титана на площадке износа кристалла карбида кремния по сравнению с цирконием возрастает на 20 %. Показаны особенности формирования рельефа площадки износа кристалла карбида кремния при микроцарапании титана и циркония.

Ключевые слова: титан, цирконий, карбид кремния, скорость резания, площадка износа, морфология, химический состав, электронный микроскоп.

V. A. Nosenko, A. V. Fetisov, O. M. Ladygina, V. Ye. Puzyrkova

THE INFLUENCE OF MICROSCRATCHING SPEED ON MORPHOLOGY OF SILICON CARBIDE WEAR SITE AND TRANSFER SURFACE METAL

Volzhskiy Polytechnic institute (branch) VolgGTU, Volzhskiy

The research of wear site of silicon carbide green after the microscratching of titanium and zirconium was done using a Versa 3D dual-beam electron microscope. The chemical composition of worn spots was studied by local X-ray microanalysis. Microscratching was performed on a CNC grinding machine at a speed of 35 and 60 m/s. As an abrasive material, were used specially prepared crystals of silicon carbide green. With the increase of micro-scratching speed by a factor of 1.7 from 35 to 60 m / s, the transfer of titanium and zirconium to the wear site of silicon carbide increases by a factor of 1.6–1.9. At a microscratching speed of 35 m/s, there is no significant difference in the transfer of titanium and zirconium to the wear site of silicon carbide. With a microarray at a speed of 60 m/s, the titanium content on the wear site of a silicon carbide crystal increases by 20% compared to zirconium. The features of the formation of the relief of the wear s of a silicon carbide crystal under microarray of titanium and zirconium are shown

Keywords: titanium, zirconium, silicon carbide, microscratching speed, wear site, morphology, chemical composition, electron microscope.

Введение

Титан и цирконий относятся к числу пространственных конструкционных металлов, сплавы из которых используются в атомной энергетике, авиационной и космической технике, ракетостроении, медицине и других отраслях промышленности [1, 2]. Из сплавов на основе титана и циркония изготавливают наиболее ответственные детали, качество поверхности которых формируется на заключительных

операциях обработки [3–6]. Поэтому исследование процесса шлифования титановых и циркониевых сплавов относится к актуальным задачам современного машиностроения. В большей степени изучен процесс шлифования титановых сплавов, в меньшей степени – сплавов на основе циркония [7–10]. Одной из причин низкой стойкости абразивного инструмента при шлифовании сплавов является высокая адгезионная активность металлов [11–13].

Большинство из ранее проводимых исследований выполнены на скорости шлифования 20–35 м/с. Современные шлифовальные станки позволяют обрабатывать на скорости 60 м/с и более, что существенно увеличивает производительность процесса [14]. В связи с этим, цель данной работы заключалась в исследовании влияния скорости резания на переноса металла и морфологию площадки износа кристалла карбида кремния при микроцарапании титана и циркония.

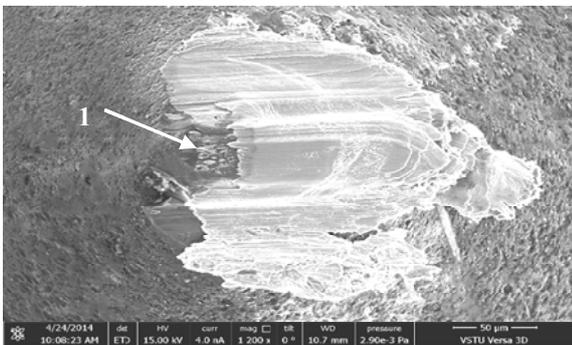
Материалы и методы исследования

В качестве абразивного материала использовали специально подготовленные кристаллы из карбида кремния, заточенные на конус с углом при вершине 120°. Микроцарапание осуществляли на прецизионном профилешлифовальном станке с ЧПУ со скоростью 35 и 60 м/с.

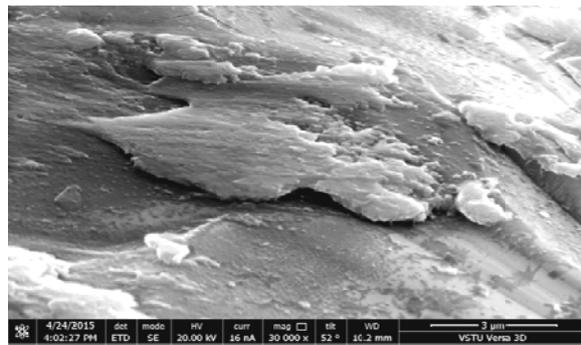
Состояние площадки износа вершины кристалла исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D. Химический состав поверхности определяли методом микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты и их обсуждение

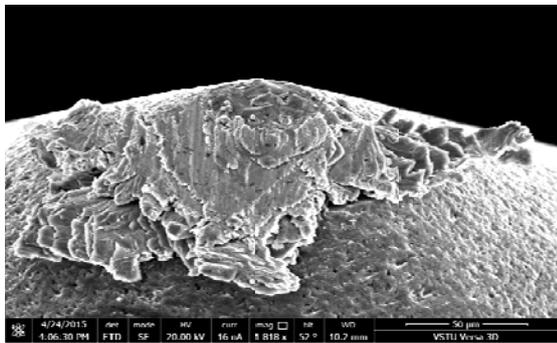
При микроцарапании титана металл интенсивно налипает на вершину кристалла (рис. 1, а). С увеличением скорости микроцарапания с 35 до 60 м/с качественных изменений в налипании металла на площадку износа карбида кремния при микроцарапании титана не наблюдается. Площадка износа имеет большое количество микросколов и выкрашиваний (рис. 1, б). Общее представление о размере налипшего металла дает рис. 1, в.



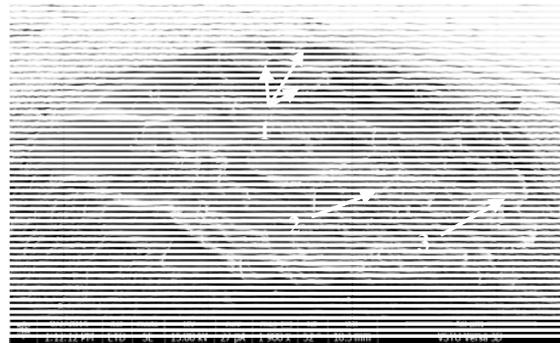
а



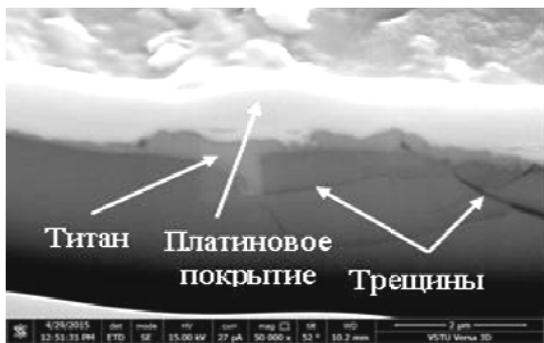
б



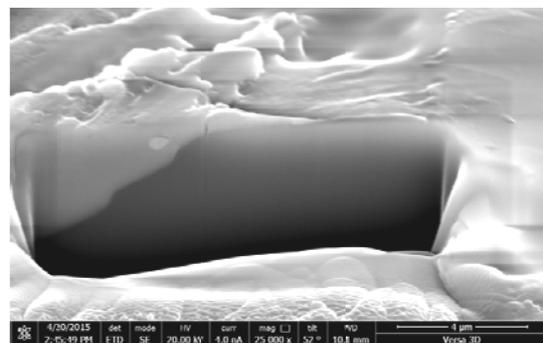
в



г



д



е

Рис. 1. Поверхность площадки износа кристалла карбида кремния после микроцарапания титана на скорости 35 м/с (а) и 60 м/с (б–е)

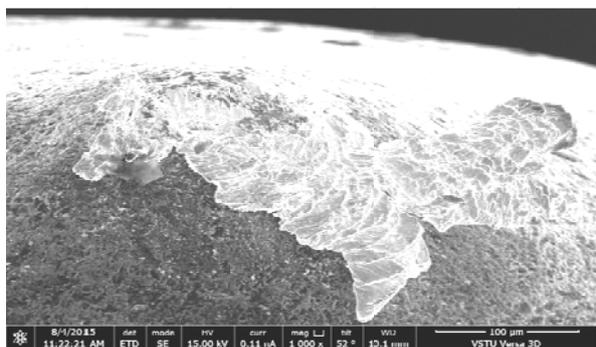
Состояние поверхности площадки износа, аналогичное рис. 1, *в*, формируется в основном при микроцарапании с глубиной не более 3–5 мкм в начальный период работы индентора или в первый период очередного обновления вершины кристалла в результате скалывания. При работе на больших глубинах, в результате преобладания изнашивания скалыванием над истиранием, большинство площадок имеют вид, представленный на рис. 1, *з*. В микросечениях, сделанных на выступающих участках площадки износа, обнаружены микротрещины (рис. 1, *ж*). Титан, налипший на площадку износа, плотно прилегает к поверхности карбида кремния (рис. 1, *з*).

Аналогом титана в подгруппе IVB является цирконий, расположенный в 5-м периоде. С увеличением главного квантового числа *d*-переходных элементов в подгруппе атомная стабильность электронных конфигураций возрастает [15]. Но микрорентгеноспектральный ана-

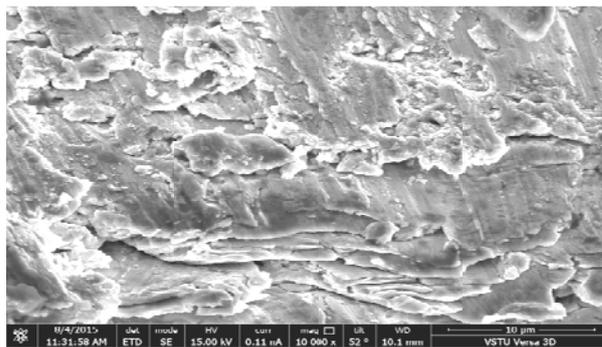
лиз поверхности площадки износа кристалла карбида кремния после микроцарапания циркония на скорости 35 м/с не показал значимого отличия в содержании титана и циркония на поверхности карбида кремния.

С увеличением скорости резания до 60 м/с на поверхности карбида кремния, как и при микроцарапании титана образуется площадка износа, покрытая налипшим металлом (рис. 2, *а*). Стружка имеет слоистое строение (рис. 2, *б*) и в направлении главного движения может достигать 300 мкм в длину. При базовом увеличении 50000 крат различимы плоскости сдвига, выходящие на поверхность стружки (рис. 2, *в*). Содержание титана с увеличением скорости возрастает почти в 1,9 раза.

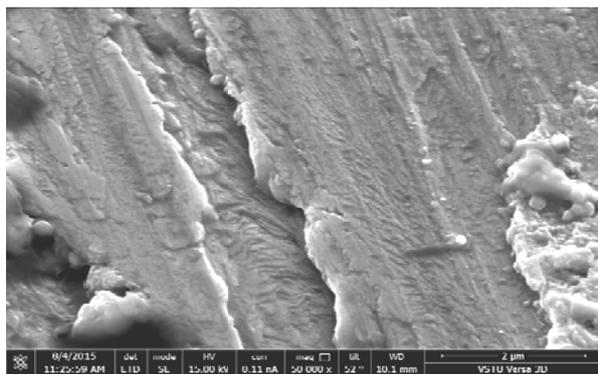
Как и при микроцарапании титана, после микроцарапания циркония площадка износа разделена на блоки толщиной около 0,6 мкм (рис. 2, *з*).



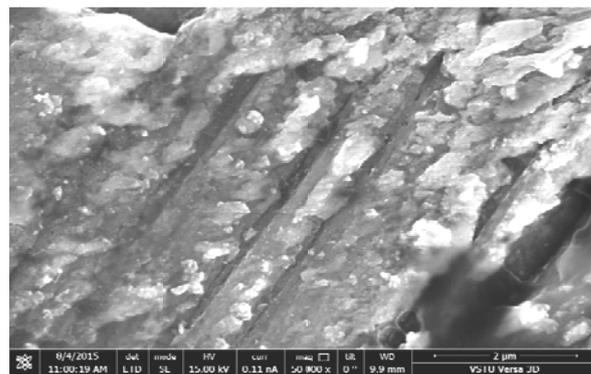
а



б



в



з

Рис. 2. Поверхность площадки износа кристалла карбида кремния после микроцарапания циркония на скорости 35 м/с (*а*) и 60 м/с (*б–з*)

С увеличением скорости микроцарапания концентрация циркония на поверхности карбида кремния возрастает в 1,6 раза. Для скорости 60 м/с установлено значимое отличие интенсивности переноса различных металлов: концентрация металла на поверхности площадки изно-

са карбида кремния при микроцарапании титана по сравнению с цирконием на 20 % выше.

Выводы

С увеличением скорости микроцарапания в 1,7 раза с 35 до 60 м/с перенос титана и цир-

кония на площадку износа карбида кремния возрастает в 1,6–1,9 раза.

При микроцарапании на скорости 60 м/с концентрация титана по сравнению с цирконием возрастает значимо. При микроцарапании на скорости 35 м/с значимого различия в переносе металлов на площадку износа карбида кремния не установлено.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каширин, В. В.* Опыт и перспективы применения титановых сплавов в инновационных разработках ОАО «ОКБ Сухого» / В. В. Каширин, А. А. Бурханова, А. А. Филатов // Титан. – 2012. – № 1 (35). – С. 42–45.
2. *Осинцев, О. Е.* Металловедение тугоплавких металлов и сплавов на их основе / О. Е. Осинцев. – М.: Машиностроение, 2013. – 156 с.
3. *Салов, П. М.* Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов / П. М. Салов, Д. П. Салов; Чебоксарский политехнический ин-т (филиал) МГОУ. – Чебоксары 2010. – 332 с.
4. *Носенко, В. А.* Технология шлифования: монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко; ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 425 с.
5. *Макаров, В. Ф.* Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов / В. Ф. Макаров. – Санкт-Петербург. – Лань, 2013. – 329 с.
6. *Кремень, З. И.* Шлифование суперабразивами высокопластичных сплавов / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев; С.-Петербургский политехнич. ун-тет Петра Великого. – С.-Петербург, 2013. – 167 с.
7. *Носенко, В. А.* Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодиче-

ской правкой круга / В. А. Носенко, В. К. Жуков, А. А. Васильев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 44–50.

8. *Носенко, В. А.* Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга / В. А. Носенко, С. В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2010. – № 11. – С. 57–61.

9. *Кремень, З. И.* Шлифование титановых сплавов шлифовальными кругами на основе эльбора и алмаза / З. И. Кремень, Д. А. Поповский, В. Г. Юрьев // Вестник машиностроения. – 2013. – № 5. – С. 66–69.

10. *Носенко, В. А.* Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования / В. А. Носенко, А. В. Авилов, С. В. Носенко // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2009. – № 7. – С. 10–26.

11. *Носенко, В. А.* Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В. А. Носенко, С. В. Носенко, А. В. Авилов, В. И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 66–71. – Режим доступа: <http://industrial-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf>.

12. *Носенко, В. А.* Совершенствование абразивного инструмента на бакелитовой связке / В. А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 3. – С. 85–90.

13. *Носенко, В. А.* Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования / В. А. Носенко, Н. Ф. Ларионов, Н. И. Егоров [и др.] // Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 17–21.

14. *Пилинский, А. В.* Инновационные методы и вызовы в скоростном и сверхскоростном шлифовании / А. В. Пилинский // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2–2. – С. 136–144.

15. *Самсонов, Г. В.* Электронная локализация в твердом теле / Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко. – М.: Наука, – 1976. – 339 с.

УДК 621.9.015

А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Ж. С. Тихонова, П. Н. Еплов, А. С. Павлов

ОБ УСЛОВИЯХ ВЫБОРА РЕЖИМА ПРОБНОГО ПРОХОДА КАК МЕТОДА ТЕСТИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СМЕННЫХ КОНТАКТНЫХ ПАР

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tihonova-ganna@rambler.ru

С позиций высокоскоростного пластического деформирования обрабатываемых сталей предложены режимы резания для предварительного пробного прохода как тестового метода получения оперативной информации о переменных теплофизических свойствах контактных пар «твердосплавный инструмент – стальная заготовка» непосредственно на станке.

Ключевые слова: точность расчета, упрочнение сталей, степень деформации, скорость деформации, термоЭДС.

A. L. Plotnikov, A. S. Sergeev, Zh. S. Tikhonova, P. E. Eplov, A. S. Pavlov

ABOUT CONDITIONS OF THE CHOICE OF THE MODE OF TRIAL PASS AS METHOD OF TESTING OF PROPERTIES OF REPLACEABLE CONTACT COUPLES

Volgograd State Technical University

From the positions of high-speed plastic deformation processed by staly the cutting modes for preliminary trial pass as test method of obtaining operational information about variable heatphysical properties of contact couples "the hard-alloy tool – steel preparation" directly on the machine are offered.

Keywords: the accuracy of the calculation, hardening of steels, the degree of deformation, speed of deformation, the thermoEMF.

Одним из перспективных направлений в создании новых поколений систем ЧПУ для токарных станков является наделяние их «технологическим интеллектом», т. е. способностью решать технологические задачи управления. Современные системы ЧПУ «научены» решать сложные геометрические задачи управления (формообразования поверхности), но они пока не имеют программного обеспечения в решении технологических задач.

Проблема заключается в неадекватности математических моделей параметров процесса резания, которые составляют основу их алгоритмов расчета программным (автоматизированным) путем.

В работе [1] на основе проведенного анализа технической литературы, справочно-нормативных источников и проведенных экспериментальных исследований, установлено, что причиной значительного несовпадения расчетных и фактических значений величин скорости резания, составляющих силы резания и величины параметра шероховатости при проектировании технологического процесса токарной обработки углеродистых, конструкционных, коррозионноустойчивых сталей является одно общее обстоятельство. Это вероятностный характер образования контактных пар «твердосплавный инструмент – стальная заготовка» и отсутствие в расчетных математических моделях оперативного учета их теплофизических свойств, ориентация расчетных моделей на среднее значение этих свойств из всего допускаемого диапазона разброса.

Названные выше причины несовпадения расчетных и действительных параметров процесса резания можно устранить получением предварительной оперативной информации об их свойствах непосредственно из зоны резания. Для этого предлагается данные о теплофизических свойствах контактируемых пар и условиях резания получать предварительно при осуществлении пробного прохода на строго определенных режимах обработки, измеряя при этом величину генерируемой термоЭДС естественной термопары, которая в силу физической природы возникновения термоэлектрических явлений при резании, косвенно характеризует эти свойства [2].

Здесь важную роль играет выбор режимов резания пробного прохода. Условия режима пробного прохода должны иметь однозначную связь с условиями упрочнения сталей в приме-

няемых диапазонах рабочих режимов для получения и чистового точения и обеспечить возможность точного измерения термоЭДС. Что это за условия? Как известно, углеродистые и легированные стали упрочняются по-разному в процессе высокоскоростного пластического деформирования [3]. Существует уровень скоростей деформации, после которого деформационное упрочнение прекращается, и наступает температурное разупрочнение. По Р. Ф. Рехту [4] это «критические скорости деформации», которые он предложил определять выражением:

$$\dot{\varepsilon}_{кр} = 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot C_T \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y) \cdot \frac{\partial \tau / \partial \varepsilon}{\partial \tau / \partial \theta} \cdot \frac{K_n^2}{\tau_y^2 \cdot L^2}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность стали; ρ – плотность; C_T – удельная теплоемкость; ε_y и ε – соответственно первоначальная и конечная деформация сдвига; K_n – механический эквивалент теплоты; L – размер области деформации; τ_y – первоначальный предел текучести на сдвиг; $\frac{\partial \tau}{\partial \varepsilon}$, $\frac{\partial \tau}{\partial \theta}$ – частные производные (определяются экспериментально).

Для углеродистых сталей Рехтом [4] определены критические скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{кр} = 10^3 \dots 10^4$ 1/с. Из уравнения (1) следует, что сталям, обладающим высокой теплопроводностью, соответствуют более высокие критические скорости деформации. Из углеродистых сталей высокую теплопроводностью имеет сталь 20. У остальных по мере увеличения содержания углерода теплопроводность снижается. Легированные стали имеют пониженную теплопроводность. Важно, чтобы режим пробного прохода обеспечил наличие критической скорости деформации у всей гаммы обрабатываемых сталей. При осуществлении процесса резания на величину критической скорости деформации сталей будет оказывать теплопроводность режущего инструмента. Это влияние проявляется через размер зоны стружкообразования – участок упрочнения стали C_2 [3].

В таблице представлены результаты измерения и расчета контактных характеристик процесса резания стали 20 твердым сплавом Т15К6 и ВК8. Расчет средней скорости деформации в зоне стружкообразования производился по уравнению:

$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{V_{рез} \cdot [\cos \beta + (\sin \beta - \gamma) \cdot \operatorname{tg} \beta]}{C_2}. \quad (2)$$

Уравнение выведено аналитическим путем исходя из кинематических закономерностей процесса стружкообразования [4]. Расчет скорости деформации в зоне контактных пластических деформаций на конце участка упрочнения C_2 производился по формуле:

$$\dot{\epsilon}_k = \frac{V_{рез} \cdot \operatorname{tg}\beta}{h_k}, \quad (3)$$

где $V_{рез}$ – скорость резания, м/с; h_k – высота зоны контактных пластических деформаций на

конце участка упрочнения, равная 0,1 толщины стружки a_c .

Следует отметить, что величины $\dot{\epsilon}_k$ в таблице для участков упрочнения, полученные расчетным путем, не являются конечными. Скорость деформации на участке пластического контакта по мере движения деформируемого объема металла возрастает, так как снижается высота зоны h_k . В конце пластического контакта h_k принимает значения 1–2 мкм, $\dot{\epsilon}_k$ достигает значения 10^5 – 10^6 1/с.

Контактные характеристики пары сталь 20 – Т15К6 (а) и пары сталь 20 – ВК8 (б)

Скорость резания V , м/мин (м/с)	Участок C_2 , мм	Усадка стружки ξ	Толщина стружки a_c , мм	Угол сдвига β , град.	ТермоЭДС пробного прохода E , мВ	Скорость деформации $\dot{\epsilon}_c$, 1/с в зоне стружкообразования	Скорость деформации $\dot{\epsilon}_k$, 1/с в зоне контактных пластических деформаций
<i>а</i> – сталь 20 – Т15К6 ($S=0,3$ мм/об; $t=2$ мм; $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $\lambda=0^\circ$)							
60 (1)	0,27	3,84	0,9	15	6,0	$5,17 \cdot 10^3$	$2,96 \cdot 10^3$
90 (1,5)	0,14	3,56	0,75	15,7	8,6	$1,11 \cdot 10^3$	$5,62 \cdot 10^3$
110 (1,83)	0,12	3,15	0,69	17,6	9,2	$1,59 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^3$
130 (2,1)	0,12	3,10	0,67	17,8	10,3	$1,82 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^4$
150 (2,5)	0,12	2,94	0,65	18,7	10,5	$2,25 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$
<i>б</i> – сталь 20 – ВК8 ($S=0,3$ мм/об; $t=2$ мм; $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $\lambda=0^\circ$)							
60 (1)	нет	3,94	–	–	4,2	–	–
75 (1,25)	нет	3,86	0,27	14,5	6,2	–	–
90 (1,5)	0,13	3,72	0,26	15,0	8,8	$7,95 \cdot 10^3$	$1,54 \cdot 10^4$
105 (1,75)	0,12	3,51	0,26	15,9	10,6	$8,6 \cdot 10^3$	$1,91 \cdot 10^4$
120 (2,0)	0,12	3,33	0,25	16,7	11,6	$8,7 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$
135 (2,25)	0,09	3,27	0,25	17,0	12,0	$1,16 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$
150 (2,5)	0,07	3,18	0,24	17,4	12,6	$1,49 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$

Расчет величины сопротивления пластическому деформированию в зоне стружкообразования и в зоне контактных пластических деформаций производился по значению микротвердости, измеренной на корнях стружки [3].

Результаты расчета скорости деформации (таблица, поз. *а*, *б*) показывают, что для исследуемых условий резания нижний предел критической скорости деформации для пары сталь 20 – Т15К6 начинается со скоростей резания 60 м/мин (таблица, поз. *а*). При скорости резания 90 м/мин скорости деформации достигают 10^4 1/с. (таблица, поз. *а*). Отсюда следует заключение, что уровень скорости резания пробного прохода как предварительного теста на упрочняемость сталей должен с гарантией обеспечивать критические скорости деформации.

В таблице, поз. *б* представлены результаты измерения и расчета контактных характеристик пары сталь 20 – ВК8. Эта пара составлена из материалов, имеющих наибольший коэффициент теплопроводности (сталь 20 – $\lambda=52$ Вт/м·°С; ВК8 – $\lambda=52$ Вт/м·°С). Если при этих теплофизических характеристиках пары скоростной диапазон 60–130 м/мин (1–2,1 м/с) обеспечит наличие критических скоростей деформации, то он обеспечит их и для других контактных пар, составленных из широко применяемых в машиностроении марок сталей и твердых сплавов. Это заключение основывается на том, что обрабатываемые стали, имеющие высокую теплопроводность, имеют увеличенный участок упрочнения C_2 и увеличенную высоту (объем) зоны контактных пластических деформаций h_k ,

что экспериментально подтверждено в работе [3]. При постоянной скорости резания пробного прохода эти контактные характеристики, согласно формулам (2) и (3) определяют скорости деформации $\dot{\epsilon}_c$ и $\dot{\epsilon}_k$. Для углеродистых сталей по мере увеличения содержания углерода уменьшается теплопроводность. Как отмечено выше, у легированных сталей теплопроводность меньше, чем у стали 20. Из всей гаммы твердосплавных инструментов, применяемых для обработки сталей, сплавы группы ВК обладают самой высокой теплопроводностью, что так же способствует увеличению C_2 и h_k .

По результатам экспериментальных замеров контактных характеристик пары сталь 20 – ВК8 и расчетным значениям скоростей деформации (таблица, поз. б) можно заключить, что критические скорости деформации стали 20 при обработке сплавом ВК8 в условиях пробного прохода ($S=0,1$ мм/об, $t=1$ мм) обеспечиваются начиная со скорости 90 м/мин. При скоростях выше 90 м/мин гарантировано наступление критических скоростей деформации.

Из формулы (2) следует, что из геометрии инструмента на величину скорости деформации влияет только передний угол γ . Учитывается ли изменение переднего угла γ величиной термоЭДС пробного прохода? Однозначна ли связь термоЭДС с условиями деформирования срезаемых объемов стали в диапазоне скоростей резания выше 90 м/мин? В работе [3] показано, что скорость деформации $\dot{\epsilon}_c$ и $\dot{\epsilon}_k$ в диапазоне изменения скорости резания 90–120 м/мин и переднего угла γ от -10° до $+10^\circ$ изменяется от 10^3 до 10^4 1/с, что соответствует критическим скоростям деформации сталей. В работе [5] экспериментально показано, что величина термоЭДС пробного прохода линейно связана с изменением переднего угла γ .

Условия пробного прохода являются своеобразным тестированием для контактной пары обрабатываемая деталь – твердый сплав. Результаты этого тестирования представляют более полную и точную информацию по сравнению с данными справочных источников о свойствах стали и твердого сплава. На основе приведенных расчетных и экспериментальных данных о влиянии скорости резания на характеристики упрочняемости сталей для условий пробного прохода предлагается скорость реза-

ния равная 100 м/мин. Глубина принимается равной одному миллиметру из соображений минимального припуска под чистовую (получистовую) обработку. Подача принимается равной 0,1 мм/об. Время резания при пробном проходе 4–5 секунд.

При обработке сталей твердосплавным инструментом в принятых режимах пробного прохода по передней поверхности инструмента (резца) в пределах пластического контакта устанавливается устойчивая адгезионная связь, что обеспечивает надежное измерение величины термоЭДС естественной термопары. На более низких скоростях резания, например, резание с наростообразованием, сигнал термоЭДС неустойчивый, со значительными колебаниями амплитуды.

Выводы

На основании результатов исследования информативной ценности сигнала термоЭДС естественной термопары, предложено ее величину, измеренную в обоснованном режиме предварительного пробного прохода при $V = 100$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об, $t = 1$ мм использовать в математических зависимостях для более точного (автоматизированного) определения параметров процесса резания самой системой ЧПУ. Примеры скорректированных зависимостей приведены в работе [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Плотников, А. Л. Использование информативной способности сигнала естественной термопары для обеспечения надежности автоматизированного определения режимов лезвийной обработки / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Н. Г. Зайцева // Научное обеспечение технологий в машиностроении. – 2013. – № 5. – С. 35–40.
3. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
4. Рехт, Р. Ф. Разрушающий термопластический сдвиг / Р. Ф. Рехт // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. Е. Прикладная механика. – Т. 31. – № 2, 1964. – С. 34–39.
5. Плотников, А. Л. Повышение надежности управления шероховатостью обработанной поверхности деталей в САПР ТП токарных и фрезерных операций : монография / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Н. Г. Зайцева ; науч. ред. А. П. Бабичев ; ВолгГТУ, ЗАО «ОНИКС». – Волгоград ; Ирибт ; Тольятти : ЗАО «ОНИКС», 2015. – 162 с.

УДК 621.762.4.044

*М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров, Н. Ю. Ветлицын, Т. А. Горбунова***ФОРМИРОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКОМПОНЕНТНОГО
АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕГО СПЕКАНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: MUPolyan4ikova@ya.ru

В статье рассмотрены вопросы определения упругих характеристик однокомпонентного абразивного инструмента после спекания, использована методика определения модуля нормальной упругости и пористости на основе теоретико-экспериментальных данных, приведены графики зависимостей модуля упругости от пористости при различных режимах спекания и экспериментальные формулы, отражающие эти зависимости.

Ключевые слова: спекание, диффузия, плотность, пористость, модуль нормальной упругости, окись алюминия, карбид бора.

*М. Yu. Polyanchikova, Yu. N. Polyanchikov, N. I. Egorov, N. Yu. Veltitsyn, T. A. Gorbunova***FORMATION OF A SINGLE-COMPONENT ABRASIVE TOOL
ELASTIC CHARACTERISTICS AS A RESULT OF ITS SINTERING****Volgograd State Technical University**

In article questions of determining the elastic characteristics of a one-component abrasive tool after sintering are considered, the technique for determining the modulus of normal elasticity and porosity on the basis of theoretical and experimental data is used, the plots of the modulus of elasticity versus porosity under reasonable sintering conditions and experimental formulas reflecting these dependences are given.

Keywords: sintering, diffusion, density, porosity, modulus of normal elasticity, alumina, boron carbide.

Создание однокомпонентного абразивного инструмента (ОКАИ) по способу, описанному в патенте [1], заключается в том, что готовят абразивную формовочную смесь включающую 90 % зерен окиси алюминия Al_2O_3 и 10 % карбида бора B_4C , причем зерна окиси алюминия, как основной фракции, берутся большего размера, нежели размеры зерен карбида бора. После ударно-волнового нагружения исследуемой смеси абразивных порошков производится окончательный этап получения ОКАИ – термическая обработка при высокой температуре в электровакуумной печи – спекание.

Как технологическая операция – спекание имеет вполне однозначное и четкое назначение – придание спекаемым телам определенной структуры и соответствующих ей механических, физических и физико-химических свойств [7].

В своей теории самодиффузии пионер спекания Френкель Я. И. [8] рассматривал начальный этап спекания как слияние капель, при котором промежутки между частицами заплывают настолько, что оставшиеся поры оказываются разобщенными. Последующий этап спекания сводится к закрытию (т. е. к вязкому заплыванию) остаточных пор.

Существующие гипотезы соединения материалов в твердой фазе можно разбить на две

группы: первая объясняет образование соединения разнородных материалов за счет схватывания как следствие межатомных сил взаимодействия. Схватывание – процесс бездиффузионный, после него возможны диффузионные процессы. Если при соединении в зоне контакта образуются ювенильные поверхности, то их активности достаточно, чтобы произошло схватывание [2].

При исследовании процесса спекания обычно рассматривают действие следующих механизмов: а) без переноса материала (путем сцепления); б) с переносом материала путем перемещения элементов решетки (поверхностная и объемная диффузия по дефектам, через решетку и по границам зерен, испарение и конденсация) или перемещение всей решетки (пластическое течение, скольжение по границам зерен); в) с переносом материала в пределах межатомных расстояний (возврат и рекристаллизация).

Вследствие пластической деформации при прессовании порошков поверхности контактирующих зерен достаточно сближаются, поверхностные пленки многократно разрываются и их изолирующее действие в значительной степени устраняется. Таким образом, главным становится геометрический фактор сближения; процессы же атомного перемещения, нуждающие

сы в термической активации, играют незначительную роль.

Спекание – это кинематический процесс освобождения порошковой системы от неравномерных микродефектов. Важнейшие молекулярно-кинетические процессы для спекания следующие: химические реакции на поверхностях и границах раздела, термически активируемые дислокационные процессы, поверхностная и объемная самодиффузия.

Спекание – реологический процесс, т. е. макроскопический процесс объемной деформации пористого тела, осуществляемый путем течения веществ в твердой фазе. В реологических уравнениях состояния выявляются между напряжением, деформациями и их производными по времени. Следовательно, в общем случае должно быть два уравнения: для выражения объемной деформации и деформации формоизменения.

Исследованиями Андриевского Р. А. [9] также доказано, что при спекании порошков окиси алюминия преобладающим является механизм самодиффузии. На начальной стадии спекания определяющим является рост зон контакта, на более поздней стадии формируется замкнутая пористость.

Кучинский Г. С. распространил теорию объемной диффузии на поздние стадии спекания. В своей работе [10] он рассмотрел влияние границ зерен на процесс спекания, особенно на конечной стадии исчезновения пор. При этом он оценивает скорость исчезновения пор из поликристаллического спеченного тела, опираясь на два механизма: только диффузии по границам зерен и объемной диффузии вакансий (по достижении границ зерен вакансии выводятся из тела на ее поверхности). Лимитирующим звеном здесь является объемная диффузия как наиболее медленная.

Поверхностной диффузии как способу переноса в однокомпонентных системах в последнее время придается гораздо большее значение, хотя только ею и нельзя объяснить заметную усадку. При спекании в области низких температур предполагается наибольшая эффективность процессов поверхностной самодиффузии. При этом образуются относительно стабильные состояния с большой поверхностью контакта между частицами. При последующем нагреве до более высоких температур гораздо менее вероятно, что вследствие начавшей действовать объемной диффузии элементам решетки удастся перейти из глубины в энергетически более выгодные положения и закрепиться там, чем в том случае, когда

объемная диффузия все время доминирует. Таким образом, продолжительное пребывание при низких и средних температурах спекания нежелательно, если стремиться к возможно более высокой плотности [2].

Хотя процесс спекания в целом на всех стадиях связан с уменьшением удельной поверхности, имеются четыре, по крайней мере, частично независимых процесса: а) уплотнение; б) сглаживание (округление) внутренних поверхностей; в) завершение смыкания пор; г) изменения, связанные с возникновением меньшего количества более крупных пор и исчезновением замкнутой пористости.

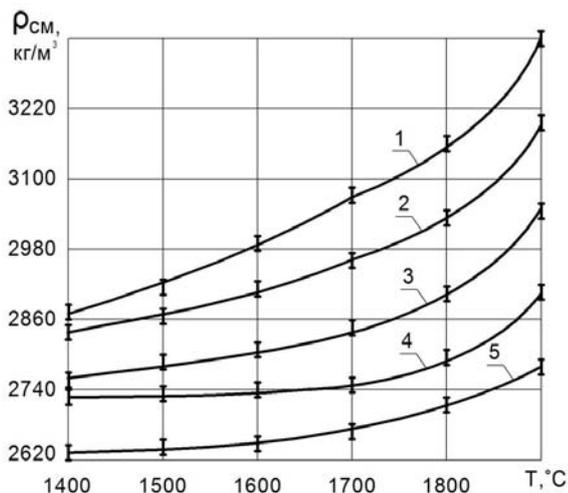
Возможные механизмы переноса вещества в этих четырех процессах:

а) уплотнение может происходить только благодаря пластическому течению; б) сглаживание (округление) внутренних поверхностей пор; в) перемещение; г) объемная диффузия или пластическое течение.

Скорость уплотнения при спекании зависит от размера пор – тела с крупными порами уплотняются намного медленнее, чем с мелкими. Плотность мелкозернистых брикетов, прессуемых при более высоком давлении, всегда более высокая. Известно, что ударно-волновое пресование абразивных порошков способствует росту дефектов кристаллической решетки, увеличению плотности дислокаций. Это оказывает положительное влияние на процесс спекания заготовок, улучшает физико-механические свойства спеченных изделий.

Не вызывает сомнений, что основным механизмом, с помощью которого осуществляется спекание в твердой фазе, является объемная диффузия. Спекание как завершающая стадия компактирования представляет собой процесс, в котором формируются свойства материала, определяемые его структурой. С точки зрения структурообразования, спеканию присущи: уплотнение и рост прочности пористой заготовки; рекристаллизация и изменение распределения зерен по размерам на фоне общего уменьшения их количества и объема.

В статье представлены результаты исследования по влиянию температуры спекания на плотность, пористость и модуль нормальной упругости инструмента ОКАИ, полученного из смеси абразивных порошков по патенту [1]. Спекание производится при температурах в диапазоне 1400–1900 °С, длительность изотермической выдержки во всех экспериментах была одинаковой – 2 часа.



Зависимости для исходного размера Al_2O_3 :
 1 – 100 мкм; 2 – 200 мкм; 3 – 320 мкм; 4 – 400 мкм; 5 – 500 мкм

Рис. 1. Влияние температуры спекания ($T, ^\circ C$) на плотность инструмента ОКАИ, полученного из абразивной смеси (90 % Al_2O_3 + 10% V_4C [1])

На рис. 1 представлены кривые зависимости плотности инструмента ОКАИ. Спекали образцы после ударно-волнового нагружения. В пояснении к рис. 1 даны размеры исходной фракции зерен Al_2O_3 . По данным рис. 1 получены

$$\begin{aligned} \text{размер зерен } Al_2O_3 - 100 \text{ мкм: } \rho &= 46,1 \cdot T^{0,564} & (1) \\ \text{размер зерен } Al_2O_3 - 200 \text{ мкм: } \rho &= 180,8 \cdot T^{0,376} & (2) \\ \text{размер зерен } Al_2O_3 - 320 \text{ мкм: } \rho &= 217,4 \cdot T^{0,346} & (3) \\ \text{размер зерен } Al_2O_3 - 400 \text{ мкм: } \rho &= 547,6 \cdot T^{0,218} & (4) \\ \text{размер зерен } Al_2O_3 - 500 \text{ мкм: } \rho &= 716,6 \cdot T^{0,18} & (5) \end{aligned}$$

Увеличение плотности пористого абразивного тела с увеличением температуры спекания можно объяснить тем, что после прессования ударной волной исследуемой абразивной смеси, исходные размеры порошков Al_2O_3 и V_4C значительно уменьшаются, о чем свидетельствуют зависимости приведенные в [2] для Al_2O_3 :

$$N = 0,05 \cdot P_{ув}^{-0,8} \cdot N_{исх}^{1,8}, \quad (6)$$

для V_4C :

$$N = 0,024 \cdot P_{ув}^{-1,43} \cdot N_{исх}^{2,17}, \quad (7)$$

где N – размер зерна после ударного прессования, мкм; $P_{ув}$ – давление во фронте ударной волны при прессовании, ГПа; $N_{исх}$ – размер исходного зерна перед прессованием, мкм.

Поскольку твердость порошков карбида бора выше твердости порошков электрокорунда белого, то во время ударного прессования происходит дополнительное дробление зерен Al_2O_3 .

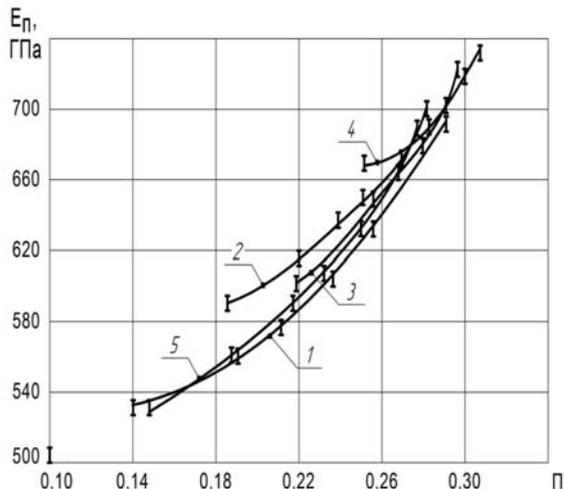


Рис. 2. Графики зависимости модуля нормальной упругости (E_n) от пористости (Π) после спекания

экспериментальные зависимости плотности (ρ) от температуры спекания для различных исходных размеров зерен Al_2O_3 .

Полученные с использованием [3] зависимости имеют следующий вид:

В результате спекания V_4C выгорает уже при температуре 700–800 °C [4], оставляя в абразивном теле мелкие поры, которые с повышением температуры спекания «залечиваются», закрываются.

В результате пористое тело местами становится сплошным.

Следующим этапом исследований является определение пористости спеченных абразивных тел. Эту величину определяем по зависимости [5]:

$$\Pi = \frac{\rho_{ч.в.} - \rho_{п.т.}}{\rho_{ч.в.}}, \quad (8)$$

где $\rho_{ч.в.}$ – плотность чистого вещества Al_2O_3 , кг/м³; $\rho_{ч.в.} = 3900 \frac{кг}{м^3}$ [4]; $\rho_{п.т.}$ – плотность пористого тела, кг/м³.

По формуле, представленной в [6], можно определить значение модуля нормальной упругости по значениям пористости:

$$\frac{E}{E_n} = 1 - \frac{15(1-\mu)\cdot\Pi}{(7-5\mu)+2(4-5\mu)\cdot\Pi} \quad (9)$$

где E_{Π} – модуль нормальной упругости пористого тела, ГПа; Π – пористость; E – модуль нормальной упругости чистого вещества, ГПа; μ – коэффициент Пуассона ($\mu=0,23$).

В результате проведенных исследований были получены следующие зависимости модуля нормальной упругости от величины пористости для различных исходных размеров Al_2O_3 :

$$\text{для размера зерен } Al_2O_3 \text{ 100 мкм: } E_{\Pi} = 1166 \cdot \Pi^{0,412} \quad (10)$$

$$\text{для размера зерен } Al_2O_3 \text{ 200 мкм: } E_{\Pi} = 1256 \cdot \Pi^{0,462} \quad (11)$$

$$\text{для размера зерен } Al_2O_3 \text{ 320 мкм: } E_{\Pi} = 1383 \cdot \Pi^{0,534} \quad (12)$$

$$\text{для размера зерен } Al_2O_3 \text{ 400 мкм: } E_{\Pi} = 1465 \cdot \Pi^{0,577} \quad (13)$$

$$\text{для размера зерен } Al_2O_3 \text{ 500 мкм: } E_{\Pi} = 1164 \cdot \Pi^{0,41} \quad (14)$$

На рис. 2 представлены графические зависимости модуля нормальной упругости от пористости при различных исходных размерах зерен Al_2O_3 .

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Формирование пористого абразивного тела при спекании приводит к зарастанию очень мелких пор и образованию большого количества мостиков связи между абразивными зёрнами Al_2O_3 , что способствует повышению упругих свойств пористого тела и, соответственно его характеристики – модуля нормальной упругости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ПАТЕНТ РФ 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. Оpubл. 10.02.2007 г., Бюлл. № 4.
2. Полянчикова, М. Ю. Повышение качества однокомпонентных абразивных и алмазных инструментов, полученных ударно-волновым прессованием : монография /

М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 228 с.

3. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1982. – 224 с.

4. 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.

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 – 6с.

6. Hashin Z. Relations Between Young's modulus and temperature. – J. Appl. Mech., 1962, 29. p. 143-147.

7. Физико-металлургические основы спекания порошков / В. В. Скороход, С. М. Солонин. – М. : Metallurgia, 1984. – 159 с.

8. Гегузин, Я. Е. Физика спекания / Я. Е. Гегузин. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 312 с.

9. Андриевский, Р. А. Фазы внедрения / Р. А. Андриевский, Я. С. Уманский. – М. : Наука, 1977. – 240 с.

10. Kuczynski G. - Phys. of Sintering, 1973. V.5, №2/2, p.41-50.

УДК 621.82

В. А. Санинский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова, С. В. Бурлаков **СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПОДШИПНИКОВ** **КАЧЕНИЯ ВЗАИМНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ** **КОМПЛЕКТУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: saninv@yandex.ru

Предложен способ подбора поверхностей контакта тел качения и дорожек многорядных бессепараторных подшипников с эквидистантным расположением поверхностей контакта. Повышение относительной геометрической точности достигается селективной сборкой с добавлением ключевого замыкающего элемента, размеры которого выявляются контралибром.

Ключевые слова: подшипники качения, бессепараторные подшипники, селективная сборка.

V. A. Saninsky, K. V. Khudyakov, E. N. Smirnova, S. V. Burlakov

METHOD FOR INCREASING THE ACCURACY OF THE **ASSEMBLY OF ROLLING BEARINGS BY TOLERANCE** **COMPENSATION OF COMPONENT PARTS**

Volgograd State Technical University

A method for the selection of contact surfaces of rolling elements and tracks multi-row full complement bearings with equidistant arrangement of the contact surfaces. Increasing the relative geometric accuracy is achieved with selective assembly by addition of the locking element, the dimensions of which are identified with calibration roller.

Keywords: roller bearing, non-separator bearing, selective assembly.

Традиционный способ сборки подшипников качения основан на селективной групповой сборке тел качения, главным недостатком которой является неизбежность возникновения «незавершенного» производства [1].

Для повышения точности сборки применяют равномерное распределение тел качения, например, в сепараторных и бессепараторных подшипниках [2, 3] и виртуальные способы сборки [4].

Такие способы ограничены функциональными возможностями в обеспечении точности радиальных зазоров соосных подшипников скольжения, поскольку не учитывают действительные погрешности формы деталей и характеризуются невозможностью регулировать величины зазоров в пределах 4–8 мкм, достаточных для обеспечения смазки.

В предлагаемом способе [2, 3] и в бессепараторных подшипниках [5–10] величины зазоров S определяются по измеренным отклонениям формы каждого тела качения (рис. 1).

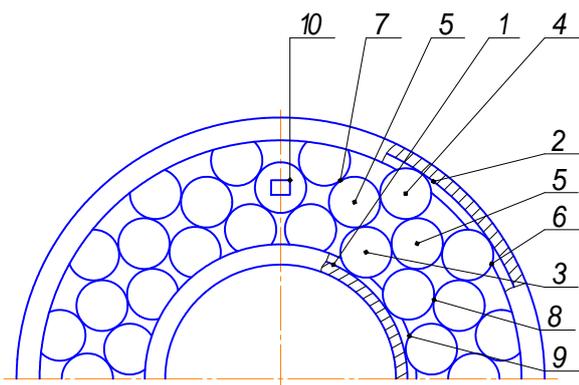


Рис. 1. Положение контракалибра в «трехслойном» бессепараторном подшипнике:

1 – дорожка качения на внутреннем кольце; 2 – дорожка качения на наружном кольце; 3 – тела качения, контактирующие с внутренним кольцом; 4 – тела качения, контактирующие с наружным кольцом; 5 – тела качения среднего ряда, контактирующие с телами качения 4 и дорожкой 2 наружного кольца; 6 – проекция внешней линии контакта между телами качения 4 и дорожкой 2 наружного кольца; 7 – проекция внешней линии контакта между телами качения; 8 – проекция внутренней линии контакта между телами качения; 9 – проекция линии контакта тел качения 3 с дорожкой 1 внутреннего кольца; 10 – контракалибр

Для повышения точности сборки у тел качения определяют форму их погрешностей в продольном направлении. Для этого измеряют погрешности их диаметров в нескольких точках так, чтобы можно было определить их принадлежности к стандартным отклонениям форм «конусность», «седлообразность», «бочкообразность» и осуществить после этого их сборку таким образом, чтобы погрешность одной формы компенсировалась погрешностью

другой формы или эквидистантным расположением образующих перечисленных поверхностей (рис. 2).

В дальнейшем сборка подшипника осуществляется с установкой тел качения между собой и между дорожками так, что одни погрешности формы компенсируются другими идентичными погрешностями по линии контакта поверхностей [5–10]. При этом зазоры между этими поверхностями контакта регулируются отсчетом величины суммарного зазора от общей длины линий контакта тел качения, проходящей по точкам их соприкосновения между собой и с дорожками колец от положения беззазорного гарантированного соприкосновения всех пар трения-качения. Приемы отсчета величины суммарного зазора в этом случае включают принудительное введение в суммарный зазор, $S = 0,5d$ [11]. Этот зазор образуется после извлечения одного из тел качения и введения между роликами без зазора тарированного измерительного контракалибра, т. е. в положении, при котором его вставляют между роликами так, что выбираются все зазоры по линиям контакта всех тел качения и дорожек. Далее контракалибр извлекают частично до некоторой метки на нем, означающей величину достаточного суммарного зазора $S=0,5d$ [2, 10].

Вычисление единичного зазора между i -й и j -й парами трения-качения производится делением суммарного зазора $\sum S$ на число n точек контакта пар трения-качения по линии их соприкосновения.

$$S_{i-j} = \sum S / n;$$

где i и j – номер пары контактирующих поверхностей 1...12 и 1'... 12' по рис. 1.

Результатом таких приемов сборки является действительный учет погрешностей формы в продольном направлении всех тел качения, в том числе на уровнях геометрической точности А, В и С, ГОСТ 24643 (таблица). Предлагаемый способ регулирования зазоров между телами качения можно пояснить с помощью его вида (рис. 1) и схем расположения полей допусков тел качения, показанных на рис. 2.

Поскольку задачей предложенного технического решения является повышение точности контакта тел качения за счет укладки их с получением эквидистантных линий контакта, например, стандартных форм погрешностей «бочкообразность» – «седлообразность» и, на этой основе, снижения времени и размеров из-

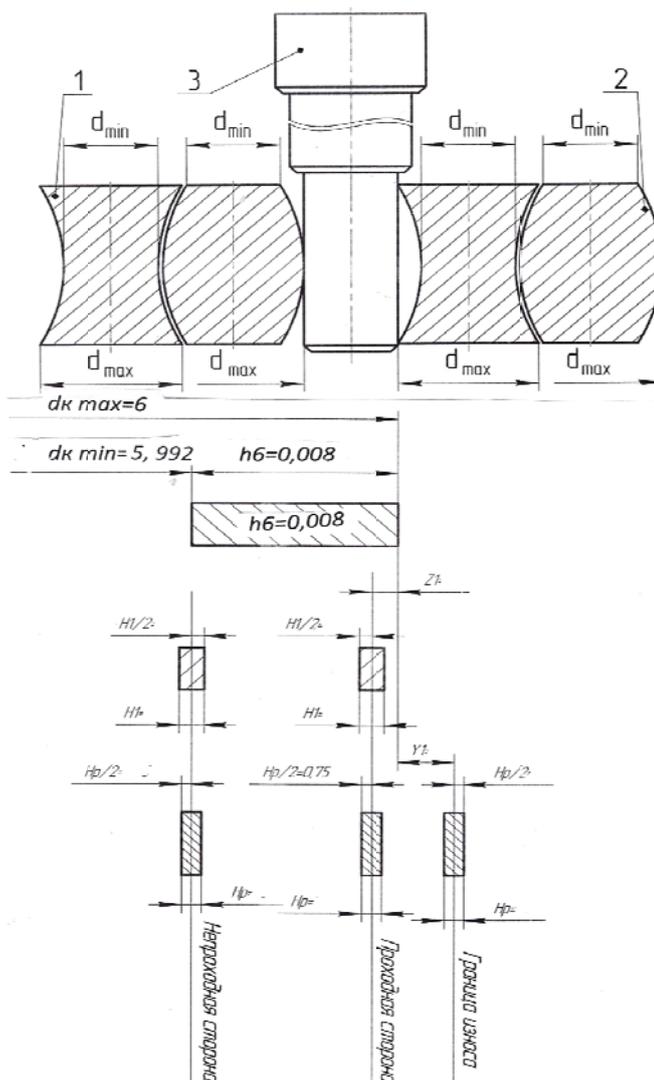


Рис. 2. Схема определения суммарного зазора S проходным предельным калибром при его беззазорном положении:

1 – ролик с погрешностью формы в продольном направлении «седлообразность»;
2 – ролик с погрешностью формы «бочкообразность»; 3 – ступенчатый конусный калибр

менения форм по длине роликов и величин диаметров в процессе приработки тел качения и дорожек. Одновременно достигается уменьшение люфта между этими телами и в сборочном узле, в котором применяется подшипник. Это достигается тем, что перед выполнением сборки наружного и внутреннего колец и тел качения подшипника между любыми (не менее трех) парами основных тел качения, контактирующим при этом между собой и с дорожками наружного и внутреннего колец подшипника измеряют общий действительный суммарный зазор, исключая диаметр одного из тел качения, вместо которого помещают конусный тарированный конусный калибр. После этого определяют суммарную величину минимального масляного слоя между контактирующими парами тел качения на длине линии соприкосновения,

занимаемой телами качения между наружным и внутренним кольцами. Для этого отмечают по делениям вставленного вместо одного из недостающих тел качения конусного калибра положение его при выбранных зазорах и выдвигают его до нужного положения, чем и определяют по соответствующим делениям требуемую величину расчетного замыкающего звена зазора. Затем конусный тарированный конусный калибр извлекают из собранного подшипника и вместо него вставляют замыкающее недостающее тело качения, диаметр которого определяют по рассчитанным делениям конусного конусного калибра так, чтобы между всеми телами качения и дорожками оставался заданный суммарный зазор, при этом конусный калибр и тарирован на группы диаметров, отличающихся между собой на величину группового зазора.

Экономическая точность механической обработки

Квалитет	Степень точности при $L \leq 2d$				Шероховатость поверхности Ra , мкм	Метод числовой обработки
	Относительная геометрическая точность	Формы цилиндрической поверхности	Формы плоской поверхности	Радиального и торцового биения		
5	A	4	5	4	0,2–0,4	Доводка
	B	3	4	3	0,1–0,2	Суперфиниш
	C	(2)	(3)		0,05–0,1	Хонингование

На рис. 1 показан вид сбоку беспараторного подшипника, показывающий точки контакта комплектующих деталей и их расположения в одной плоскости.

На рис. 2 – вид эквидистантных линий, образованных при контакте тел качения, предварительно измеренных и отобранных для сборки в одном подшипнике и уложенными по принципу чередования поверхностей с погрешностями «седлообразность» – «бочкообразность».

После отбора таких роликов сборку выполнили таким образом, что погрешность одной формы компенсирует погрешностью этой же формы с эквидистантным расположением криволинейных образующих перечисленных поверхностей. Т. е. таким расположением, когда отклонениям форм «седлообразность» – «бочкообразность» перемежаются с диаметрами большего основания.

Это создает возможность дополнительно увеличить точность сборки за счет учета допуска на погрешность формы уровней относительной точности A, B, C (таблица).

На рис. 2 показан вид эквидистантных линий, образованных при контакте тел качения, предварительно измеренных и отобранных для сборки в одном подшипнике и уложенными по принципу чередования поверхностей с погрешностями «седлообразность» – «бочкообразность» и измеренных контракалибром в его нижнем положении, т. е. промежуточной ступенью.

Стандартные обозначения полей допусков и отклонений формы взяты из источника [1]: Отклонения формы роликов поз. 1, 2 характеризуется наибольшим диаметром d_{max} и наименьшим диаметром d_{min} , а геометрические параметры ступенчатого контракалибра поз. 3 характеризуется диаметрами ступеней d_1, d_2, d_3 , соответствующих диаметрам компенсирующего ролика, который определяет оптимальные зазоры между каждой парой трения качения. С помощью стандартных калибров возможно измерение общего действительного суммарного зазора S цилиндрических тел качения, включающего диаметр одного из тел качения и суммарную величину минимального масляного слоя между контактирующими парами тел качения и дорожек на

длине, занимаемой телами качения между наружным и внутренним кольцами.

Вывод

Предлагаемый способ сборки роликоподшипников позволяет повысить равномерность зазоров S и создает условия для повышения точности радиальных зазоров роликоподшипника, долговечности подшипников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Якушев, А. М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения : учеб. для вузов / А. М. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1987. – 352 с.
2. Пат. 2627258 Российская Федерация, МПК F16C19/50, F16C43/04 Способ сборки подшипника качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова, Н. И. Столяров; ВолгГТУ. – 2017.
3. Санинский, В. А. Способ сборки подшипников качения / В. А. Санинский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 49–52.
4. Санинский, В. А. Автоматизация процесса подбора диаметальной компенсации механической обработки соосных отверстий в многоопорном узле дизельного двигателя разнотолщиной вкладышей / В. А. Санинский, А. В. Петрухин, Н. П. Москвичева // Технология машиностроения. – 2007. – № 7. – С. 65–68.
5. П. м. 171140 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C19/50, F16C33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
6. П. м. 171076 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C19/50, F16C33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
7. П. м. 171136 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
8. П. м. 171078 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
9. П. м. 171139 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
10. П. м. 171079 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
11. Перель, Л. Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор : Справочник / Л. Я. Перель. – М. : Машиностроение, 1983. – 543 с., ил.

УДК 621.787.4

*Ю. И. Сидякин, Ю. Г. Коновалова, С. Н. Ольштынский, А. С. Руденко, М. М. Тупиков***ДИНАМИКА МНОГОКРАТНОГО КОНТАКТНОГО СОУДАРЕНИЯ ТЕЛ
В ПРОЦЕССАХ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЧЕКАНКОЙ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Приведены результаты аналитического и экспериментального исследований силовых и деформационных параметров однократного и многократного контактных соударений тел при наличии в зоне их сопряжения упругопластической деформации после первого удара. Разработана методика определения рациональных технологических режимов упрочняющей обработки деталей чеканкой.

Ключевые слова: упругопластическая контактная деформация, контактный удар, упрочняющая обработка, индентор, наклеп.

*Yu. I. Sidiyakin, Yu. G. Konvalova, S. N. Ol'shtynskij, A. S. Rudenko, M. M. Tupikov***DYNAMICS OF MULTIPLE CONTACT IMPACT OF BODIES IN THE PROCESSES
OF HARDENING TREATMENT PROCESSING BY STAMPING****Volgograd State Technical University**

The paper present the results of analytical and experimental research of the force and deformation parameters of single and multiple contact impacts of bodies in the presence of elastic-plastic deformation in the zone of their conjugation after the first impact. A technique for determining the rational technological regimes of hardening by stamping is developed.

Keywords: elastic-plastic contact deformation, contact impact, hardening treatment, indenter, hardening.

Среди многочисленных динамических методов упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД), используемым для повышения их циклической прочности (дробенаклеп, центробежная ротационная обработка, виброобработка и пр.), чеканка занимает особое место, благодаря возможности получения при минимальных энергетических затратах больших степеней деформации материала и толщин упрочненного поверхностного слоя [1, 2]. Суть метода заключается в нанесении на обрабатываемую поверхность с частотой 10...50 Гц ряда последовательных ударов сферическими или тороидальными бойками и формировании на ней деформированного следа в виде чередующихся и примыкающих друг к другу лунок. Особенно актуален данный метод при обработке крупных деталей в местах концентрации напряжений в виде галтельных переходов, сварных швов и пр. Для чеканки применяются как стандартные промышленные установки, так и разнообразные приспособления индивидуального исполнения [2].

Проблемы, возникающие при осуществлении операций чеканки, относятся, в основном, к области технологии, т. е. к поиску рациональных режимов обработки: выбору формы и раз-

меров бойка, его подачи, а также определению энергии удара, необходимой для получения заданных степени деформации поверхности и глубины наклепанного слоя, включая силовые, временные и деформационные параметры ударного процесса. В настоящее время для этой цели используются приближенные зависимости, предложенные И. В. Кудрявцевым [1], в частности, для оценки энергии удара служит следующая:

$$W \approx \frac{HB}{6} \varepsilon_d^4 D^3 = 1,64 \cdot 10^{-3} HB \varepsilon_d^4 D^3 \quad (\text{Дж}),$$

где HB – твердость по Бринеллю (в кгс/мм²) упрочняемого материала; D – диаметр (в мм) сферического бойка, $\varepsilon_d = d/D$ – степень деформации в центре единичного отпечатка диаметром d ; оптимальной считается $\varepsilon_d = 0,3...0,5$.

Вместе с тем, для полноты исследований ударного процесса при наличии в зоне контакта упругопластической деформации необходимо знать закономерности образования единичной остаточной вмятины с заданными геометрическими параметрами и, применительно к чеканке, особенности формирования следа, оставляемого бойком на обрабатываемой поверхности детали. Начальный этап решения этой задачи построен на степенной зависимости между

контактной нагрузкой F и полным сближением α тел в контакте [3], равным сумме остаточной h (глубина лунки) и упругой α_y составляющих:

$$F = b_0 \alpha^n, \quad (1)$$

где значения b_0 и n ударного процесса определяют расчетом по формулам

$$n = \frac{\lg(F_{\delta,1}/F_{\delta,2})}{\lg(\alpha_{\delta,1}/\alpha_{\delta,2})}$$

и
$$b_0 = \frac{F_{\delta,1}}{\alpha_{\delta,1}^n} = \frac{F_{\delta,2}}{\alpha_{\delta,2}^n} \quad (H/мм^n) \quad (2)$$

на основе линейной зависимости $F_\delta(h_\delta)$ при ударе. Для этого, при предварительно известных значениях диаметра D сферического индентора, начальной скорости V_0 удара тел, твердости $HД$ (ГОСТ 18835–73), и предела текучести σ_T упрочняемого материала рассчитывают динамический коэффициент $\eta_{HД}$

$$\eta_{HД} = 0,5 \left(1 - \frac{137V_0}{HД} + \sqrt{1 + \frac{2250V_0}{HД}} \right),$$

а также динамические твердость $HД_\delta$ и предел текучести $\sigma_{T,\delta}$:

$$HД_\delta = \eta_{HД} HД, \quad \sigma_{T,\delta} = \eta_{HД} \sigma_T.$$

Далее, задавшись двумя произвольными глубинами $h_{\delta,1}$ и $h_{\delta,2}$ остаточных вмятин (например, $h_{\delta,1} = 0,02D$ и $h_{\delta,2} = 0,04D$ в пределах

$$W_{II} = \int_0^{\alpha_\delta} F_\delta(\alpha_\delta) d\alpha_\delta = \int_0^{\alpha_\delta} 10^{-3} b_0 \alpha_\delta^n d\alpha_\delta = \frac{10^{-3} \cdot b_0 \alpha_\delta^{n+1}}{n+1} = \frac{m V_0^2}{2}, \quad (4)$$

$$F_{Д} = \left(W_{II} \cdot 10^3 (n+1) b_0^n \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{и} \quad \alpha_{Д} = \left(\frac{n+1}{b_0} \cdot W_{II} \cdot 10^3 \right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (5)$$

при этом энергия, затрачиваемая только на пластическую деформацию, будет

$$W_{nn} = \int_0^{h_{Д}} F_\delta(h_\delta) dh_\delta = (F_{Д} - F_{S,\delta}) \cdot \frac{h_{Д}}{2}, \quad (6)$$

где дополнительно m – приведенная масса соударяющихся тел.

Геометрические параметры единичной остаточной вмятины (глубина h_1 и диаметр d_1 контура) рассчитываются по следующим выражениям:

$$h_{Д,1} = h_1 = \frac{F_{Д} - F_{S,\delta}}{\pi HД_\delta D}$$

линейного участка $F_\delta(h_\delta)$, определяют отвечающие им силы удара $F_{\delta,1}$ и $F_{\delta,2}$, а также полные сближения $\alpha_{\delta,1}$ и $\alpha_{\delta,2}$ тел в контакте по формулам:

$$F_{\delta,1} = \pi HД_\delta D h_{\delta,1} + F_{S,\delta}$$

и
$$F_{\delta,2} = \pi HД_\delta D h_{\delta,2} + F_{S,\delta},$$

$$\alpha_{\delta(1,2)} = h_{\delta(1,2)} + \alpha_{y,\delta(1,2)}$$

при
$$\alpha_{y,\delta(1,2)} = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{8} \cdot \frac{(k_1 + k_2)^2 F_{\delta(1,2)}^2}{D(1 + 2h/\alpha_{y,\delta(1,2)})}},$$

где дополнительно $F_{S,\delta}$ – критическая нагрузка, при которой в центре контакта зарождается пластическая деформация. Она находится по зависимости

$$F_{S,\delta} = \frac{\pi^5 (k_1 + k_2)^2 D^2}{3(1 - 2\mu_2)^3} \sigma_{T,\delta}^3, \quad (3)$$

установленной М. С. Дроздом [4] на основе решения контактной задачи Герца; здесь $k_{1,2} = (1 - \mu_{1,2}^2)/\pi E_{1,2}$ – упругие постоянные материалов тел, μ_1 и μ_2 , E_1 и E_2 – их коэффициенты Пуассона и модули упругости соответственно.

Полная энергия W_{II} , сила удара $F_{Д}$ (максимальное значение ударного импульса) и полное сближение $\alpha_{Д}$ тел в контакте определяются выражениями

и
$$d_{Д,1} = d_1 = \sqrt{2D(\alpha_{Д} + h_1) - 4h_1^2}. \quad (7)$$

Кинетику формирования следа бояка, оставляемого на поверхности упрочняемой детали, исследовали на специальном приспособлении, аналогичным описанному в [3], которое позволяло производить статическое и ударное нагружение тел как в одну точку, так и с незначительным боковым смещением бойка (до 0,5 мм) подобно тому, как это происходит при чеканке. Для этого использовали сферические бойки и плоские образцы из сталей 20, 45Х и 30ХГСА различного уровня твердости. Измерялись параметры соударения тел при однократном (глу-

бина h_1 и диаметр d_1 контура вмятины) и каждом последующем ударе в ту же лунку (h_N и d_N) из общего числа ударов $N = 10$ при различных начальных скоростях и энергиях удара. Часть этих данных представлена в таблице. Как видно, с одной стороны, расчетные параметры однократного контактного соударения тел вполне удовлетворительно подтверждаются экспериментом, что согласуется и с данными работы [3], с другой, – соотношения h_N/h_1 и d_N/d_1 при V_0 до 5 м/с не зависят от размера бойка и энергии удара и хорошо описываются

зависимостями, подобными установленным в работе [5] для дробеобработки:

$$h_N/h_1 = 1 + k_h \lg N$$

$$\text{и } d_N/d_1 = 1 + k_d \lg N, \quad (8)$$

в которых значения коэффициентов k_h и k_d определяются по следующим эмпирическим соотношениям (для $N \leq 10$ при $\bar{H}\bar{D}_0 = 10^{-3} H D_0$)

$$k_h = 0,02 \bar{H}\bar{D}_0 (12 - \bar{H}\bar{D}_0)$$

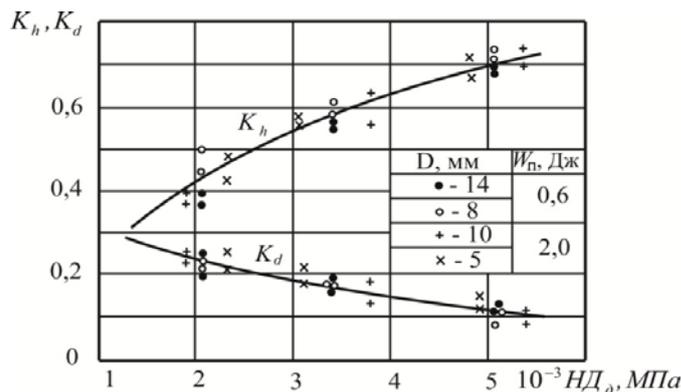
$$\text{и } k_d = 0,01(41,5 + \bar{H}\bar{D}_0^2 - 11 \bar{H}\bar{D}_0), \quad (9)$$

установленным путем аппроксимации соответствующих графиков рисунка.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений параметров соударения сферических инденторов с плоской поверхностью стальных тел

Марка стали, (НД)	D	V_0	W_{II}	Параметры	Опыт			Расчет			Опыт		
					Значения h_N и d_N (мм) после числа ударов N в одну и ту же лунку, равных						h_N/h_1 , d_N/d_1 при N :		
					1	3	10	1	3	10	3	10	
МПа	мм	м/с	Дж		1	3	10	1	3	10	3	10	
					1	3	10	1	3	10	3	10	
	20 (1440)	5	4,0	2,0	h	0,315	0,380	0,460	0,308	0,375	0,450	1,21	1,46
					d	2,55	2,82	3,10	2,52	2,77	3,05	1,11	1,22
		8	2,5	0,6	h	0,125	0,155	0,180	0,133	0,160	0,189	1,24	1,44
					d	2,25	2,50	2,75	2,21	2,45	2,71	1,11	1,22
		10	1,6	2,0	h	0,228	0,270	0,325	0,232	0,276	0,323	1,18	1,43
					d	3,15	3,52	3,90	3,20	3,56	3,96	1,12	1,24
14		2,5	0,5	h	0,080	0,095	0,110	0,086	0,103	0,122	1,19	1,38	
				d	2,37	2,65	2,85	2,43	2,69	2,98	1,12	1,20	
45X (2530)		5	1,6	2,0	h	0,255	0,325	0,397	0,260	0,329	0,404	1,27	1,56
					d	2,32	2,55	2,75	2,37	2,56	2,77	1,10	1,18
		8	2,5	0,6	h	0,090	0,115	0,145	0,096	0,123	0,152	1,28	1,61
					d	2,02	2,20	2,35	1,98	2,13	2,29	1,09	1,16
	10	4,0	2,0	h	0,155	0,195	0,252	0,150	0,194	0,242	1,26	1,63	
				d	2,75	2,92	3,35	2,76	2,95	3,16	1,06	1,18	
	14	2,5	0,6	h	0,068	0,085	0,105	0,065	0,083	0,103	1,25	1,54	
				d	2,30	2,50	2,65	2,27	2,44	2,63	1,09	1,15	
	30ХГСА (4170)	5	1,6	2,0	h	0,190	0,250	0,325	0,194	0,258	0,328	1,32	1,71
					d	2,10	2,25	2,35	2,15	2,27	2,40	1,07	1,12
		8	2,5	0,6	h	0,070	0,095	0,120	0,066	0,088	0,112	1,36	1,72
					d	1,75	1,85	1,90	1,78	1,88	1,98	1,06	1,09
10		4,0	2,0	h	0,100	0,133	0,173	0,104	0,140	0,178	1,33	1,73	
				d	2,45	2,55	2,72	2,48	2,61	2,76	1,04	1,11	
14		2,5	0,6	h	0,045	0,060	0,075	0,037	0,050	0,077	1,33	1,67	
				d	2,05	2,20	2,30	1,98	2,09	2,21	1,07	1,12	

Примечания: 1. Экспериментальные данные получены как средние арифметические из результатов 3...5 измерений. 2. Данные для скорости удара $V_0 = 2,5$ м/с заимствованы из работы [3].



Зависимости коэффициентов k_h и k_d в уравнениях (8) от твердости материалов

Закономерности накопления пластической деформации при перемещении бойка с подачей $S \approx (0,10...0,12)d_1$ от центра первоначального отпечатка (как и при чеканке, где не исключены и повторные удары бойка в уже имеющиеся лунки) практически идентичны процессу образования микрорельефа в осевом сечении валов [6] при их упрочняющей обкатке роликами (шариками). При этом глубина заходной впадины на начальном этапе формирования следа бойка (для описанных выше условий нагружения) составляет в среднем $H_{зак} \approx (1,10...1,15)h_1$, ее ширина увеличивается до значений $\approx (1,15...1,20)d_1$ при практически неизменной длине вдоль подачи, определяемой известным соотношением [6] $L_{зак} \approx 1,3\sqrt{F_d/HB}$. Согласно результатам исследований [1] рациональным режимом обработки (в частности, чеканкой) считается такой, при котором интенсивность упругопластической деформации $\varepsilon_{i,0}$ на поверхности упрочняемой детали будет близка по значению к предельной равномерной деформации материала, т. е. $\varepsilon_{i,0} \approx \varepsilon_p$. В этом случае, согласно [7], контролировать получаемую при че-

канке степень деформации материалов среднего уровня твердости следует по уравнению $\varepsilon_d = (0,70...0,73)\varepsilon_p^{2/3}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцев, И. В. Выбор режима упрочняющего поверхностного наклепа методом чеканки / И. В. Кудрявцев. – М. : ГОСИНТИ, 1962, вып. 4. – С. 1–20.
2. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : Справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
3. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
4. Дрозд, М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М. С. Дрозд. – М. : Metallurgia, 1965. – 171 с.
5. Федоров, А. В. Об оптимальной экспозиции при дробеструйной обработке / А. В. Федоров, С. Л. Лебский // Металловедение и прочность материалов : Труды ВПИ, вып. VIII. – Волгоград, 1977. – С. 90–96.
6. Браславский, В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. – М. : Машиностроение, 1975. – 160 с.
7. Сидякин, Ю. И. О соотношении между степенью наклепа и интенсивностью контактной упругопластической деформацией материала в процессах ППД / Ю. И. Сидякин, С. Ю. Абакумова, С. Н. Ольштынский [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 42–45.

УДК 621.9

Х. Ч. Фам, Ю. Л. Чигиринский, А. А. Липатов

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ
 ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Волгоградский государственный технический университет
 E-mail: leandrej@yandex.ru

Рассмотрена неустойчивость стружкообразования при точении высоколегированных сталей твердосплавным инструментом. Показано, что ее частота зависит от марки обрабатываемой стали. Рассмотрены другие характеристики неустойчивости стружкообразования, способные влиять на механизм и интенсивность изнашивания.

Ключевые слова: точение, высоколегированные стали, твердосплавный инструмент, неустойчивость стружкообразования, частота неустойчивости, характеристики неустойчивости.

Kh. Ch. Fam, Yu. L. Chigirinskij, A. A. Lipatov

INSTABILITY OF CHIP FORMATION DURING CUTTING OF HIGH-ALLOYED STEELS, CARBIDE TOOL

Volgograd State Technical University

It is considered the instability of chip formation when turning high-alloy steels with carbide tool. It's shown that frequency of instability depends of mark of machined steel. It's shown different characteristics of instability of chip formation, these can influence to mechanism and intensity of wear.

Keywords: turning, high-alloy steels, carbide tool, the instability of chip formation, frequency of instability, characteristics of instability.

Резание высоколегированных сталей с практически применяемыми скоростями сопровождается неустойчивостью стружкообразования, существенно влияющей не только на интенсивность, но и на механизм изнашивания твердосплавного инструмента. Формирование циклических стружек порождает переменные нагрузки на режущих поверхностях и сохранение адгезионно-усталостного изнашивания до высоких скоростей резания [1]. Изучение неустойчивости стружкообразования имеет существенное научное и практическое значение.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований, касающиеся неустойчивости стружкообразования.

Исследования проводились при точении сталей 12X18H10T, 14X17H2 и ЭИ961 (13X11H2B2MФ) инструментом из твердого сплава ВК6. Стали 12X18H10T и 14X17H2 обрабатывались в состоянии поставки, заготовки из ЭИ961 подвергались термической обработке до твердости 415 НВ. Всем этим сталям свойственно возрастание теплопроводности при увеличении температуры – в отличие от не образующих циклических стружек углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса, у которых с ростом температуры теплопроводность резко уменьшается [2].

Скорость резания варьировалась в диапазоне $v = 25-150$ м/мин при подаче 0,3 мм/об и глубине резания 1,5 мм. Основные геометрические характеристики резцов: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$.

Частота неустойчивости f_{ω} вычислялась по скорости стружки $v_s = v/\xi$ (коэффициент усадки стружки ξ определялся простейшим способом – как отношение пути, пройденного резцом за один оборот заготовки, к длине соответствующего участка стружки) и шагу неустойчивости (расстоянию между соседними зубчиками на внешней стороне циклической стружки). Корни стружек получали с помощью устройства «падающий резец».

Основным параметром неустойчивости стружкообразования является ее частота f_{ω} – число колебаний силовых и тепловых воздействий на режущие поверхности инструмента в единицу времени. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости величины f_{ω} от скорости v . Здесь же указаны скоростные границы начала и завершения развития неустойчивости (перехода с ростом v от сливной стружки к циклической).

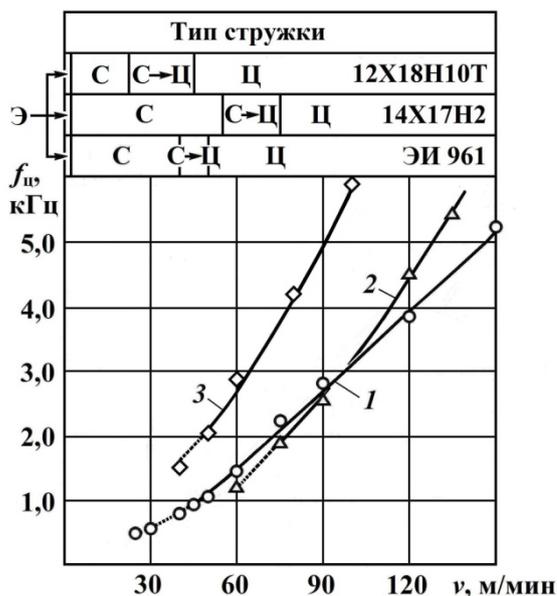


Рис. 1. Скоростные диапазоны существования типов формирующейся стружки и зависимости частоты неустойчивости стружкообразования f_{ω} от скорости резания v при точении сталей 12X18H10T (1), 14X17H2 (2) и ЭИ961 (3) инструментом из ВК6:

Типы стружек: Э – элементная, С – сливная, Ц – циклическая

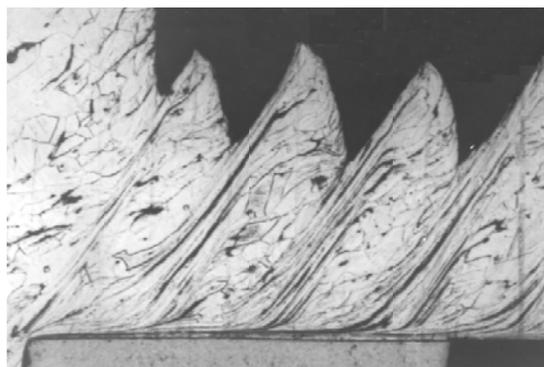
Из рис. 1 видно, что скоростные диапазоны существования сливных (без следов неустойчивости), циклических, а также стружек переходного типа (обозначение «С–Ц» на рис. 1; зубчики на стружке есть, но их шаг нестабилен, а степень деформации металла в фазах сжатия и сдвига отличается незначительно) зависят от марки обрабатываемой стали. Переход к строго циклическим стружкам раньше всего (при наи-

меньшей v) происходит при резании аустенитной стали. В связи с этим отметим, что для аустенитных сталей возрастание теплопроводности с увеличением температуры происходит гораздо интенсивнее (в диапазоне температур 200–800 °С примерно на 45 % против 8 % для высоколегированных хромистых сталей [2]).

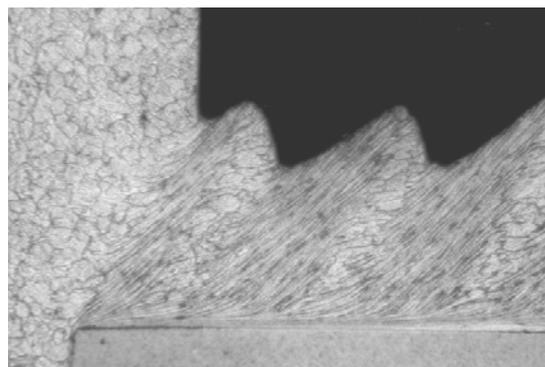
В то же время наибольшая частота неустойчивости наблюдалась при резании стали ЭИ961.

Это связано с высокой прочностью стали ЭИ961 и, соответственно, с большим тепловыделением в зоне стружкообразования (в подтверждение того, что первопричиной неустойчивости являются процессы в самой зоне стружкообразования, а не в контактной зоне [3, 4]).

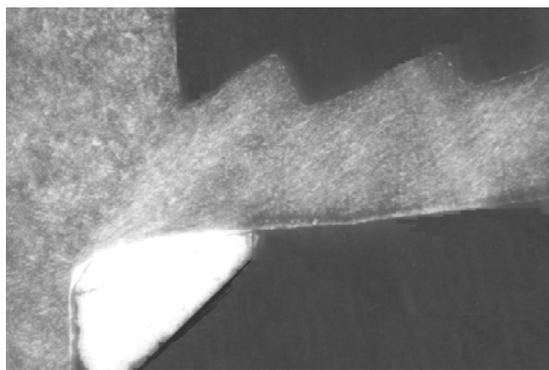
Изучение микрошлифов корней стружек (рис. 2) показало, что частота – не единственная характеристика неустойчивости.



а



б



в

Рис. 2. Микрошлифы корней стружек ($\times 100$), полученных при точении резцами из ВК6 стали:

а – 12X18H10T с $v = 90$ м/мин; б – 14X17H2 с $v = 90$ м/мин;
в – ЭИ961 с $v = 100$ м/мин

Для оценки влияния неустойчивости на износ значение имеет не только частота, но и амплитуда колебаний силового (и теплового) воздействия на резец. В первом приближении ее можно оценить с помощью относительного размаха колебаний угла сдвига $\delta\beta = (\beta_{\max} - \beta_{\min}) / \beta_{\text{ср}}$ [5] (величины максимального β_{\max} , минимального β_{\min} и среднего $\beta_{\text{ср}}$ углов сдвига определяются на микрошлифах корней стружек). Этот показатель при равной скорости резания оказался значительно меньше для 14X17H2 (рис. 2, б, $\delta\beta = 0,27$), чем для 12X18H10T (рис. 2, а, $\delta\beta = 0,4$). Для стали ЭИ961, несмотря на несколько большую скорость, показатель еще меньше (рис. 2, в, $\delta\beta = 0,25$).

Кроме того, на интенсивность и даже механизм изнашивания должен влиять характер колебаний сил на режущих поверхностях инстру-

мента. Для аустенитной стали 12X18H10T (рис. 2, а) ширина зоны, соответствующей фазе локализованного сдвига, почти вдвое меньше ширины зоны, соответствующей фазе сжатия (и составляет 33–35 % от шага неустойчивости по длине стружки). Для высоколегированных хромистых сталей, наоборот, больше ширина зоны сдвига (измерения проводились в средней части тела стружки). Как для 14X17H2 (рис. 2, б), так и для ЭИ961 (рис. 2, в) ширина зоны сдвига составляет порядка 60 % от шага неустойчивости. Этот показатель (доля ширины зоны фазы сдвига от шага неустойчивости) характеризует соотношение времен протекания фаз сжатия и локализованного сдвига при циклическом стружкообразовании и, соответственно, степень развития «ударной» нагрузки на режущие поверхности инструмента. Можно было бы рас-

смотреть и соотношение степеней деформации в фазах сжатия и сдвига, но такой показатель неудобен для количественного измерения.

Таким образом, очевидно, что ударный характер переменной нагрузки для высоколегированных хромистых сталей проявляется в меньшей степени, чем для 12Х18Н10Т. Это позволяет прогнозировать меньшее влияние неустойчивости стружкообразования на механизм и интенсивность изнашивания твердосплавного инструмента при обработке высоколегированных хромистых сталей, чем для аустенитных сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Липатов, А. А.* Влияние неустойчивости стружкообразования и особенностей контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности твердосплавного инструмента на его изнашивание при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // Известия ВолГТУ : межвуз.

сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 30–34.

2. *Резников, А. Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.

3. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.

4. *Липатов, А. А.* Неустойчивость деформирования в контактной зоне в условиях неустойчивого стружкообразования при резании аустенитной стали твердосплавным инструментом / А. А. Липатов // Известия ВолГТУ : науч. журнал № 5 (200) / ВолГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 26–28.

5. *Липатов, А. А.* Влияние характера зависимости теплопроводности обрабатываемого материала от температуры на тип стружкообразования / А. А. Липатов // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 (30) / ВолГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 3). – С. 49–51.

УДК 621.438-46: 621.921

Е. А. Федянов, В. А. Санинский, Н. А. Сторчак

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: saninv@yandex.ru

В статье представлена разработка усовершенствованной технологии и высокопроизводительного устройства для одновременной гидроабразивной обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей труб.

Ключевые слова: технология, гидроабразивная обработка, наружные и внутренние поверхности, многосемянное приспособление, трубные заготовки, скорость, давление, поток, объемный расход, жидкость, рабочая камера, условие неразрывности.

E. A. Fedyanov, V. A. Saninsky, N.A. Storchak

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF HYDRO ABRASIVE PROCESSING OF PIPES

Volgograd State Technical University

There is represented the development of advanced technology and a high-performance device for simultaneous hydro abrasive processing of cylindrical pipe surfaces inside and outside.

Keywords: technology, hydro abrasive processing, pipes, surfaces, multi-seat fitment, pipe billets, speed, pressure, flow, volume flow, liquid, working chamber, continuity condition.

Разработан высокопроизводительный способ обработки труб свободными абразивами который может применяться при осуществлении процессов шлифования наружных и внутренних поверхностей длинномерных труб гидроабразивной средой и обеспечивать параметры шероховатости обработанных поверхностей Ra 0,16–1,25 мкм. Предлагаемое для усовершенствования ГАО устройство работает следующим образом (рис. 1) [1].

Перед гидроабразивной обработкой левый фланец 2 и правый фланец 3 раздвинуты на длину, превышающую максимальную длину трубных заготовок (не менее трех): внутренней трубы 6, промежуточной трубы 7 и наружной трубы 8. Трубные заготовки базируются в центрирующих выточках 5. Далее включают привод зажима труб (не показан), при этом левый фланец 2 смещается так, что расстояние между фланцами 2 и 3 сокращается до величины рав-

ной длине трубных заготовок. Сухари 9 под действием пружин 10 фиксируют трубные заготовки с образованием камеры гидроабразивной обработки 11. При включении насоса 19 гидроабразивная среда 16 из резервуара 21 под давлением подается по напорному трубопроводу 14 сначала через сквозное отверстие 13 во внутреннюю полость 12. По каналам 15 гидроабразивная среда 16 перемещается по камере гидроабразивной обработки 11 от внутренней полости 12, образованной трубной заготовкой минимального диаметра 6 (полость с минимальным объемом), к наружной полости 12, образованной трубной заготовкой максимального диаметра 8 (полость с максимальным объемом) и осуществляет обработку внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок минимального и промежуточных диаметров (внутренняя труба 6 промежуточная труба 7) и обработку внутренней поверхности трубной заготовки максимального диаметра (наружная труба 8).

При перемещении гидроабразивной среды 16 от внутренней полости 12 с минимальным объемом через полости 12 с промежуточным объемом в наружную полость 12 с максимальным объемом происходят потери основного давления (подача во внутреннюю полость), которые компенсируются дополнительным давлением при подаче гидроабразивной среды 16 не только во внутреннюю полость 12, но и в каждую последующую нечетную полость 12. При этом не создается противотока основному гидроабразивному потоку, то есть сохраняется направленность движения гидроабразивной среды 16, а дроссели 20 обеспечивают возможность регулировки давления подаваемой гидроабразивной среды 16 и времени ее подачи. Компенсации потерь давления основного потока гидроабразивной жидкости 16 так же способствует выполнение сквозных отверстий 13 правого фланца и каждого выхода каждого канала 15 в виде конического сопла, сужающегося по направлению потока гидроабразивной среды 16.

По окончании гидроабразивной обработки внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок, насос 19 отключают и осуществляют выемку обработанных трубных заготовок (внутренней трубы 6, промежуточной трубы 7, наружной трубы 8) при помощи привода зажима труб (не показан).

Для обеспечения требуемых режимов ГАО [2] требуется методика расчета, направленная на достижение высоких показателей производительности, качества и экономичности механической обработки длинномерных труб.

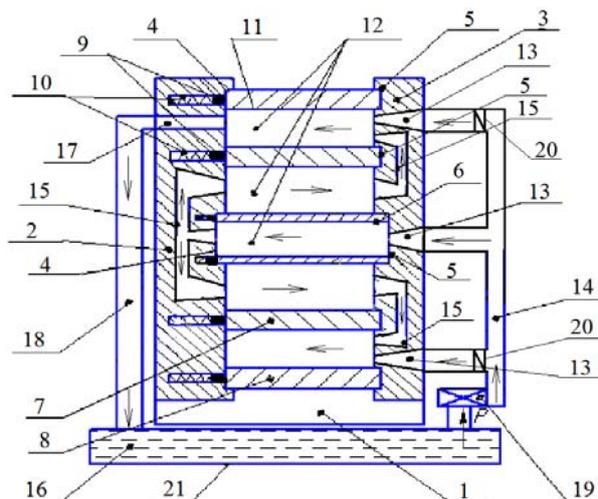


Рис. 1. Продольное сечение устройства с пакетом соосно установленных труб [1]

Необходимое давление подачи гидроабразивной жидкости в рабочие камеры и диаметр подводящих эту сопел, можно определить исходя из желательной скорости движения абразива, которая может лежать в пределах 50–100 м/с [3, 4] относительно обрабатываемой поверхности. Исследованиями [2, 3] установлено, что например, для «жаропрочных и титановых сплавов абразивным материалом зернистости М40 минимальное время обработки получается при технологических параметрах М40, $p_v^* = 0,4$ МПа, $\alpha = 45^\circ$, обеспечивающих максимальный сьем металла».

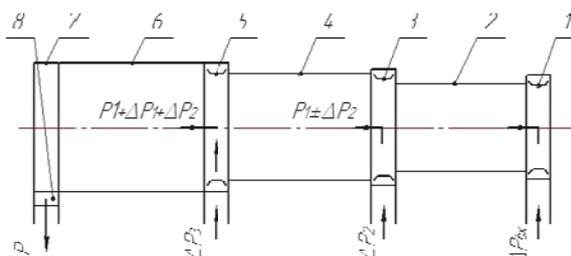


Рис. 2. Варианты схем эффективного трубопровода, эквивалентного по характеристикам скорости и давления жидкой среды с характеристиками устройства, показанного на рис. 1: сверху – трубопровод с увеличивающимися к выходу объемами рабочих условных камер, внизу – трубопровод с участком наибольшего объема рабочей условной камеры в середине трубопровода:

1–3, 5 – дроссели; 2, 4, 6 условные камеры, соответствующие внутренней, промежуточной и наружной трубным заготовкам соответственно (рис. 1), 8 – расходомер

Для других материалов скорость w_k , угол атаки α и размер абразивного М зерна, давление, p_v даны в источниках [2, 3] и др. и могут быть уточнены экспериментально в зависимости доли абразива в жидкости (суспензии), сорта металла трубных заготовок и требуемых параметров шероховатости.

Если желательная скорость w_p задана, то значение объемного расхода $Q_{ж}$ через рабочую камеру может быть вычислено из условия неразрывности потока

$$Q_{ж} = w_p \cdot S_k, \quad (1)$$

S_k – площадь поперечного сечения потока в рабочей камере.

Предполагается, что течение идет в направлении оси трубной заготовки и винтовое движение потока отсутствует. Это вполне обоснованное допущение, так как вследствие большой длины трубных заготовок тангенциальная составляющая скорости потока, которая может быть создана на входе в рабочую камеру за счет, например, расположения подводющих каналов под углом к оси трубной заготовки, будет

$$p_{к_{in}} = p_a + \rho_{га} \frac{w_{out}^2}{2} - \rho_{га} \frac{w_k^2}{2} + \lambda_{га} \frac{L_k}{D_k^5} \rho_{га} \frac{w_k^2}{2} + \zeta_{out} \cdot \rho_{га} \frac{w_{out}^2}{2}, \quad (2)$$

где w_k – скорость потока в рабочей камере, w_{out} – скорость потока гидроабразивной жидкости на входе из установки, $\rho_{га}$ – плотность гидроабразивной жидкости, L_k – длина трубных заготовок, D_k^r – гидравлический диаметр рабочей камеры, $\lambda_{га}$ – коэффициент потерь трения при течении гидроабразивной жидкости, ζ_{out} – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления сливной магистрали от выхода из рабочей камеры до выхода из установки. Зная давление $p_{к_{in}}$ и требуемый расход $Q_{ж}$ гидроабразивной жидкости через рабочую камеру, можно подобрать значения площади сечения каналов, подводющих жидкость в камеру, и давление, которое необходимо поддерживать перед этими каналами. Суммарная площадь выходных сечений каналов, подводющих гидроабразивную жидкость в рабочую камеру, и давление перед подводящими каналами связаны с расходом известным образом

$$Q_{ж} = n_0 \cdot \mu_0 \cdot S_0 \cdot \sqrt{2 \frac{p_{in} - p_{к_{in}}}{\rho_{га}}}, \quad (3)$$

где n_0 – число подводющих каналов, S_0 – площадь поперечного сечения выходного отверстия одного канала, μ_0 – коэффициент расхода подводящего канала. Предполагается, что все подводящие каналы имеют одинаковую геометрию и размеры.

сохраняться лишь в пределах относительно небольшого по протяженности начального участка рабочей камеры.

Давление p_{in} , которое необходимо создать на выходе в установку, чтобы обеспечить требуемый расход, будет зависеть от суммарного гидравлического сопротивления установки. Так как целью расчета является, в том числе, определение диаметра выходного сечения каналов, подводющих жидкость в рабочую камеру, то целесообразно из общего гидравлического сопротивления установки выделить сопротивление участка от входа в рабочую камеру до выхода гидроабразивной жидкости на слив. Если давление на выходе установки p_{out} равно атмосферному: $p_{out} = p_a$, то давление $p_{к_{in}}$ на входе в рабочую камеру

Величина дополнительного давления в каждую последующую устанавливается в зависимости от увеличения объема V_i -й камеры, возникающие в случае изменения ΔV_{j-j} в каждой их камер 2, 4, 6 при переходе потока суспензии из i -й камеры в j -ю камеру. Для определения расхода суспензии в камерах и ее массы можно определить изменение объема по формуле:

$$\Delta V_{i-j} = V_i - V_j. \quad (4)$$

Выводы

Зная давление $p_{к_{in}}$ и требуемый расход $Q_{ж}$ гидроабразивной жидкости через рабочую камеру, можно подобрать значения площади сечения каналов, подводющих жидкость в камеру и давление, которое необходимо поддерживать перед этими каналами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 159213 РФ, МПК В24С3/02, В24С9/00. Устройство для гидроабразивной обработки внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок / В. А. Санинский, Е. А. Федянов, Н. А. Сторчак ; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ; 2016.
2. Второв, Е. Л. Влияние режимов и схем гидроабразивной обработки образцов и лопаток ГТД на титановых и жаропрочных сплавах на производительности и качество поверхности / Е. Л. Второв, А. В. Мещеряков, Л. С. Попов, В. Г. Никифоров // Прогрессивные методы в технологии производства авиадвигателей. – Куйбышев: КуАИ, 1984.
3. Второв, Е. Л. Влияние режимов гидроабразивной обработки на производительность и шероховатость / Е. Л. Второв, А. В. Мещеряков, Л. С. Попов, В. Г. Никифоров // Прогрессивные методы проектирования технологических процессов и производства двигателей летательных аппаратов. – Куйбышев: КуАИ, 1983.

УДК 681.5

*Е. М. Фролов, Э. А. Корзун, Ж. С. Тихонова***АДАПТАЦИЯ МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ
К ПРОМЫШЛЕННЫМ УСЛОВИЯМ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: eltar1983@yandex.ru

Рассматривается возможность усовершенствования метода пробного прохода с целью увеличения его точности и приближения к применению в промышленных условиях. Описана методика применения технологии плазменного напыления для электрической изоляции детали или резца неэлектропроводным покрытием. Приведены параметры и характеристики покрытия, нанесенного плазменным методом, и его достоинства.

Ключевые слова: метод пробного прохода, термоЭДС, электроизоляция, плазменное напыление, оксид алюминия.

*E. M. Frolov, E. A. Korzun, Zh. S. Tikhonova***ADAPTATION OF THE METHOD OF CONTROLLING
CUTTING MODES TO INDUSTRIAL CONDITIONS****Volgograd State Technical University**

The possibility of improving the trial pass method is exploring with the aim of increasing its accuracy and approaching its application in industrial conditions. The technique of applying plasma spraying technology for electrical insulation of the workpiece or cutter by a non-conductive coating is described. The parameters and characteristics of the coating applied by the plasma spraying technology are given along with its advantages.

Keywords: trial pass method, thermo EMF, electrical insulation, plasma spraying, aluminium oxide.

Современное автоматизированное машиностроительное производство на пути общемирового процесса перехода к «Индустрии 4.0» сталкивается с проблемами оперативного контроля и оптимизации режимов обработки, основывающихся на информации, получаемой в режиме реального времени. В настоящее время существует большое многообразие подобных методов [1], но подавляющее большинство из них либо требуют лабораторных условий, либо не поддаются алгоритмизации до уровня использования в современных системах числового программного управления.

Одним из наиболее перспективных в плане промышленного применения методов оптимизации режимов резания является метод пробного прохода [2]. Он основывается на измерении величины термоЭДС пары инструмент (твердосплавный) – обрабатываемая деталь и использовании ее в качестве интегрального показателя условий протекания процесса резания. Препятствием для применения этого метода в заводских, промышленных условиях является необходимость дополнительной электрической изоляции детали или резца токонепроводящими прокладками, что снижает жесткость и виброустойчивость технологической системы [3]. Изоляция требуется для того, чтобы избежать

появления источников вторичных (паразитных) ЭДС, а также коротких (шунтирующих) электрических цепей при повторном контакте сходящей стружки с державкой.

Современные технологии позволяют изолировать резец путем напыления на державку тонких коррозионностойких диэлектрических покрытий различных составов, используя устройства для плазменного напыления. В качестве примера можно привести устройства, описанные патентами [4,5,6].

Сущность плазменного напыления состоит в нанесении покрытия из отдельных частиц порошкового материала, нагретого и ускоренного с помощью высокотемпературной плазменной струи. Плазменное напыление основано на распылении двух проволок, между которыми горит электрическая дуга и сжатый воздух подается в область энерговыделения. Цель плазменного напыления – изготовление деталей и изделий со специальными и декоративными свойствами поверхности такими, как износостойкость, антифрикционность, коррозионностойкость, жаростойкость, кавитационностойкость, эрозивностойкость, электроизоляция, стойкость против фреттинг-коррозии и др. Эффект от плазменного напыления достигается за счет создания на поверхности изделия защит-

ного покрытия, которое многократно повышает эксплуатационные свойства детали или восстанавливает первоначальный размер. По сравнению с аналогами – газопламенным, электродуговым и детонационным напылением, процессами наплавки и осаждения, данный процесс имеет следующие преимущества [7]:

- эффективное управление энергетическими характеристиками напыляемых частиц и условиями формирования покрытия за счет гибкости регулирования параметров и режимов работы плазмотрона;

- высокий коэффициент использования порошка (до 85 %), прочность сцепления покрытия с основой (до 60 МПа), низкая пористость;

- высокая производительность процесса;

- универсальность за счет получения покрытий из большинства материалов без ограничения их температур плавления;

- нанесение покрытия на изделия, изготовленные практически из любого материала;

- отсутствие ограничений по размерам напыляемых изделий;

- низкое термическое воздействие на напыляемую основу, что позволяет избежать деформаций, изменений размеров изделий, а также исключить нежелательные структурные превращения основного металла;

- нанесение покрытия на локальные поверхности;

- получение регламентированной однородной пористости покрытия для использования в условиях работы со смазкой поверхностей скольжения;

- положительное влияние на усталостную прочность основы, за счет получения при плазменном напылении слоистой структуры покрытия, в отличие от столбчатой, образующейся при осаждении из газовой или паровой фазы, диффузионном насыщении;

- нанесение покрытия с минимальными припусками для последующей механической обработки;

- возможность использования для формообразования деталей (плазменное напыление производят на поверхность формы- оправки, которая после окончания процесса удаляется, остается оболочка из напыленного материала);

- уменьшенный уровень шума и излучения;

- надежность и стабильность оборудования, высокий ресурс элементов плазмотрона, за счет оптимизации условий охлаждения и обеспечения плавного нарастания и падения тока;

- низкий расход аргона; маневренность и возможность автоматизации процесса.

Прочность сцепления покрытия с поверхностью детали в среднем равна 10–55 МПа на отрыв, а некоторых случаях – до 120 МПа. Пористость покрытия находится в пределах 10...15 %. Толщина покрытия обычно не более 1 мм, так как при ее увеличении в напыляемом слое возникают напряжения, стремящиеся отделить его от поверхности детали.

Для напыления на державку резца можно использовать оксид алюминия – химическое соединение алюминия и кислорода с химической формулой Al_2O_3 . Он имеет преимущество в термических, химических и физических свойствах по сравнению с разными керамическими материалами. Этот материал обладает высокой износостойкостью. Удельное сопротивление оксида алюминия также очень высоко [8].

В таблице приведены значения сопротивления для оксида алюминия (Alumina 98 %) для трех температурных интервалов [9].

Удельное сопротивление оксида алюминия (Alumina 98 %) [9]

Температура, °C	Удельное сопротивление, Ом·см
20	10^{14}
400	10^{11}
800	10^7

Предложенный метод позволяет, не снижая жесткости технологической системы изолировать державку резца покрытием, обладающим достаточной электроизоляционной способностью и может быть нанесено на державки сложной формы, что приближает метод пробного прохода к промышленному применению. Именно повышение уровня автоматизации является двигателем прогресса в области современного машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов, Е. М. Повышение надежности определения режимов резания в САПР ТП механической обработки : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 : защищена 2009 г. / Фролов Е. М. – Волгоград, 2009. – 145 с.

2. Пат. 2063307 Российская Федерация, МКИ 6 В 23 В 25/06. Способ определения допустимой скорости резания при механической обработке детали твердосплавным инструментом / А. Л. Плотников ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 94010673/08 ; заявл. 29.03.1994 ; опубл. 10.07.1996, Бюл. № 19.

3. Пат. 2117557 Российская Федерация, МПК - 8 В 23 В 25/06. Способ измерения величины термоЭДС естественной термопары инструмент – деталь / А. Л. Плотников ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 97100992/02 ; заявл. 22.01.1997 ; опубл. 20.08.1998, Бюл. № 23.

4. Пат. 2092981 Российская Федерация, МПК - 8 Н 05 Н 1/42, С 23 С 4/00, В 23 К 10/00. Плазмотрон для напыления порошковых материалов / С. В. Тахвананин ; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Технопарк ЛТА». – № 96110637/02 ; заявл. 29.05.1996 ; опубл. 10.10.1997, Бюл. № 25.

5. Пат. 2462533 Российская Федерация, МПК - 8 С 23 С 4/10, С 23 С 4/12. Способ плазменного напыления износостойких покрытий / В. И. Кузмин, А. А. Михальченко, Е. В. Картаев, Н. А. Руденская, Н. В. Соколова ; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН (ИТПМ

СО РАН). – № 2011116526/02 ; заявл. 26.04.2011 ; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27.

6. Пат. 2459010 Российская Федерация, МПК - 8 С 23 С 4/12, Н 05 Н 1/44, В 23 К 10/00. Плазменное устройство и система / В. Е. Белашенко, О. П. Солоненко, А. В. Смирнов ; заявитель и патентообладатель В. Е. Белашенко, О. П. Солоненко, А. В. Смирнов. – № 2009124486/02 ; заявл. 10.01.2011 ; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.

7. Оборудование для плазменного напыления [Электронный ресурс] : интернет магазин. – Режим доступа: <https://sytrpriz.com/p61918674-oborudovanie-dlya-plazmennogo.html> (дата обращения: 17.09.17).

8. «ТЕОРИЯ. ПРАКТИКА. ИННОВАЦИИ» [Электронный ресурс] : электронный международный научно-технический журнал. – Режим доступа: <http://www.tpi.nauka.ru/2017/07/Melnikov.pdf> (дата обращения: 17.09.17).

9. CeramTec Rubalit 1898 Alumina [Электронный ресурс] : база данных. – Режим доступа: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4a3b569f62d04bd2ac5212484ff5529a&ckck=1> ограниченный, треб. регистрация. – (дата обращения: 12.06.17).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.52:664.02

А. А. Антонюк, С. В. Хатюхин, А. Г. Алехин

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ ОСУШИТЕЛЯ ВОЗДУХА КОПТИЛЬНИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведен анализ систем осушения воздуха конденсаторного типа. Рассчитаны параметры системы, обеспечивающие оптимальный режим работы. Построена математическая модель процесса осушки воздуха в предложенной схеме конструкции. Рассчитаны рабочие диапазоны регулирования температуры и относительной влажности воздуха внутри коптильни.

Ключевые слова: испаритель, конденсатор, относительная влажность, осушитель воздуха.

A. A. Antonyuk, S. V. Khatyukhin, A. G. Alyokhin

DEVELOPMENT AND CALCULATION OF THE DEHUMIDIFIER OF THE SMOKEHOUSE

Volgograd State Technical University

The analysis of the drainage systems of condenser type. The system's parameters providing the optimal operating mode are calculated. The mathematical model of the process of air drying in the proposed design scheme is constructed. The operating ranger for controlling the temperature and the relative humidity within the smokehouse are calculated.

Keywords: evaporator, condenser, relative humidity, dehumidifier.

Для процесса холодного копчения сала основными контролируемыми параметрами воздуха внутри коптильни являются температура и относительная влажность. С применением обычного осушителя воздуха конденсаторного типа возникает рост температуры воздуха в коптильне на 6–8 °С, что неприемлемо для данного процесса. В случае установки такого осушителя

требуется дополнительная система охлаждения, что соответственно увеличивает стоимость коптильни и расходы на ее эксплуатацию [1].

Решением проблемы нагрева воздуха внутри коптильни стала разработка конструкции с вынесенной частью конденсатора наружу, для отвода лишнего тепла. Схема разработанной коптильни представлена на рис. 1.

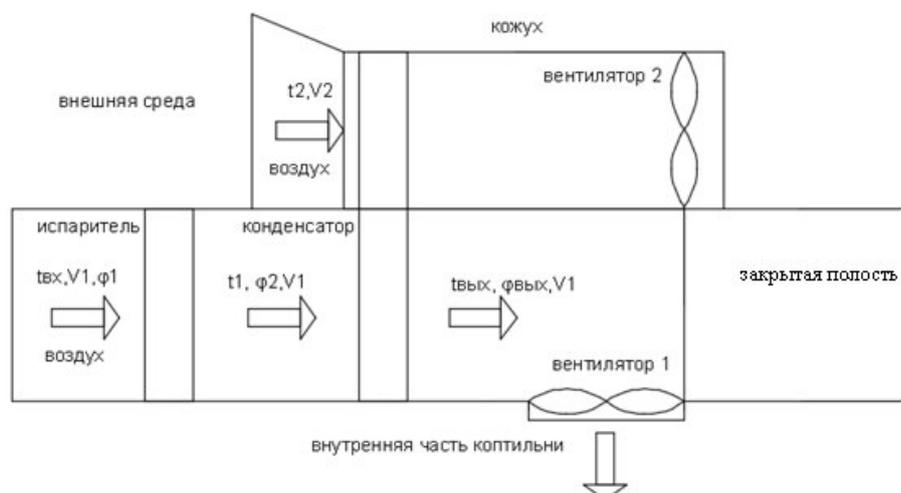


Рис. 1. Схема осушителя воздуха в коптильне

Предложенный осушитель воздуха представляет собой теплообменник. Поток воздуха внутри коптильни со скоростью V_1 , заданной вентилятором 1 проходит через испаритель. При этом его начальная температура $t_{вх}$ понижается до t_1 . Если при этом достигается точка росы, то выпадает конденсат, который отводится наружу, и начальная влажность ϕ_1 понижается до ϕ_2 . Далее поток воздуха проходит через конденсатор и нагревается до нужной температуры $t_{вых}$, относительная влажность понижается до $\phi_{вых}$. Вынесенная наружу часть конденсатора охлаждается потоком воздуха температуры t_2 и скоростью V_2 , заданной вентилятором 2. Контроль выходной температуры осуществляется путем изменения скорости вентиляторов [2].

Для расчета параметров установки была создана математическая модель системы в MathCad и изучена зависимость выходной темпера-

туры от скорости вентиляторов. В качестве оптимальных условий процесса принято $\phi_1 = 0,5$, $t_{вых} = 17^\circ\text{C}$, $t_1 = 3^\circ\text{C}$, скорость потоков воздуха от вентиляторов 1 и 2 равна 6 м/с. Было рассчитано, что оптимальным положением конденсатора для поддержания заданных условий является такое его положение, при котором 45 % площади конденсатора находится внутри коптильни, а 55 % снаружи. Варьируя скорость потоков воздуха V_1 от 5,4 до 6,6 м/с и V_2 от 3 до 9 м/с, была рассчитана минимальная $14,4^\circ\text{C}$ и максимальная $20,6^\circ\text{C}$ $t_{вых}$ [3].

На рис. 2 изображены графики изменения температуры $t_{вых}$ и относительной влажности ϕ_1 в ходе работы осушителя воздуха системы, настроенной на оптимальные условия, с экстремально высокими начальными условиями $t_{вх} = 23^\circ\text{C}$ и $\phi_1 = 0,8$.

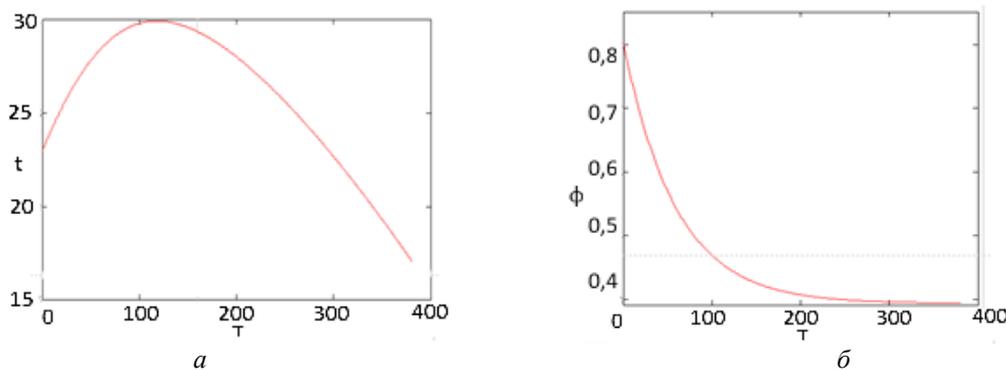


Рис. 2. Графики зависимости от времени:
а – температуры воздуха в коптильне; б – относительной влажности воздуха в коптильне

По графикам видно, что сначала идет процесс конденсации большого количества влаги, который сопровождается выделением тепла, нагревающего воздух до $29,9^\circ\text{C}$. Система работает на максимальное охлаждение, но не может справиться с таким количеством тепла. После конденсации основного количества влаги и достижения $\phi = 0,45$, воздух начинает охлаждаться. Процесс идет, постепенно ускоряясь по мере понижения влажности. Полный процесс осушения и охлаждения воздуха займет порядка шести с половиной минут.

Применение предложенной схемы осушителя воздуха позволяет избежать нагрева воздуха внутри коптильни при осушении, не требует использования отдельной системы охлаждения, дает возможность регулировать температуру и скорость осушки внутри коптильни путем изменения скоростей потоков воздуха от вентиляторов.

В дальнейшем планируется усовершенствование данной системы путем автоматизации процесса по полученной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хмельнюк, М. Г. Современные технологии осушения воздуха / М. Г. Хмельнюк, Д. И. Важинский, Н. В. Жихарева // Холодильная техника и технология. – 2014. – № 3. – С. 16.
2. Иванов, С. И. Конденсационный осушитель воздуха в животноводческом помещении в зимнее время / С. И. Иванов, Ю. И. Волошин, В. Г. Игнатенков, Г. Н. Самарин // Известия Великолукской ГСХА. – 2015. – № 3. – С. 28, 31.
3. Котзаогланиан, П. Пособие для ремонтника / П. Котзаогланиан; пер. с фр. под ред. В. Б. Сапожникова. – М.: Эдем, 2007. – 823 с.
4. Капля, В. И. Расчет режима работы элемента Пельтье, используемого в качестве охладителя в модуле осушки проб воздуха / В. И. Капля, А. Г. Бурцев, С. А. Андриянов, Е. К. Соболева // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – С. 4.

УДК 658.5.012.14

И. А. Гуцин, А. Р. Авдеев, А. А. Швеи, А. В. Дроботов
**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 3D ПЕЧАТНЫХ
ИЗДЕЛИЙ НА ИХ ПРОЧНОСТЬ**

Волгоградский государственный технический университет
E-mail: app@vstu.ru

Представлен анализ способов постобработки готовых изделий, изготовленных по технологии FDM, проведен обзор коммерческих устройств, производящих такую химическую обработку. Произведено исследование влияния химической обработки 3D печатных изделий на их прочность.

Ключевые слова: технология объемной печати, метод послойного наплавления, обработка изделий, химическая обработка.

I. A. Gushhin, A. R. Avdeev, A. A. Shvets, A. V. Drobotov
**THE INFLUENCE OF CHEMICAL PROCESSING OF
3D PRINTED PARTS ON THEIR STRENGTH**

Volgograd State Technical University

The analysis of processing methods of the finished parts made by FDM technology is showed, the review of the commercial devices providing chemical processing of parts is presented. The influence of chemical processing of 3D printed parts on their strength characteristics is studied.

Keywords: 3D printing technology, Fused Deposition Modeling (FDM), parts finishing, chemical finishing.

Одна из проблем готовых изделий, произведенных с помощью 3D печати по популярной технологии FDM [1], является высокая шероховатость (волнистость) поверхностей изделий. Так как сама технология основана на последовательном нанесении слоев пластика, то полностью избежать этого дефекта невозможно. Одним из способов сделать его менее заметным является повышение вертикального разрешения принтера (т. е. нанесения более тонких слоев), но это приводит к многократному увеличению времени печати, что экономически не выгодно. Поэтому часто прибегают к другим способам снижения волнистости поверхности, основывающихся на двух особенностях термопластиков: способности плавиться под воздействием высоких температур и размягчаться при кон-

такте с соответствующими растворителями. Как правило, термообработка не дает хороших результатов – регулировать нагрев поверхности достаточно сложно, что иногда приводит к вскипанию пластика, проседанию или выделению токсичных паров [2].

Часто используемой является химическая обработка, однако и она сопряжена с определенными сложностями. Кроме технологических проблем, актуальна проблема реагентов – разные пластики реагируют с разными растворителями. Например, ацетон прекрасно растворяет ABS-пластик, то на PLA-пластик он почти не действует. Поэтому основные методы химического сглаживания связаны именно с ABS-пластиком ввиду его высокой популярности и доступности подходящих растворителей.

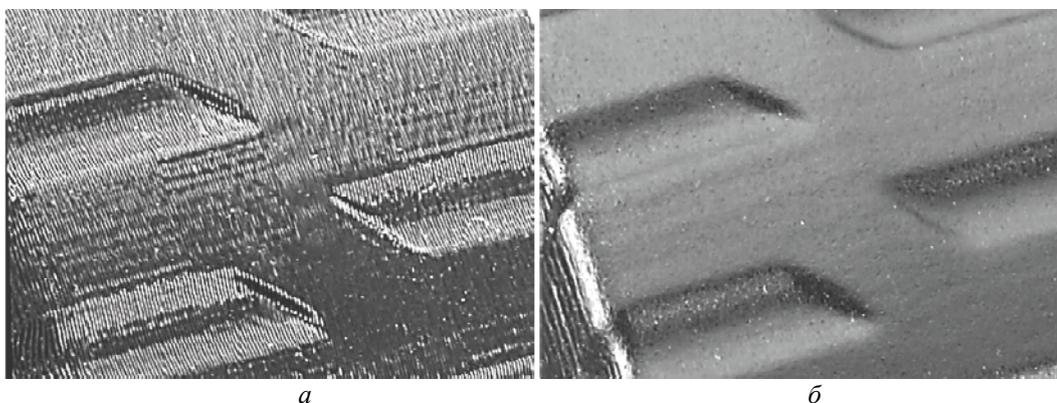


Рис. 1. Поверхность изделия:
a – до обработки; *б* – после обработки

Выдержка модели из ABS-пластика в неразбавленном ацетоне около 10 с вполне достаточна для растворения внешнего слоя модели. Конкретное время выдержки может варьироваться в зависимости от качества исходной модели и концентрации ацетона. Результат обработки показан на рис. 1. Хотя этот метод достаточно быстр, регулировать процесс сложно. При излишней выдержке модель просто начнет растворяться, быстро теряя мелкие черты. Кроме того, загрязнение ацетона пластиком одного цвета может привести к появлению разводов на последующих моделях, окунаемых в тот же раствор.

Более контролируемым процессом является обработка ацетоновыми парами. Как при погружении моделей в ацетон, так и при обработке парами следует учитывать толщину стенок моделей. Оболочка должна быть достаточно толстой, чтобы выдержать растворение внешнего слоя. Это приводит к потере тонких элементов и к сглаживанию острых углов.

Существуют коммерчески производимые установки для обработки парами как ацетона, так и других растворителей – дихлорметана, бутанона и др. Компания Stratasys производит установку Finishing Touch [3], способную обрабатывать любые вариации ABS-пластика до качества, практически неотличимого от моделей, произведенных литьем под давлением. Finishing Touch работает по похожему принципу с техникой обработки ацетоном, но более оптимально и безопасно. Устройство состоит из двух отсеков. Сначала ABS модель помещают в холодильную камеру, чтобы она охладилась до низкой температуры, затем ножной переключатель открывает второй отсек, в который

опускается охлажденная модель. Во втором отсеке содержится под высоким давлением пары сложного химического раствора Vertrel. Горячий пар мгновенно конденсируется и равномерно проникает во все труднодоступные места охлажденной модели – и затем слегка смягчает ABS. Недостаток данного устройства – стоимость (около \$30000) [4]. Также данное оборудование имеет крупные габариты, что снижает удобство его применения.

Разработчики Sky Tech MagicBox [5] заявляют, что их устройство совместимо не только с ABS-пластиком, но и с PLA. Правда, у них применяется все того же ацетон, несмотря на невысокую растворимость PLA в этом растворителе. Стоимость устройства составляет \$400.

Также решение для улучшения поверхности готового изделия предлагает компания Polymaker. Их устройство Polysher [6] представляет собой аэрозольную камеру и рассчитано на работу с собственным материалом на основе поливинилбутирала (PVB) под названием PolySmooth, реагирующим на алкогольный аэрозоль. Устройство достаточно компактное, максимальные размеры изделий, подвергаемых обработке, составляет 150x150x180 мм. Стоимость устройства – \$300, а 500 г материала для печати – \$40.

Помимо повышения качества поверхности возникает вопрос изменения прочности обработанного изделия. Нами были произведены испытания на прочность химически обработанных изделий из ABS-пластика без красителей. Сравнивались три типа изделий: без обработки, изделие, обработанное парами ацетона, а также изделие, слой которого смачивался ацетоном в процессе печати (рис. 2).

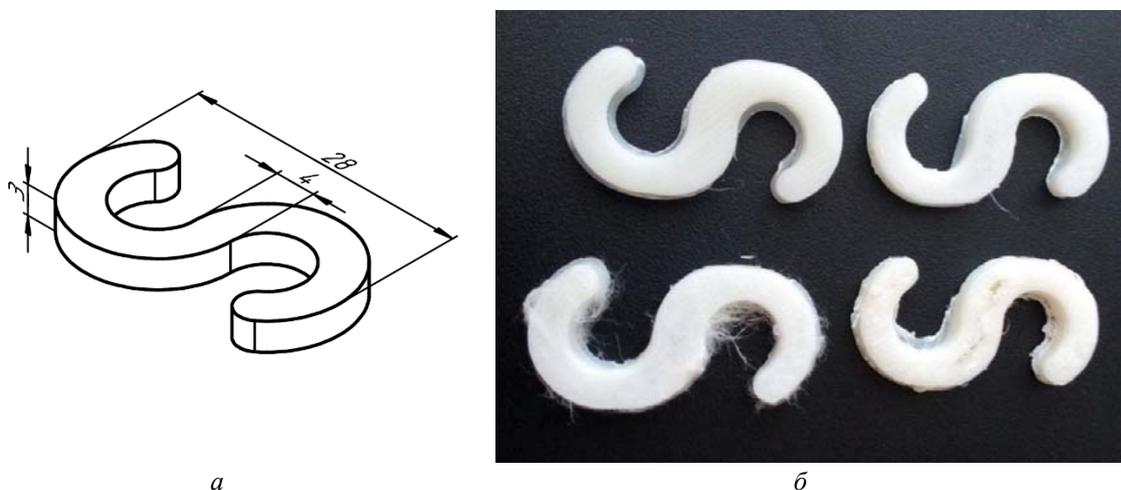


Рис. 2. Тестовые изделия для испытания на прочность:
а – модель; б – изделие

Печать изделий производилась на 3D принтере с параллельной кинематикой (дельта-робот) Kossel Mini [1] (рис. 3). Температура сопла при печати составляла 230 °С, нагреваемой платформы – 100 °С. Толщина печатаемого слоя составляла – 0.2 мм, плотность внутреннего заполнения – 40 % и 100 %. После обработки ацетоном изделие выдерживалось на открытом воздухе до полного высыхания.



Рис. 3. 3D принтер, использованный для печати образцов

Максимальная нагрузка, выдерживаемая изделием (рис. 2) на разрыв до разрушения, имеющим внутреннее заполнение 40 % составила в среднем по результатам 5 экспериментов:

- а) изделие без обработки – 80 Н;
- б) для обработанных парами ацетона – 54 Н;
- в) для изделий, слои которых смачивались во время печати – 37 Н.

Максимальная нагрузка, выдерживаемая изделием с внутренним заполнением 100% составила в среднем:

- а) изделие без обработки – 137 Н;
- б) для обработанных парами ацетона – 112 Н;
- в) для изделий, слои которых смачивались во время печати – 85 Н.

Исходя из вышеописанных результатов, можно сделать вывод, что химическая обработка изделий, изготовленных по технологии FDM 3D печати, с целью снижения шероховатости поверхности, приводит к разупрочнению данных изделий. Поэтому не рекомендуется использовать обработку реагентами для изделий, которые будут испытывать нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Самойлов, В. Б.* Выбор 3d принтера с параллельной кинематикой для самостоятельной работы студентов // *Машиностроение и компьютерные технологии.* 2017. № 10. С. 57–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30767134> (дата обращения: 20.02.2018).
2. *Обработка распечатанных 3D-моделей.* 3Dtoday - Сообщество владельцев 3D-принтеров. Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/processing_models/ (дата обращения: 20.02.2018).
3. *Stratasys Finishing Touch.* Stratasys Ltd. Режим доступа: <http://www.stratasys.com/de/3d-drucker/finishing-touch-smoothing-station> (дата обращения: 20.02.2018).
4. *Постобработка и полировка изделий из ABS-пластика.* 3DPrinter. Режим доступа: <https://3dprinter.ua/postobrabotka-i-polirovka-izdelij-iz-abs-plastika/> (дата обращения: 20.02.2018).
5. *Sky-Tech Magicbox.* Sky-Tech. Режим доступа: <http://shop.sky-tech.com.tw/index.php/magicbox.html> (дата обращения: 20.02.2018).
6. *Polymaker Polysher & PolySmooth.* Polymaker. Режим доступа: <https://www.kickstarter.com/projects/polymaker/polysmooth-and-polysher-3d-prints-without-layers/description> (дата обращения: 20.02.2018).

УДК 004.65

В. В. Дронин, А. В. Дроботов, И. А. Гуцин

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ СОСТАВЛЕНИЯ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: vovadronin@yandex.ru

Оформление фондов оценочных средств, предназначенных для оценивания качества усвоения материала студентами, занимает много времени. В статье рассматривается способ автоматизации данного процесса. Проведен анализ и выбрана платформа для решения задачи. Приведена структурная схема базы данных, которая реализована в виде прикладного решения, позволяющего преподавателю значительно сократить время оформления документации.

Ключевые слова: фонд оценочных средств, рабочая программа, 1С:Предприятие, прикладное решение, база данных.

V. V. Dronin, A. V. Drobotov, I. A. Gushhin

AUTOMATION SYSTEM FOR COMPILATION OF ASSESSMENT TOOLS FUNDS

Volgograd State Technical University

Compilation of funds evaluation tools, used to assess the quality of material learning by students, takes a lot of time. The article considers the method of automating this process, also the analysis was carried out and the platform was chosen for the realization of the objectives. The block diagram of the database was presented, that was implemented in the form of the application solution. It will allow the teachers to significantly reduce the time for documentation preparing.

Keywords: Fund of assessment tools, work program, 1С-enterprise, application solution, data base.

Оценка качества подготовки выпускников включает текущий контроль, промежуточную и итоговую аттестации. Для проведения аттестации обучающихся и выпускников на соответствие их знаний и умений рубежным или завершающим требованиям соответствующей образовательной программы разрабатывают фонды оценочных средств (ФОС), которые утверждает руководство учебного заведения. ФОС состоит из нескольких разделов: перечня и показателей компетенций, критериев оценивания, а также методических материалов, определяющих процедуры оценивания.

Некоторые разделы ФОС дублируют похожие разделы рабочей программы с небольшими дополнениями. Поэтому актуальной становится задача автоматизации процесса составления ФОС. Это позволит облегчить труд и помочь преподавателю в формировании отчета, а также сократить время разработки.

Для выбора наиболее подходящей платформы для автоматизации документооборота были рассмотрены самые распространенные и надежные системы: Docsvision, Directum, Optima WorkFlow, 1С: Предприятие.

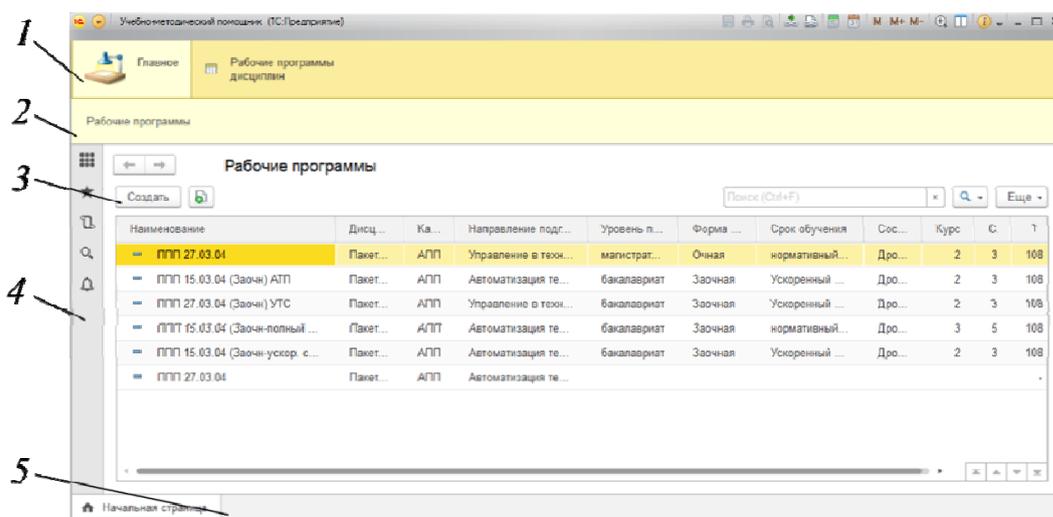


Рис. 1. Внешний вид платформы 1С:Предприятие

Наиболее подходящей системой признана платформа 1С: Предприятие. На рис. 1 показан внешний вид выбранной платформы. Она содержит панель разделов 1, панель функций текущего раздела 2, кнопку «Создать» 3, панель инструментов 4, панель открытых окон 5. Решение от компании 1С выигрывает в силу большей распространенности и относительного удобства в работе, а также возможна организация веб-сервера, что позволит пользователю работать удаленно.

Для создания прикладного решения спроектирована структура БД (рис. 2). Она состоит из множества таблиц с данными. Таблицы соединены между собой с помощью связей «один ко многим».

Печать ФОС реализуется с помощью макета (рис. 3) табличного документа, в котором есть постоянные и переменные части. Постоянные – одинаковы для всех рабочих программ. Переменные – варьируются в зависимости от введенных данных.

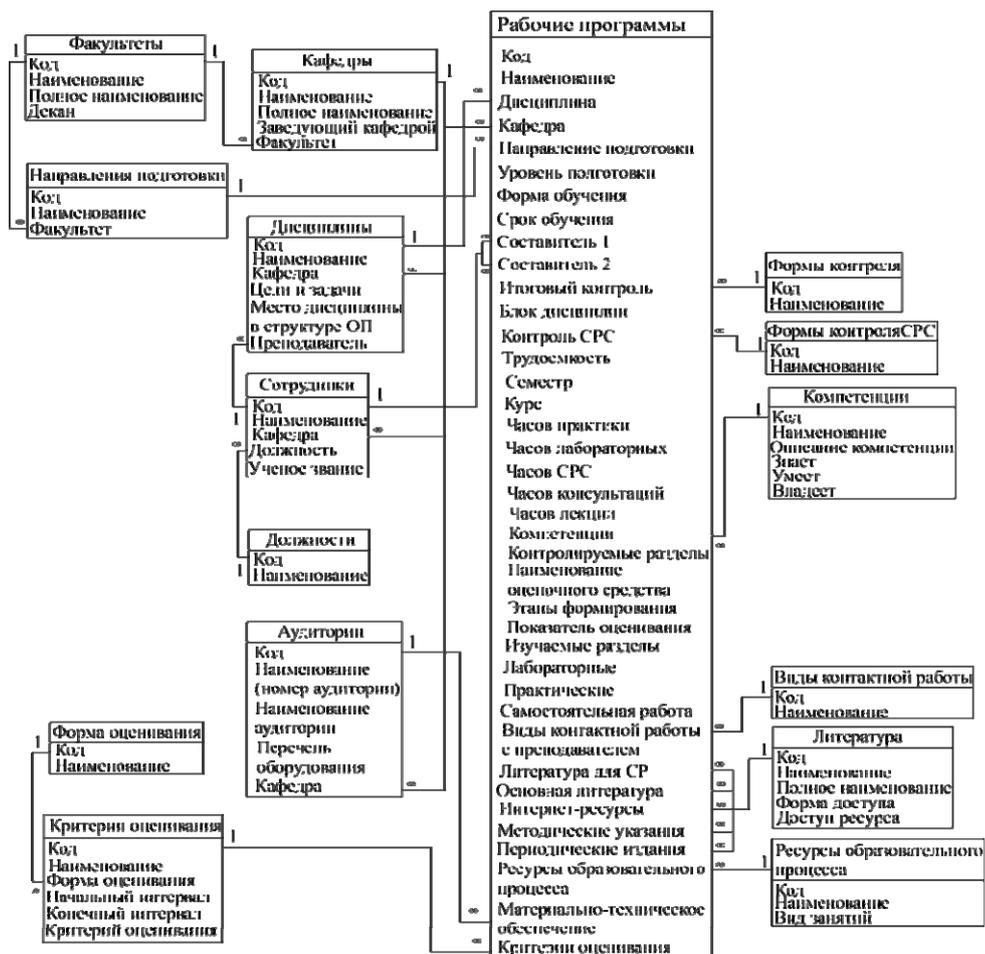


Рис. 2. Структура базы данных

Отчет ФондОценочныхСредств: Макет					
	1	2	3	4	5
ПаспортТаб	41	Паспорт			
	42	фонда оценочных средств			
	43	по дисциплине			
	44	<<[Дисциплина]>>			
	45	(наименование дисциплины)			
	46				
	47	<Таблица [НомерТаблицы] – Перечень компетенций (элементов компетенций), формируемых в результате освоения дисциплины (модуля)>			
	48				
	49	№ п/п	Код контролируемой компетенции	Формулировка контролируемой компетенции	Контролируемые разделы (темы) дисциплины (модуля)
	50	Номер	КодКомп	<ФормулировкаКомп>	<Разделъ>
ПоказОцен	51				
	52	Показатели и критерии оценивания компетенций, описание шкал оценивания			
	53				
	54	<Таблица [НомерТаблицы] – Показатели оценивания компетенций>			
	55	№ п/п	Код контролируемой компетенции	Показатель оценивания (знания, умения, навыки)	Контролируемые разделы (темы) дисциплины (модуля)
	56	Номер	КодКомп	<ПоказОцен>	<Разделъ>
КритОцен	57				
	58	<Таблица [НомерТаблицы] – Критерии оценивания по оценочному средству "[ТаблицаКритОценив]">			
	59	Шкала оценивания (интервал баллов)		Критерий оценивания	

Рис. 3. Макет ФОС

После запуска приложения, разработчику открывается форма (рис. 1), в виде списка рабочих программ. На ней отображается основная информация разрабатываемой рабочей программы и ФОС. Пользователь может создать рабочую программу, нажав на соответствующую

кнопку или изменить существующую, дважды кликнув на ней.

Для внесения изменений в созданную новую или существующую рабочую программу, разработчику доступна форма. На рис. 4 представлен ее внешний вид.

Рис. 4. Форма для внесения изменений в рабочую программу

Форма состоит из множества полей и таблиц 2 для внесения основной информации рабочей программы и фонда оценочных средств. Также на ней располагается командная панель 1 для записи и вывода внесенной информации в отчет. При нажатии на кнопки «Печать рабочей программы» либо «Печать ФОС», заполняются информацией соответствующие макеты. В дальнейшем их можно сохранить на ПК, либо напечатать.

Предложенная программа позволяет сократить время оформления фонда оценочных средств в 2 раза. В будущем планируется ее внедрение в учебный процесс университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Формирование фондов оценочных средств. [Электронный ресурс] // Сайт Лекция. URL: <http://www.lektisia.com>.
2. Самоучитель 1С:Предприятие 8.3. [Электронный ресурс] // Сайт GOODWILL. URL: <http://www.programmist1s.ru>.

УДК 621.757:519.87

А. Ф. Земцов, И. Е. Грязнов, С. Г. Поступаева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КЛАССИЧЕСКОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА С «НЕЧЕТКИМИ» ЕГО РАЗНОВИДНОСТЯМИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведены разработка, исследование и анализ алгоритмов систем автоматического регулирования в среде программирования *MatLab/Simulink*. Выявлены достоинства и недостатки применения классического и нечеткого *PID*-регулирования для объектов различных классов путем анализа и сравнения их переходных характеристик.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, нечеткая логика, нечеткий регулятор, классы объектов, транспортное запаздывание.

A. F. Zemtsov, I. E. Gryaznov, S. G. Postupaeva

COMPARATIVE ANALYSIS AND INVESTIGATION OF THE WORK OF THE CLASSICAL PID REGULATOR WITH «FUZZI» ITS VARIETY

Volgograd State Technical University

The development, research and analysis of algorithms of automatic control systems in the programming environment MatLab/Simulink are carried out. The advantages and disadvantages of using classical and fuzzy PID control for objects of various classes by analyzing and comparing their transient characteristics are revealed.

Keywords: PID controller, fuzzy logic, fuzzy controller, object classes, transport lag.

Управление при помощи Пропорционально-Интегрально-Дифференциального регулятора (далее ПИД-регулятора) показывает хорошие результаты настройки систем автоматического управления. Однако в сложных моделях расчет параметров по формулам не дает оптимальной настройки регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основываются на сильно упрощенных моделях объекта [2]. Поэтому, в настоящее время наблюдается интенсивное развитие применения нечеткой логики для цели управления [1].

В большинстве случаев технология нечеткого моделирования применяется для синтеза систем управления при недостаточной информации об объекте управления, неточном и не

полном описании решаемой проблемы, поскольку не требует для синтеза регуляторов модели объектов управления опираясь на опыт операторов или потребителей [2].

К таким системам можно отнести системы управления с обратной связью содержащие в себе транспортное запаздывание. Переходные характеристики объектов управления (ОУ) в таких системах представлены на рисунке.

Можно заметить, что при отношении $\frac{\tau}{T} = 0$

(рис. 1, а) переходная характеристика совпадает с характеристикой аperiodического звена, а при увеличении отношения ОУ начинает вести себя как колебательное звено (или аperiodическое звено второго порядка).

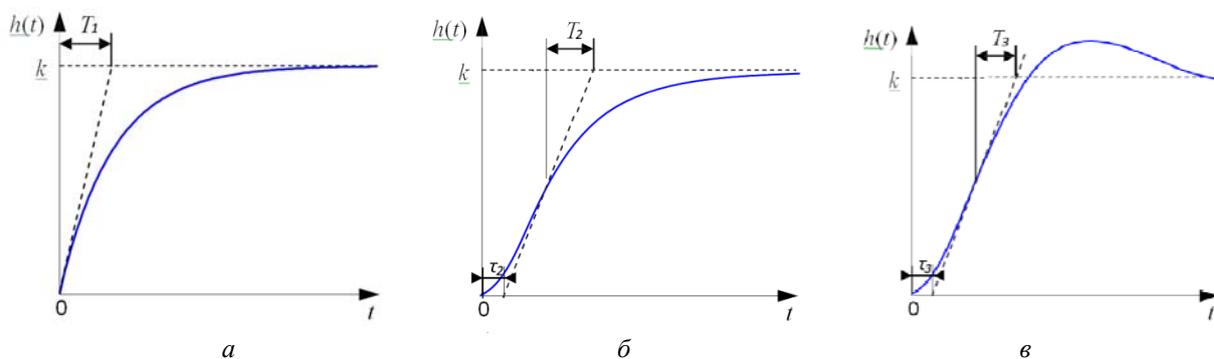


Рис. 1. Влияние отношения транспортного запаздывания τ к постоянной времени T

на переходную характеристику аperiodического звена, где $\frac{\tau_1}{T_1} < \frac{\tau_2}{T_2} < \frac{\tau_3}{T_3}$

Для получения моделей ОУ с данными характеристиками в среде *MatLab/Simulink* было произведено последовательное соединение аperiodических звеньев с дальнейшей группировкой в блоки (команда *subsystems*) для удобства дальнейшего использования и читаемости (рис. 2).

Для исследования и анализа эффективности классического и нечеткого алгоритма регулирования была разработана модель системы автоматического управления, представленная на

рис. 3 и 4. Здесь для каждого объекта управления имеется свой регулятор, осциллограф и обратная связь. Из общего задающего воздействия и обратной связи каждого объекта вычисляются сигналы ошибки, которые приходят на вход в регулятор. Осциллографы на выходе из объектов снимают показания для дальнейшего анализа, а на контуре обратной связи к сигналу прибавляется случайный сигнал (от -5 до 5), символизирующие нагрузку (потребителя) и помехи.

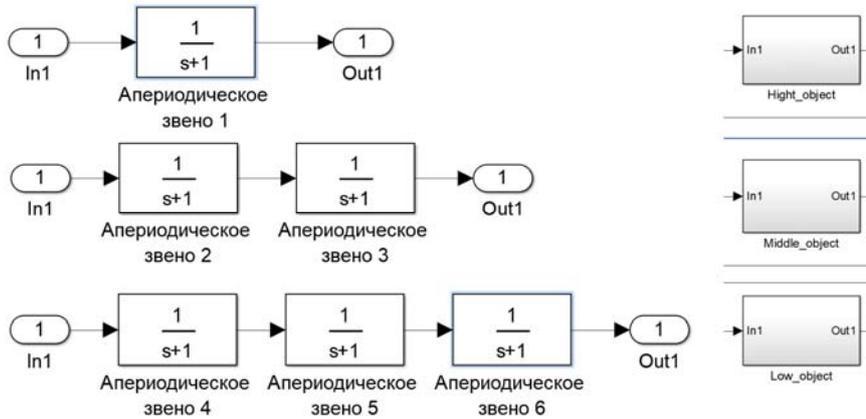


Рис. 2. Построение звеньев с необходимыми переходными характеристиками

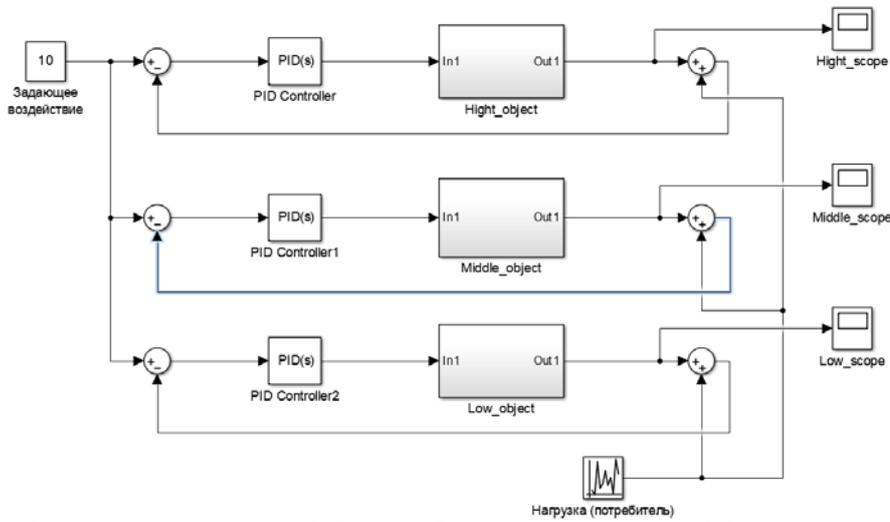


Рис. 3. Структурная схема САУ тремя объектами с классическим PID-регулятором

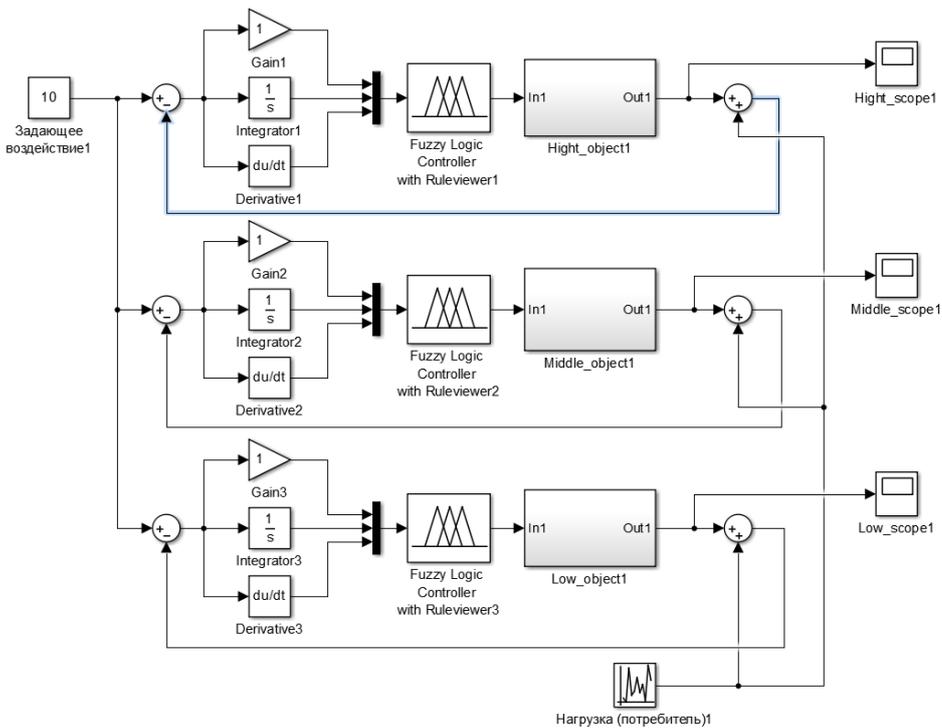


Рис. 4. Структурная схема САУ тремя объектами с нечетким PID-регулятором

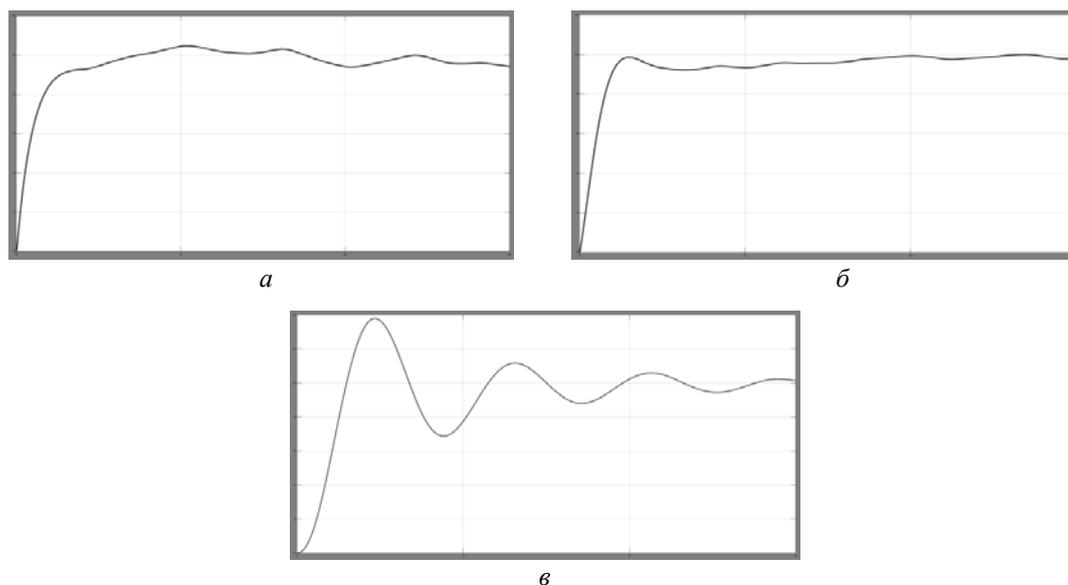


Рис. 5. Результаты моделирования переходной характеристики для объектов различных классов с PID-регулятором

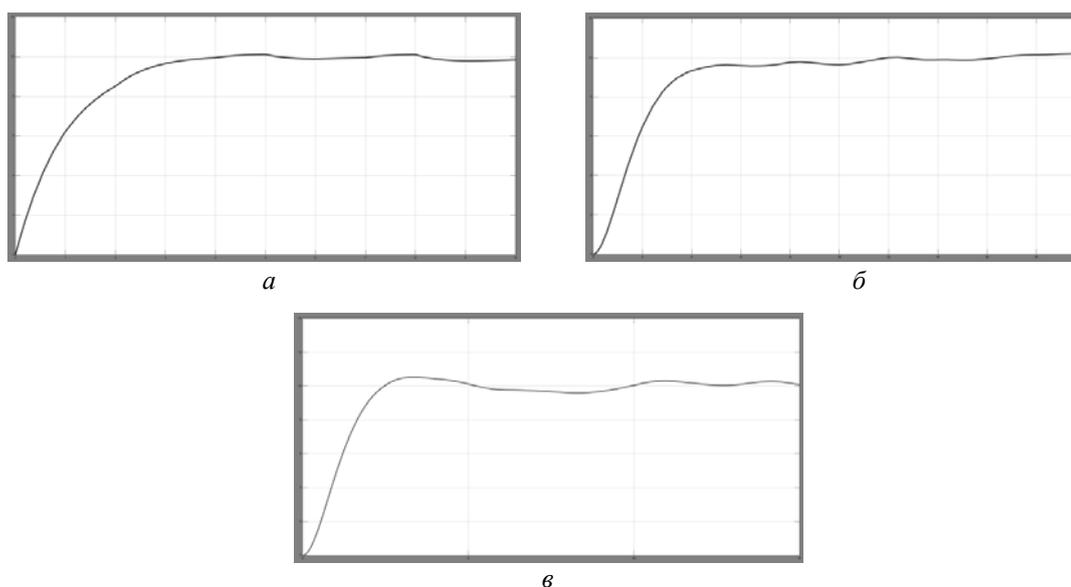


Рис. 6. Результаты моделирования переходной характеристики для объектов различных классов с нечетким регулятором

Как видно из графиков (рис. 5 и 6), PID-регулятор прекрасно справился с задачей для объектов, соответствующих характеристикам (а) и (б) (рис. 1, а, б). Для объекта (в) (с большим отношением $\frac{\tau}{T}$) переходной процесс приводит к гармонически затухающим колебаниям.

С использованием нечеткого регулятора переходная характеристика получается более сглаженная для любого класса описанных выше объектов. Однако, стоит отметить, что также увеличивается время перехода для объектов (а)

и (б), по сравнению с «классическим» PID-регулятором.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование классических и нечетких ПИД-регуляторов для нестационарных объектов управления / В. И. Копылов, Д. И. Муравьев, В. Г. Коломышев, Г. И. Рустамханова // Издательский Дом «Академия Естественных наук». Сер. Фундаментальные исследования. – Пенза, 2016. – № 11–3. – С. 532–536.
2. Евгенов, А. А. Нейросетевой регулятор системы управления квадрокоптером [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. – Режим доступа : <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10222/>

УДК 621. 91.02

А. В. Капитанов¹, Е. Г. Крылов², А. М. Макаров², Н. В. Козловцева¹

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ*

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»²Волгоградский государственный технический университетE-mail: a.kapitanov@stankin.ru¹; app@vstu.ru²

В статье изложена методика расчета баланса точности для чистовой обработки деталей на станках с ЧПУ. Приведено математическое описание составляющих поля рассеивания размеров при обработке тел вращения. Разработан алгоритм коррекции, обеспечивающий получение наладочного размера инструмента с заданной точностью.

Ключевые слова: поле рассеивания, размерная точность, чистовая обработка, станок с ЧПУ.

А. V. Kapitanov¹, E. G. Krylov², A. M. Makarov², N. V. Kozlovtsva¹

IMPROVEMENT IN ROTATIONAL MACHINING ACCURACY ON CNC MACHINES

¹Moscow State University of Technology «STANKIN»²Volgograd State Technical University

In the article the technique of calculation of accuracy balance for finishing on CNC machines is stated. A mathematical description of the dispersion field components for the rotational machining is given. An algorithm of correction has been developed. It provides obtaining the tool setting size with a given accuracy.

Keywords: dispersion field, dimensional accuracy, finishing, CNC machine.

Повышение эффективности станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного гибкого обрабатывающего производства является комплексной задачей [1,2], в состав которой входит задача обеспечения заданной точности при чистовой обработке партий деталей малой серийности [3].

Технологические возможности станков с ЧПУ позволяют организовать высокую концентрацию операций и обеспечить обработку заготовки с одного установка. Точность станков с ЧПУ нормируется и выявляется в ходе соответствующих проверок общих для всех типов металлорежущих станков. Методы обеспечения точности и управления точностной надежностью станочного оборудования рассмотрены в работах [4,5].

Одним из основных показателей точности станка с ЧПУ является дискретность отсчета по координатам, определяющая минимальное перемещение рабочих органов станка при выведении их в наладочное положение. Следует отметить, что величина дискретности является лишь одной составляющей поля рассеивания размеров δ_p , поэтому фактическая точность обработки по координатам на станке с ЧПУ ниже величины дискретности. Размеры и форма заготовок, качество инструментального материала [6], способы установки и последовательность обработки поверхностей [7], износ режущего инструмента [8], жесткость инструментальной системы [9] оказывают существенное влияние на точность обработки.

По аналогии с неавтоматизированными станками баланс точности обработки на станке с ЧПУ определяется из выражения

$$\delta_p = k \sqrt{\varepsilon_{уст}^2 + \delta_{p,настр}^2 + \delta_{p,чпу}^2 + \delta_{p,y}^2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{уст}$ – поле погрешности установки; $\delta_{p,настр}$ – поле погрешности настройки; $\delta_{p,чпу}$ – поле погрешности системы ЧПУ; $\delta_{p,y}$ – поле погрешности размеров от упругих деформаций.

Поле погрешности установки оказывает значительное влияние на величины погрешностей обрабатываемых поверхностей детали

$$\varepsilon_{уст} = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_n^2}, \quad (2)$$

где ε_6 – поле погрешности базирования, возникающее от несовпадения технологических и конструкторских баз; ε_3 – поле погрешности закрепления, возникающее от колебания величины усилия закрепления и качества поверхностного слоя заготовки; ε_n – поле погрешности, вызываемое погрешностью изготовления приспособления, установкой его элементов и их износом при эксплуатации.

Для уменьшения составляющих $\varepsilon_{уст}$ при разработке технологических процессов на станках с ЧПУ следует стремиться к совмещению технологических и конструкторских баз, в этом случае $\varepsilon_6 = 0$. Величину поля ε_3 уменьшают за счет предварительной обработки установочных поверхностей детали. Составляющая погрешность ε_n может быть устранена соответствующей настройкой станка.

© Капитанов А. В., Крылов Е. Г., Макаров А. М., Козловцева Н. В., 2018

* Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-6629.2018.9.

При обработке заготовок типа валов на станках с ЧПУ токарной группы поле погрешности установки $\epsilon_{уст}$ зависит в основном от точности изготовления центровых отверстий. Допуск на глубину центровых гнезд входит в допуск осевых размеров вала как погрешность базирования. Отклонение от круглости отверстий центровых гнезд влияет на точность формы обрабатываемых поверхностей вала в поперечном сечении.

Погрешность настройки $\delta_{р.настр}$ относится к разряду доминирующих погрешностей. Режущие инструменты предварительно устанавливаются вне станка в инструментальные блоки, а затем на станке настраиваются на нулевую точку, являющуюся началом отсчета цикла обработки.

В этом случае поле погрешности настройки зависит от четырех составляющих:

$$\delta_{р.настр} = k\sqrt{\delta_{рнн}^2 + \delta_{рнб}^2 + \delta_{рнф}^2 + \delta_{рнл}^2}, \quad (3)$$

где $\delta_{рнн}$ – поле погрешности предварительной настройки инструмента в блоке; $\delta_{рнб}$ – поле погрешности установки блока на станке; $\delta_{рнф}$ – поле погрешности фиксации поворотного резцедержателя или револьверной головки станка; $\delta_{рнл}$ – поле погрешности измерений при настройке станка.

Погрешность размеров детали, вызванная погрешностью $\delta_{р.чпу}$ системы ЧПУ, складывается из составляющих, связанных с погрешностями подготовки управляющих программ $\delta_{рп}$ и их воспроизведения $\delta_{рв}$. Первая составляющая зависит от погрешностей программирования и интерполяции

$$\delta_{рп} = k\sqrt{\delta_{рпп}^2 + \delta_{рпи}^2}, \quad (4)$$

где $\delta_{рпп}$ – поле погрешности программирования; $\delta_{рпи}$ – поле погрешности интерполяции.

Вторая составляющая образуется погрешностями привода, механизма подачи и позиционирования рабочих органов станка

$$\delta_{рв} = k\sqrt{\delta_{рв.пр}^2 + \delta_{рвп}^2 + \delta_{рв.поз}^2}, \quad (5)$$

где $\delta_{рв.пр}$ – поле погрешности привода станка; $\delta_{рвп}$ – поле погрешности механизма подачи; $\delta_{рв.поз}$ – поле погрешности позиционирования рабочих органов станка.

Погрешность программирования $\delta_{рпп}$ состоит из погрешностей аппроксимации, округления результатов вычислений и влияния радиуса при вершине резца. Если учесть возможность их образования, то частично их можно исключить из баланса точности.

Погрешность привода станка $\delta_{рв.пр}$ определяется точностью системы программного управления и конструкцией привода подач рабочих органов станка. Погрешность механизма подачи $\delta_{рвп}$ обусловлена погрешностью изготовления ходового винта, наличием мертвых ходов шариковинтовой пары и накопленной ошибкой зубчатых колес редукторов и передач по отношению к датчикам обратной связи.

Погрешность позиционирования рабочих органов станка $\delta_{рв.поз}$ возникает в результате нестабильности сил и моментов трения в направляющих при пуске и остановке станка.

Расчет баланса точности чистовой обработки на станках с ЧПУ позволяет определить отклонение $\delta_{р}$ фактического значения $L_{ф}$ наладочного размера от заданного значения $L_{з}$. Корректировка наладочного размера до значения $L_{з}$ осуществляется следующим образом (рис. 1). После обработки первой детали из партии производится расчет баланса точности, и полученная величина $\delta_{р}$ сравнивается с величиной поля допуска наладочного размера $\delta_{нр}$.

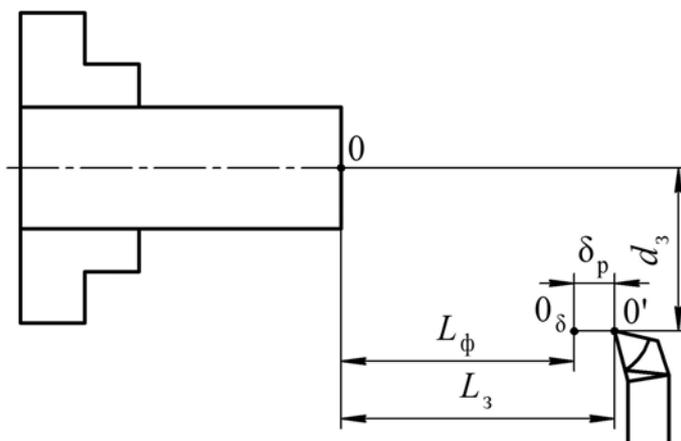


Рис. 1. Схема поднастройки наладочного размера

В случае если δ_p превышает $\delta_{нр}$, то система управления определяет число корректирующих импульсов, необходимое для обеспечения равенства фактического и заданного наладочного размера, которое отрабатывается приводами подачи станка. Алгоритм коррекции показан на рис. 2.

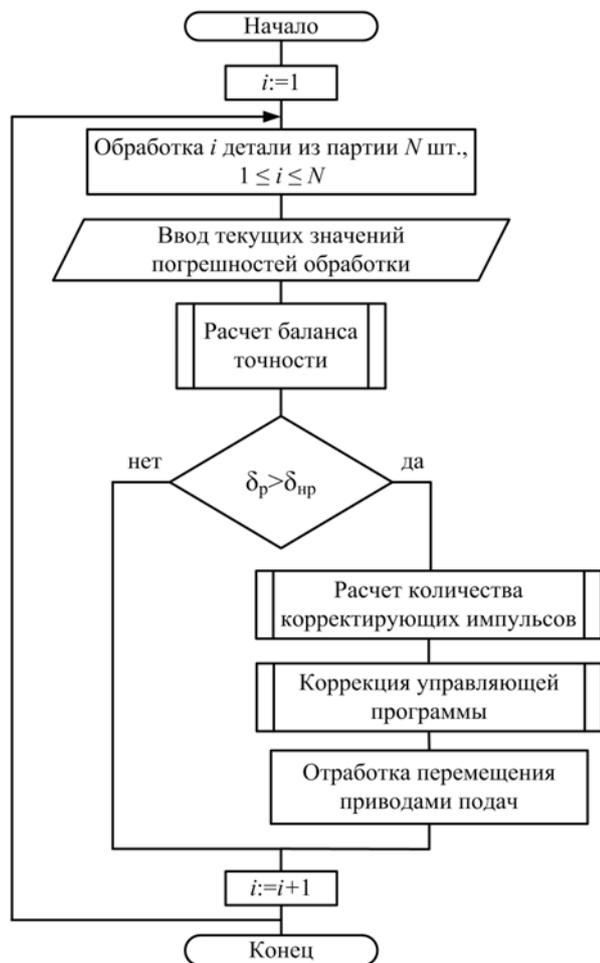


Рис. 2. Алгоритм коррекции наладочного размера инструмента

Коррекция наладочного положения инструмента и траектории его перемещения необхо-

дима при обработке партии одинаковых деталей, когда есть вероятность превышения допусков на размеры детали суммарной погрешностью обработки. Использование адаптивных систем управления позволяет решить эту задачу и тем самым повысить точность обработки.

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 наукоёмкие технологии (ТНТ), 2016. – 316 с.
2. Капитанов, А. В. Анализ закономерностей развития перенастраиваемых производственных систем многоменклатурного производства / А. В. Капитанов, В. Г. Митрофанов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – С. 61–66.
3. Неизвестных, А. Г. Анализ точности обработки деталей на станках с ЧПУ / А. Г. Неизвестных, Е. Г. Крылов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – Вып. 4. – С. 89–91.
4. Проблемы точности и эффективности современных металлорежущих станков / В. В. Бушуев, А. П. Кузнецов, Ф. С. Сабиров [и др.] // СТИН. – 2016. – № 2. – С. 6–16.
5. Кузнецов, А. П. Вероятностные методы оценки и управления точностной надежностью металлорежущих станков при тепловых воздействиях / А. П. Кузнецов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 4. – С. 72–81.
6. Крылов, Е. Г. Рациональный выбор режущего инструмента в автоматизированном производстве / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 10. – С. 3–6.
7. Смирнова, Е. Н. Проблема автоматизированного проектирования технологических процессов с учетом технологической наследственности / Е. Н. Смирнова, Е. Г. Крылов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – Вып. 7. – С. 100–102.
8. Крылов, Е. Г. Автоматизированная система контроля состояния режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, Н. В. Козловцева // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 10. – С. 47–51.
9. Алехин, А. Г. Increasing the contact rigidity in shank attachment of cutting tools / А. Г. Алехин, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 11. – С. 855-858.

УДК 004.8:621.783.223

М. П. Кухтик, А. Н. Воробьева

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Разработан алгоритм нечеткого логического вывода для процесса нагрева заготовок в методической печи. Построен график функции принадлежности температуры нагрева слябов. Сформулированы нечеткие правила для лингвистических переменных «Температура слябов» и «Степень открытия заслонки».

Ключевые слова: методическая печь, нечеткая логика, функция принадлежности, лингвистическая переменная.

M. P. Kukhtik, A. N. Vorob'eva

CONTROL OF REHEATING FURNACE OPERATION ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

Volgograd State Technical University

The algorithm of fuzzy logic output for stocks' heating process in a reheating furnace has been developed. The graph of membership function for slabs' heating temperature has been plotted. Fuzzy rules for linguistic variables «Temperature of slabs» and «Rate of gate's opening» have been formulated.

Keywords: reheating furnace, fuzzy logic, membership function, linguistic variable.

Нагрев стали в методических печах перед обработкой давлением оказывает существенное влияние на формирование качественных характеристик конечной металлопродукции и экономических показателей работы металлургического предприятия. С увеличением производительности прокатного оборудования и повышением требований к качеству изделий целесообразным становится применение интеллектуальных систем управления на базе нечеткой логики. Нечеткое управление оказывается особенно полезным, когда в описании технических систем присутствует неопределенность, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов. Это соответствует условиям нагрева заготовок в методических печах: поступление слабов с переменными геометрическими и теплофизическими параметрами, переменный темп прокатки и влияние на процесс нагрева возмущающих воздействий и технологических ограничений. В области автоматизации технологических процессов нечеткие логические регуляторы позволяют реализовать системы управления с новыми свойствами, которых технически трудно достигнуть при использовании методов классической теории автоматического регулирования [1–3].

Регуляторы, построенные на базе нечеткой логики, в ряде случаев способны обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами. В частности, становится возможным понижать или повышать температуру слабов в зависимости от текущей ситуации путем подбора значений для настройки нечетко регулятора. Здесь нечеткая логика используется в качестве эксперта, выносящего решение на основе многолетнего опыта и учитывающего множество факторов. Это позволяет разработать новые, более адаптивные методики управления процессами в различных системах.

Нечеткий логический вывод осуществляется за следующие четыре этапа: фаззификация, логический вывод, композиция и дефаззификация (приведение к четкости). Выбор вывода определяется структурой используемой базы продукционных правил, так как результат вывода теплового состояния зоны печи не имеет численного выражения.

Исходя из известного устройства методической печи, способа нагрева слабов посредством газовых горелок [4, 5] и принципов построения нечетких систем, была сформирована блок-схема алгоритма нечеткого логического вывода (рис. 1).

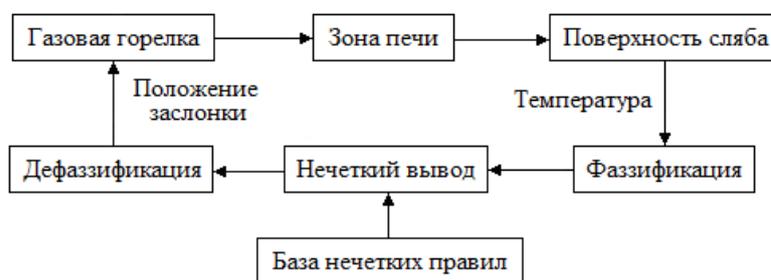


Рис. 1. Блок-схема алгоритма нечеткого логического вывода

Затем происходил этап разработки лингвистических правил. Как уже было сказано ранее, конфигурация системы нечеткой логики основывается на базе нечетких продукций. Этот способ представляет собой набор нечетких выводов «если (посылка), то (заключение)» и является

наиболее универсальным [6]. Состояние каждой зоны печи характеризуется лингвистическими терминами и определяется по входным параметрам, имеющимся внутри печи. Проведем анализ зависимостей. Из требований к температуре нагрева слабов известно, что существует деление

на температурные интервалы по степени допустимости. Данные интервалы показаны на графике функции принадлежности (рис. 2).

Управление температурой внутри рабочей зоны печи осуществляется изменением скоро-

сти движения газов в печи, что приводит к изменению режима горения топлива. Режим, в свою очередь, определяет количество подаваемой в печь теплоты и долю передаваемой материалу теплоты в отапливаемой части печи.

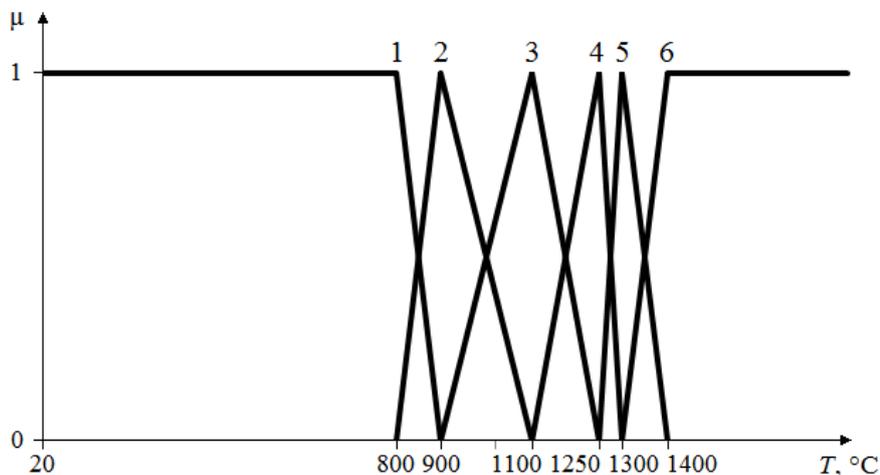


Рис. 2. График функции принадлежности температуры нагрева слябов:
 1-2 – область недогрева, 3-5 – область рациональных температур,
 5-6 – область появления перегрева, 6 – область появления пережога

Таким образом, изменение положения заслонки горелки находится в обратной зависимости от температуры слябов, полученной по показаниям пирометра: чем температура выше, тем меньше степень открытости заслонки. Такая система позволяет формализовать человеческий процесс умозаключения с помощью логических выражений (ЕСЛИ-ТО).

Таким образом, можно сформулировать следующие правила:

ЕСЛИ температура слябов очень низкая, ТО заслонка открыта.

ЕСЛИ температура слябов низкая, ТО степень открытия заслонки большая.

ЕСЛИ температура слябов достаточная, ТО степень открытия заслонки средняя.

ЕСЛИ температура слябов высокая, ТО степень открытия заслонки маленькая.

ЕСЛИ температура слябов очень высокая, ТО заслонка закрыта.

Сформулированные выше правила можно записать более структурированно и обозначить для каждого правила свое нечеткое множество. Это определяет множества для каждого состояния на входе системы.

Лингвистические переменные нечетких множеств

№ правила	Нечеткое множество (температурный интервал), °C	Лингвистическая переменная «Температура слябов»	Лингвистическая переменная «Степень открытия заслонки»
1	200...900	очень низкая	открыта
2	900...1100	низкая	большая степень
3	1110...1300	достаточная	средняя
4	1310...1390	высокая	маленькая степень
5	1390...1400	очень высокая	закрыта

Приведенная выше таблица отображает формирование нечетких множеств на входе системы. Каждое множество конвертируется в цифровой код и направляется в контроллер. Далее следует дефазификация данных. Этот процесс связан с декодированием значений на

выходе системы, полученных от микроконтроллера. На практике это будет означать, что контроллер будет регулировать положение заслонки в зависимости от того, к какому температурному интервалу относятся полученные с датчиков показания.

С помощью сравнительного элемента и аналого-цифрового преобразователя микроконтроллер проверяет показания датчиков, сравнивает с имеющимися требованиями и проводит требуемые нечеткие операции над данными. Таким образом, данные о температурных колебаниях внутри пространства печи определяют дальнейшие действия микроконтроллера и то, какие инструкции он отправит на исполнительные устройства [7].

Сформулированные правила нечеткого логического вывода могут быть использованы при разработке систем интеллектуального управления методическими нагревательными печами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оценка запаса устойчивости системы управления методической печью по частотному показателю колебательности / М. П. Кухтик [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 1 (156) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 13). – С. 61–63.
2. Кухтик, М. П. Настройка робастного регулятора методической печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев, М. А. Круглов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 59–61.
3. Комплектование садки слябов методической печи в условиях информационно-технологической среды / М. П. Кухтик, С. П. Генералов, И. А. Харитонов, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 70–72.
4. Расчет оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора методической печи / М. П. Кухтик [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 5 (200) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 70–72.
5. Сердобинцев, Ю. П. Adjustment of robust controller for continuous reheating furnace [Электронный ресурс] / Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2017. – № 3. – URL : <http://www.science-sd.com/471-25378>.
6. Дилигенский, Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология : монография / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, П. В. Севостьянов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 397 с.
7. Temperature control system using fuzzy logic technique / Isizoh A. N. [et al.] // International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence. – 2012. – Vol. 1, No. 3. – pp. 27-31.

УДК 621.51:66.023

М. П. Кухтик, Д. Ю. Шаталин, А. Б. Аллабердиев

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ЭНДОТЕРМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Разработана автоматизированная система управления функционирования генератором эндотермической атмосферы, которая позволяет осуществлять автоматический и ручной режимы работы. Представлена блок-схема алгоритма автоматической работы эндогенератора. Написана управляющая программа на языках стандарта МЭК 61131-3.

Ключевые слова: эндотермический генератор, химико-термическая обработка, программируемый логический контроллер, блок-схема, управляющая программа.

M. P. Kukhtik, D. YU. SHatalin, A. B. Allaberdiev

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF ENDOTHERMIC GENERATOR OPERATION

Volgograd State Technical University

Automated control system of endothermic generator operation has been developed. This system allows realizing automatic and manual functioning modes. The block diagram of endogenerator automated operation has been represented. Control program has been written in the languages of the IEC 61131-3 standard.

Keywords: endothermic generator, chemicothermal treatment, programmable logic controller, block diagram, control program.

Эндотермические атмосферы применяются в печах для защиты поверхностей обрабатываемых деталей от обезуглероживания и окалины. Обработка с применением эндотермических атмосфер позволяет получать детали из средне- и высокоуглеродистых сталей со светлой

поверхностью после закалки и твердой пайки, а также при спекании железа или порошковых металлов.

Технологические процессы химико-термической обработки характеризуются высокой энергоемкостью и чувствительностью к отклом

нениям от оптимальных параметров процесса. Поэтому для их реализации специализированное термическое оборудование должно быть оснащено автоматизированной системой управления технологическим процессом [1].

Целью работы является повышение эффективности функционирования эндотермического генератора типа ENE-10 путем модернизации оборудования и внедрения автоматизированной системы управления с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК). Генератор эндотермической атмосферы ENE-10 входит в состав технологической линии для термической и химико-термической обработки деталей машин из стали и стальных сплавов, выпускаемых ООО «Волгоградская машиностроительная компания ВгТЗ». Технологическая линия расположена в термическом отделении МК-1 «ВМК ВгТЗ».

Задачей автоматизации работы эндотермического генератора является поддержание постоянной температуры и химического состава эндогаза, так как это влияет напрямую на качество изделия и минимизирует участие операторов в процессе поддержания температуры [2].

Разработана автоматизированная система

управления функционированием эндогенератора, которая позволяет осуществлять автоматический и ручной режимы работы, управлять процессом в соответствии с заданной программой. Информация от датчиков температуры, датчиков кислорода, газовых сенсоров поступает на ПЛК и далее выводится на панель оператора. Таким образом, оператор может оперативно отслеживать изменения параметров технологического процесса. Кроме того, имеется возможность подавать сигналы задания на ПЛК, если полученные от датчиков параметры не соответствуют заданным. Получив задание от пульта оператора, ПЛК преобразует информацию и посылает задание на исполнительные механизмы – газовые электроклапаны или газовые контроллеры.

Для использования в системе управления по техническим и экономическим параметрам выбраны: контроллер типа S7-300 с центральным процессором CPU 314, цифровой модуль ввода SM321, модуль с релейными выходами SM322, блок питания PS 307 и операторская панель OP3. Разработана блок-схема алгоритма автоматической работы эндотермического генератора (рис. 1).

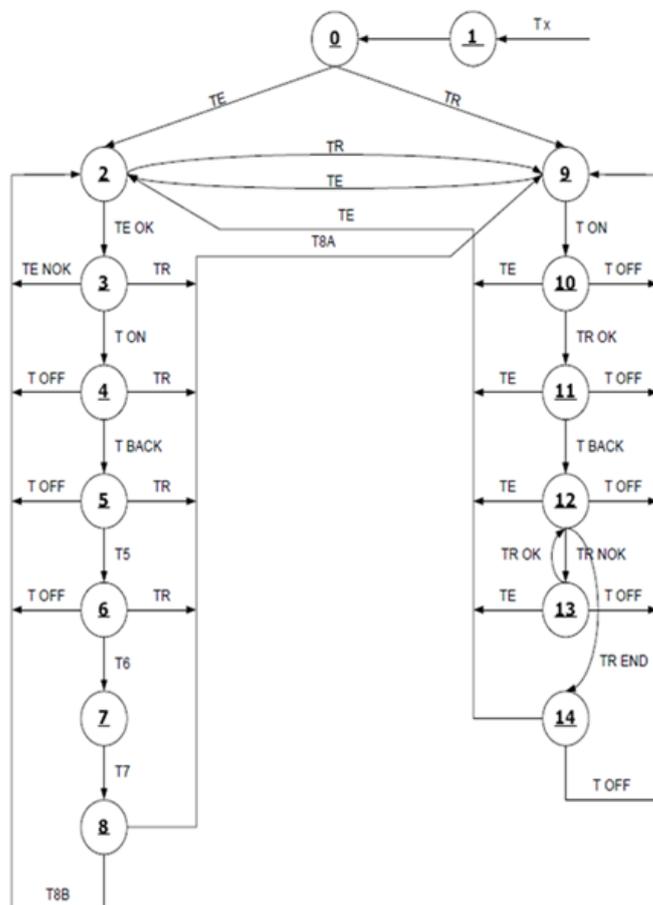


Рис. 1. Блок-схема алгоритма автоматической работы эндотермического генератора

Состояния эндогенератора: 0 – инициализация, 1 – авария, 2 – E: проверка температуры, 3 – E: проверка давления, 4 – E: зажигание горелки, 5 – E: включение, 6 – E: задержка подачи газа, 7 – E: генерация атмосферы, 8 – E: продувка, 9 – R: проверка, 10 – R: проверка температуры, 11 – R: зажигание горелки, 12 – R: счетчик времени «плюс», 13 – R: счетчик времени «минус», 14 – R: конец.

Описание переходов блок-схемы: Tx – авария/ручное управление, TE – последовательность работы эндогенератора, TR – последовательность работы в режиме регенерации катализатора, T OFF – кнопка «Стоп процесса», T ON – кнопка «Старт процесса», T BACK – зажженная горелка, TR OK – правильная температура регенерации катализатора, T R NOK – неправильная температура регенерации катализатора, TR END – отсчетное время регенерации, TE OK – правильная

температура эндогенератора, TE NOK – неправильная температура эндогенератора, T5 – ручной клапан газа, T6 – отсчетывание времени задержки перед подачей газа, T7 – авария или неправильная температура эндогенератора, T8A – порядок работы в режиме регенерации катализатора и расчетное время его продувки воздухом, T8B – порядок работы эндогенератора и расчетное время его продувки воздухом.

В программном пакете SIMATIC STEP 7 на языках списка инструкций STL и релейно-контактной логики LAD стандарта МЭК 61131-3 написана управляющая программа. В проекте STEP 7 сконфигурирована аппаратная часть, составлена таблица символов, созданы организационные блоки, функции и функциональные блоки. Программа управляет регулированием температуры и давлением газа, вентиляцией и работой горелок.

A	"ZE005_TEMP_OK"	I0.3	-- Превышение температуры в шкафу управления
A	"ALM_ACK#005/5"	M108.4	-- Превышен температуры в шкафу управления
R	"ALM#005/5"	M100.4	-- Превышен температуры в шкафу управления
AN	"ZE005_TEMP_OK"	I0.3	-- Превышение температуры в шкафу управления
A	"ZE017_PS_OK"	M31.5	-- [] Питание 24VDC OK
AN	"ALM#005/5"	M100.4	-- Превышен температуры в шкафу управления
S	"ALM#005/5"	M100.4	-- Превышен температуры в шкафу управления
S	"BUZZER_ALM"	M31.0	-- [] Контрольный сигнал

Рис. 2. Шина «Проверка температуры в шкафу управления»

На рис. 2 показана одна из созданных в проекте шин управления. Данная шина проверяет температуру в шкафу управления. Если температура превышает допустимое значение, то происходит вызов сигнализации.

Внедрение разработанной системы управления позволит повысить качество продукции, безопасность производства и облегчить труд обслуживающего персонала.

УДК 621.867.8

М. А. Лапиков, О. В. Мушкин, А. М. Макаров, Е. Г. Крылов
**УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАСФАСОВКОЙ
 СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ГИБКИЕ КОНТЕЙНЕРЫ***

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Разработана конструкция и система управления устройством для автоматического манипулирования гибким контейнером при расфасовке сыпучих материалов. Построенная на базе промышленного логического контроллера система повышает надежность и обеспечивает контроль и регулирование основных параметров в процессе автоматической расфасовки.

Ключевые слова: автоматизация, расфасовка, сыпучий материал, гибкий контейнер, промышленный логический контроллер.

© Лапиков М. А., Мушкин О. В., Макаров А. М., Крылов Е. Г., 2018

* Исследования выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых-кандидатов наук МК-2619.2017.8.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виленциц, Б. Автоматические системы управления технологическими процессами газовой цементации / Б. Виленциц, В. Попов // Современные технологии автоматизации. – 2012. – № 1. – С. 56–64.
2. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий : учеб. пособие / В. Г. Лисиенко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Мн. : Выш. шк., 1989. – 279 с.

M. A. Lapikov, O. V. Mushkin, A. M. Makarov, E. G. Krylov
**CONTROL OF THE AUTOMATED PACKING BULK MATERIAL
IN FLEXIBLE CONTAINERS**

Volgograd State Technical University

The design and control system of the device for automatic manipulation of flexible container for the packaging of free-flowing materials have been developed. The system, based on the industrial logic controller, improves reliability and provides control and regulation of the main parameters during the automatic packaging process.

The research has been performed with the financial support through the Grant of the President of the Russian Federation for young Russian scientists – candidates of science MK-2619.2017.8.

Keywords: automation, packaging, free-flowing material, flexible container, industrial logic controller.

Расфасовка и упаковка сыпучих материалов является важным звеном в транспортно-технологических схемах доставки сыпучих материалов высокого качества от производителя к потребителю. Для этих целей применяют различные виды тары, однако наиболее распространенной является мягкая расфасовочная тара, в частности, гибкие контейнеры (ГК). При наполнении ГК процесс захвата, раскрытия и подачи тары под дозирующее устройство часто выполняется вручную. Это связано со сложностью процесса манипулирования мягкой тарой непостоянной формы и, как следствие, отсутствием инструментов для выполнения этих действий. Кроме того, процессы расфасовки зачастую сопровождаются сильным пылевыделением, они трудоемки, утомительны и травмоопасны для человека. Поэтому решение задачи полной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры является чрезвычайно актуальной.

Анализ патентных источников показывает, что для автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в ГК могут быть использованы различные устройства. Наибольшая доля рынка упаковочной техники сегодня приходится на зарубежных производителей из Финляндии, Италии, Германии, Австрии, Испании.

Авторами разработаны устройства [1–5], позволяющие осуществлять полностью автоматический цикл расфасовки сыпучих материалов в ГК. Устройства предназначены для отделения ГК от стопы, захвата, подачи его под загрузочный патрубок, взвешивания необходимого количества сыпучего материала и наполнения им ГК, снятия ГК с патрубка и его прошивки.

Для подтверждения работоспособности подобных устройств разработана и изготовлена конструкция устройства с автоматической системой управления (рис. 1), которая реализована на базе промышленного логического контроллера (ПЛК) «Mitsubishi Electric» семейства «FX3U» [6]. Контроллер имеет 8 дискретных входов/выходов. Шесть входов базового моду-

ля позволяют без сложного программирования регистрировать изменения входного сигнала (включение или выключение) длительностью от 5 мкс. Два других входа регистрируют импульсы длительностью свыше 50 мкс. Эти сигналы могут использоваться для запуска программ обработки прерываний.

Реализация алгоритма управления процессом расфасовки выполнена на базе следующих аппаратных средств:

1. 8-канального дискретного модуля ввода «STL-Di8-V1»;
2. 8-канального дискретного модуля вывода «STL-DO8».

Информационный обмен между ПЛК и модулями дискретного ввода/вывода осуществляется по интерфейсу RS-422 с использованием протокола *Fieldbus*.

Управление построено по иерархической структуре: на нижнем уровне датчики и исполнительные устройства, на среднем уровне ПЛК, верхний уровень представлен графическим терминалом (пульт управления).

Датчики и исполнительные механизмы располагаются непосредственно на технологическом оборудовании. В качестве датчиков положения, установленных на исполнительных пневмоцилиндрах, используются герконовые датчики CST-220S. В качестве исполнительных механизмов (ИМ) используются пневмоцилиндры двустороннего действия с демпфированием в обе стороны серии 60 компании *Camozzi*, а также вакуумные захваты. Для управления этими ИМ используются пневмораспределители золотникового типа с электрическим управлением серии 358.

Контроллер реализует два режима управления: ручной (управление положением поршней пневмоцилиндров осуществляется путем переключения тумблеров на панели управления) и автоматический – контроллер получает информацию о положении поршней от герконовых датчиков, установленных на каждом пневмоцилиндре. Наличие вакуума в вакуумном захвате определяется при помощи датчика вакуума.

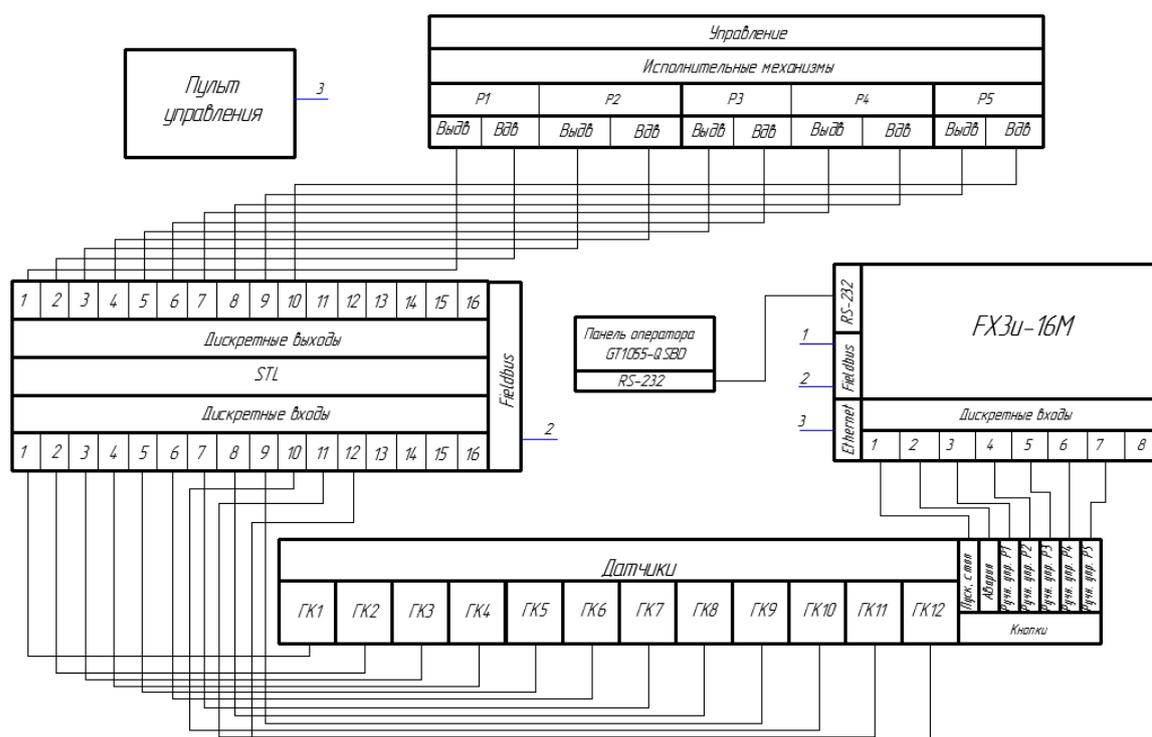


Рис. 1. Структурная схема системы управления устройством автоматической расфасовки сыпучих материалов в ГК

В режиме ручного управления оператор имеет возможность управлять любым механизмом с соблюдением всех блокировок при некорректных действиях. Режим удобен для проведения пуско-наладочных и ремонтно-профилактических работ, завершения автоматического цикла в случае его сбоя.

Уровень управления служит для задания

всех параметров технологического процесса. Это становится возможным благодаря использованию панели оператора *GT1055-QSBD*. Также на этом уровне осуществляется сбор данных о параметрах работы устройства. Питание ПЛК и графической панели *GT1055-QSBD* обеспечивается блоком питания постоянного напряжения 24В *ALPHA POWER 24-2.5*.



Рис. 2. Система управления автоматической расфасовки сыпучих материалов в ГК

Система управления (рис. 2) интегрирует весь поток информации: организацию интерфейса с оператором (терминальная задача); управление механизмами вакуумной системы (логическая задача); программное управление процессом расфасовки (технологическая задача); идентификацию состояния технологической системы (диагностическая задача); документирование технологического процесса (архивная задача); диспетчеризацию приведенных выше задач (системная задача).

Преимущества разработанной системы управления: самодостаточность и автономность вакуумной и механической подсистем благодаря сетевой организации; открытость системы благодаря поддержке международного стандарта IEC 61131-3; резервирование функций управления, что позволяет довести технологический процесс в режиме ручного управления,

вследствие чего повышается безаварийность работы установки.

Для программирования контроллера и графической панели использовался фирменный программный пакет MELSOFT *iQ Works*. На рис. 3 представлен экранный снимок фрагмента программы для ПЛК, реализованный на языке LD (*Ladder Diagram*) в программе *GX Works2*. В приложении *GT Designer3* был реализован интерфейс панели управления.

Автоматизированная система управления установкой обеспечивает контроль и регулирование основных параметров расфасовочного процесса в соответствии с заданием, устанавливаемым на пульте управления (графическая панель), а также аварийную сигнализацию и автоматические блокировки работы технологического оборудования при выходе из строя того или иного узла системы.

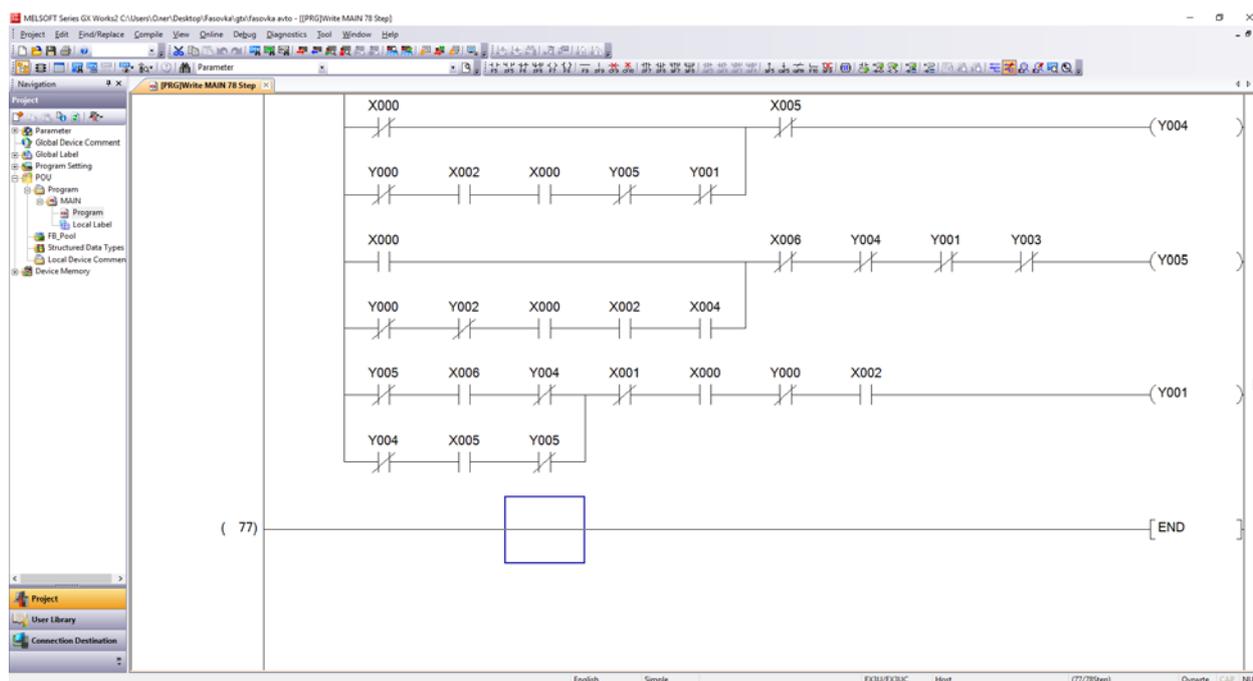


Рис. 3. Экранный снимок фрагмента управляющей программы для ПЛК

Результаты исследования элементов конструкций подобных устройств [6–8] позволяют судить о их применимости для полной автоматизации процесса фасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. М. 169411 Российская Федерация, МПК B65B67/12. Устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания гибких контейнеров / А. М. Макаров, М. А. Лапиков, О. В. Мушкин, Ю. П. Сердобинцев ; ВолгГТУ. – 2017.

2. Разработка устройства для автоматического раскрытия, удержания и закрытия гибких контейнеров с помощью вакуумных захватов / А. А. Ковалев, А. М. Макаров, М. Г. Кристаль, М. А. Лапиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 53–56.

3. Макаров, А. М. Автоматическая расфасовка сыпучих материалов в мягкую тару. Повышение эффективности процесса / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 128 с.

4. Макаров, А. М. Автоматизация процесса наполнения мягкой расфасовочной тары сыпучим материалом /

А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев // Современные проблемы науки и образования, 2011. – № 6; Режим доступа: www.science-education.ru/100-5113.

5. Макаров, А. М. Автоматизация наполнения гибких контейнеров сыпучими продуктами / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, Е. Г. Крылов // СТИН, 2014. – № 4. – С. 37–40.

6. Modelling and research of automated devices for handling of flexible containers during filling with free-flowing products [Электронный ресурс] / А.М. Макаров, Ю.П. Сердобинцев, О.В. Мушкин, М.А. Лапиков // 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: In-

stitute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)], 2017. – P. 281-283. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970561.

7. Условия выбора эксплуатационных режимов для повышения надежности расфасовочного оборудования / Ю. П. Сердобинцев, О. В. Мушкин, А. М. Макаров, М. П. Кухтик // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (204) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 137–140.

8. Макаров, А. М. Исследование устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, А. С. Сергеев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 114–117.

УДК 621.65.03

И. В. Мартынович, А. Р. Авдеев, А. В. Дроботов

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО НАСОСА С ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: mart.ivan3@gmail.com

Разработана и исследована конечно-элементная модель магнетогидродинамического насоса индукционного типа с дозированной подачей расплавленного алюминия. Определены зависимости скорости истечения жидкости от силы тока и длительности импульса тока.

Ключевые слова: магнетогидродинамика (МГД), литье металла, расплав, насос, метод конечных элементов.

I. V. Martynovich, A. R. Avdeev, A. V. Drobotov

MAGNETOHYDRODYNAMIC PUMP WITH DOSED SUPPLY ATIVITY SIMULATION

Volgograd State Technical University

A finite element model of a magnetohydrodynamic pump with a dosed supply of molten aluminum was developed and investigated. Fluid velocity dependence from the current and current pulse duration was estimated.

Keywords: magnetohydrodynamic (MHD), metal casting, melt, pump, finite element method.

В литейном производстве применение ручных дозаторов характеризуется низким качеством и надежностью. Для автоматизации производства и получения более высоких характеристик необходимо применение программно-управляемых дозаторов [0], которые должны подавать расплав металла требуемого объема. В качестве такого устройства можно использовать насос, работающий на основе магнетогидродинамического (МГД) эффекта. Однако, методик точного определения его подачи в литературе не встречается.

Разрабатываемый МГД-насос (рис. 1) индукционного типа состоит из камеры 1 специальной формы с соплом 2 и ограничителем 3, катушки индуктивности 4.

Работает он следующим образом. Катушка 4 индуктивности создает изменяющееся магнитное поле при прохождении через нее положи-

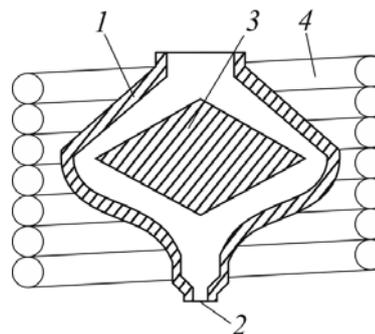


Рис. 1. Схема устройства

тельной фазы синусоидального импульса тока. Согласно уравнений Максвелла [0], это поле наводит вихревые токи в расплаве алюминия. В результате взаимодействия наведенных токов и магнитного поля возникают силы Лоренца. Направление действия этих сил зависит от того нарастает (рис. 2, а) или спадает (рис. 2, б) ток в катушке 4

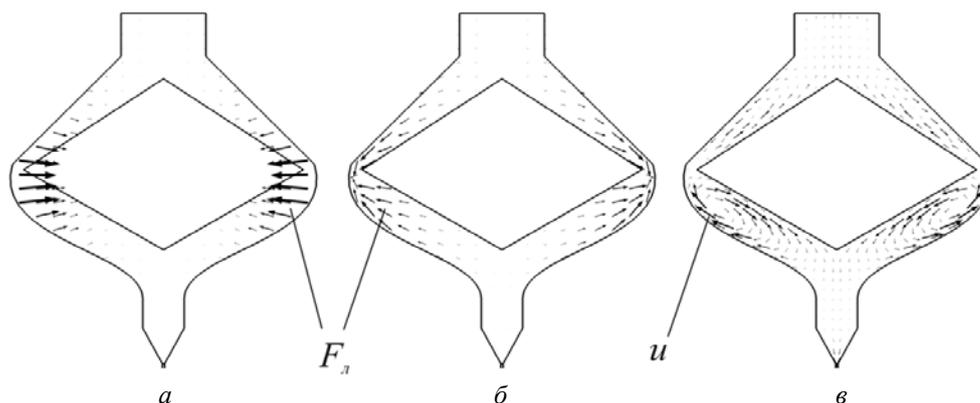


Рис. 2:

а, б – направление сил Лоренца F_L во время нарастания (при $t = 0,07$ мс) и спада (при $t = 0,19$ мс) тока I соответственно;
 в – направление скорости u расплава после импульса (при $t = 0,2$ мс)

индуктивности. После прекращения протекания тока через катушку 4 индуктивности расплав приходит в вихреобразное движение (рис. 2, в), при этом его часть вытесняется через сопло.

Для расчета параметров МГД-насоса, необходимых для обеспечения нужной подачи и дозирования расплава металла, нужно совместное решение системы уравнений электромагнитного взаимодействия и гидродинамики. Эта система состоит из уравнений Навье-Стокса, уравнений Максвелла и закона Ома для движущихся сред [0]. Уравнения Навье-Стокса в магнитной гидродинамике записываются следующим образом:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} j \times B; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (2)$$

где u – скорость жидкости (м/с), p – давление (Па), ρ – плотность жидкости (кг/м^3), ν – динамическая вязкость ($\text{Па}\cdot\text{с}$), B – магнитная индукция (Тл), j – плотность электрического тока (А/м^2), член $j \times B$ учитывает лоренцеву силу. Магнитная индукция B катушки с током выражается так [0]:

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot n, \quad (3)$$

где I – сила тока (А), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ кг}\cdot\text{м}/(\text{с}^2\cdot\text{А}^2)$ – магнитная постоянная, $n = N/l$ – число витков N на единицу длины катушки l . Из (1) и (3) видна прямая зависимость лоренцевой силы,

а, значит, и скорости движения u от силы тока I и числа витков катушки на единицу длины n .

Расчет результирующей силы, оказываемой МГД-насосом на поток, и скорости самого потока при сложной геометрии канала проблематичен, поэтому было проведено численное моделирование в пакете COMSOL Multiphysics.

Зависимость скорости истечения V от времени t при единичном импульсе длительностью $T = 0,2$ мс показан на рис. 3. Заметен характерный максимум скорости V в момент спада импульса. Зависимость максимальной скорости V_{max} от амплитуды тока I_{max} близка к линейной (рис. 4, а). Для наиболее эффективной работы устройства длительность импульса тока T должна быть в интервале 0,1..0,2 мс (рис. 4, б).

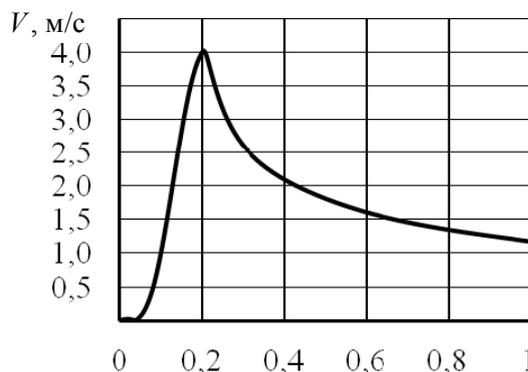


Рис. 3. Зависимость скорости V истечения от времени t

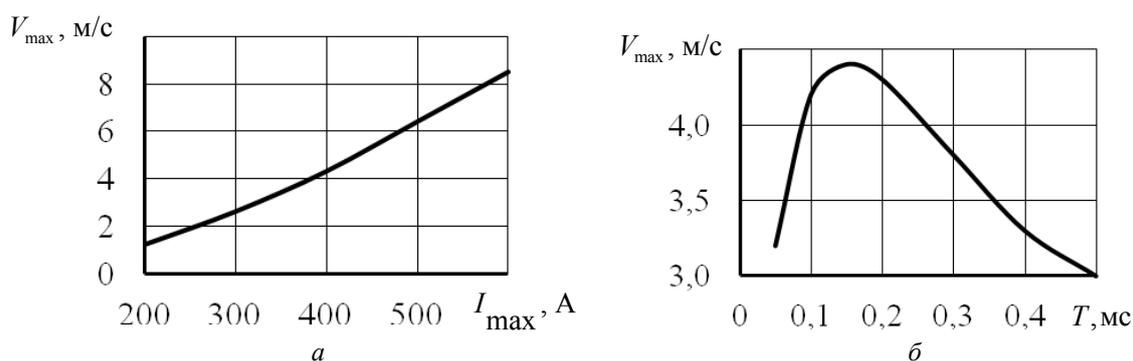


Рис. 4. Зависимость максимума скорости V_{\max} истечения от:

a – амплитуды I_{\max} тока при длительности $T = 0,2$ мс импульса; b – длительности импульса T при амплитуде $I_{\max} = 400$ А тока

Следовательно, моделирование позволяет подобрать параметры МГД-насоса таким образом, чтобы обеспечить заданную подачу и дозирование расплава металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Механизация ручного труда : учеб. пособие / И. В. Ревина, В. С. Сердюк. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2007. – 420 с.
2. Электромагнетизм. Основные законы / И. Е. Иродов. – 7-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 319 с.
3. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред / Г. Г. Брановер, А. Б. Цинобер. – М. : Изд-во Наука, 1970. – 383 с.

УДК 621.867.8

А. В. Омаров, А. И. Репников, И. Е. Грязнов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЧЕТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПАКЕТЕ «MATLAB»

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведен анализ нечетких нейронных сетей. Смоделирована нейронная сеть, прогнозирующая изменение валютной пары «евро – доллар» на основе анализа известного курса валюты. Сбор данных проведен за последние четыре месяца.

Исследование выполнено на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Волгоградского государственного технического университета.

Ключевые слова: нейронная сеть; прогнозирование; валютные величины.

A. V. Omarov, A. I. Repnikov, I. E. Gryaznov

THE SOLUTION OF PROBLEMS OF FORECASTING BY MEANS OF INDISTINCT NEURAL NETWORKS IN A MATLAB PACKAGE

Volgograd State Technical University

The analysis of indistinct neural networks has been carried out. The neural networks predicting change of currency pair «euro – dollar» on the basis of the analysis of the known exchange rate is simulated. Data collection is carried out for the last four months.

The research is executed at the кафедра's Automation of Technological Processes of the Volgograd State Technical University.

Keywords: neural network; forecasting; currency sizes.

На сегодняшний день происходит интенсивное развитие различных технологий. Одним из примеров развивающихся технологий являются нейронные сети с использованием нечет

кой логики. Важнейшим преимуществом нечеткой нейронной сети является ее способность самообучаться, в отличие от аппарата нечеткой логики, не имеющего такой способности.

Нейронные сети на нечеткой логике находят применение в различных задачах кибернетики: прогнозирование, диагностика, распознавание образов, и т. д.

Моделирование системы прогнозирования некоторого заданного события осуществляется следующим образом: в программу вводится ряд известных статистических данных, на основе которых созданная нейронная сеть выявляет зависимости, в том числе и такие, которые скрыты от глаза человека, между событиями и полученными из этих событий данными. Опираясь на эти зависимости, нейронная сеть обучается, и после своего обучения создает прогнозы о дальнейших событиях, идентичных обучающему событию (то есть событию, на основе которого сеть провела свое обучение). Подобные системы находят свое широкое применение при прогнозировании курса валют на определенный период времени.

Моделируемая система, опираясь на известные значения четырех предшествующих

дней, прогнозирует значение курса валютной пары на пятый день. Валютная пара выбирается не принципиально, возможен выбор любой валютной пары. Были зафиксированы ежедневные значения валютной пары «евро – доллар» (в качестве примера) в течение двенадцати предшествующих месяцев. Данные были собраны в таблицу и занесены в программный пакет «*Matlab*» в качестве обучающей выборки. Именно в данном программном пакете строится нейронная сеть. Перед обучением заранее указывается количество эпох обучения для фиксации погрешности вычисления. Чем больше эпох обучения, тем точнее нейронная сеть построит прогноз.

Процесс обучения нейронной сети легко отслеживается визуально, вследствие чего легко делается вывод о правильности ввода данных и оценивается степень обучения нейронной сети. Процесс обучения моделируемой нейронной сети изображен на рис. 1.

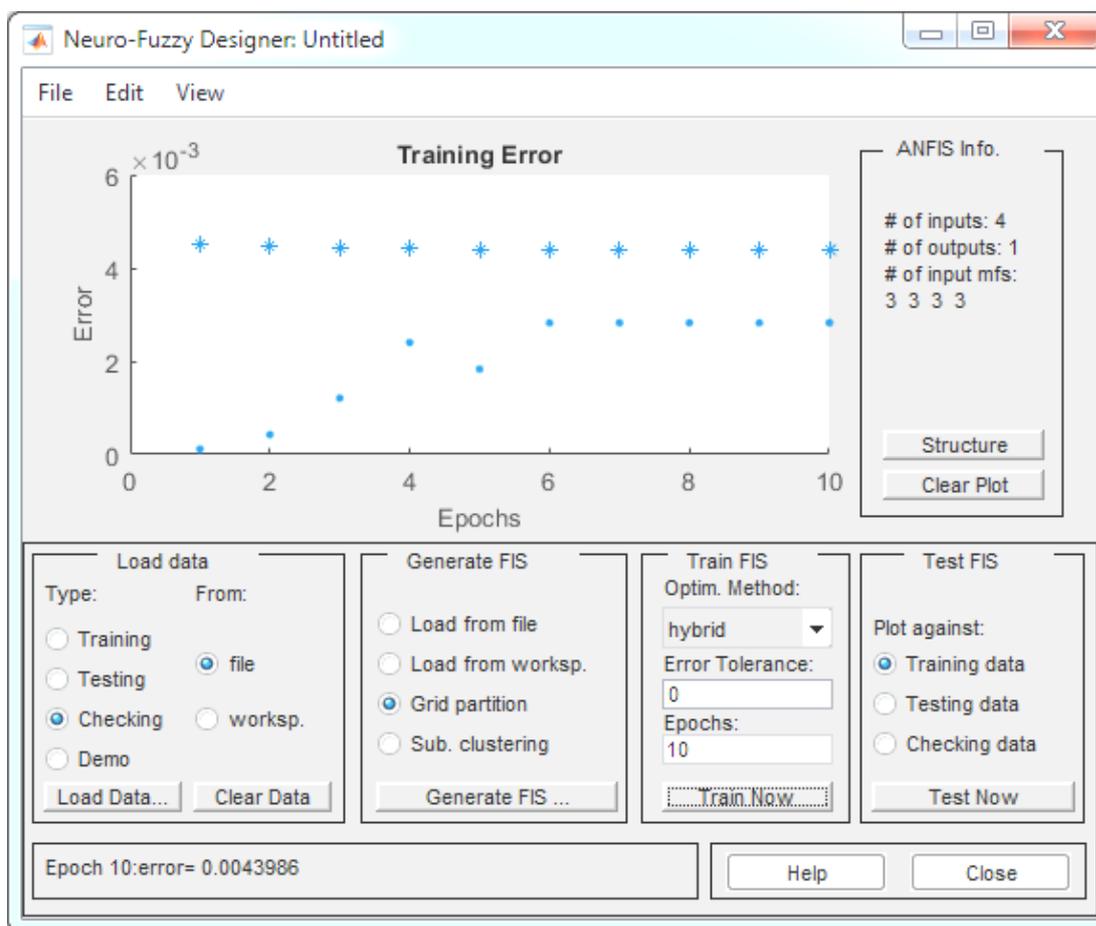


Рис. 1. Процесс обучения моделируемой нейронной сети

В процессе эксперимента были получены определенные данные. Структура нечеткой нейросети варьировалась от двух до пяти входных переменных. Наилучший результат по минимальной ошибке был получен при четырех входных переменных и трех функциях принадлежности на каждую входную переменную.

Величина ошибки (или, иными словами, погрешности вычисления) зависит от выбранного в настройках математического аппарата, посредством которого нейронная сеть выполняет анализ и вычисление интересующего параметра. Структура моделируемой нейронной сети, направленной на прогнозирование ожидаемого значения валютной пары, изображена на рис. 2.

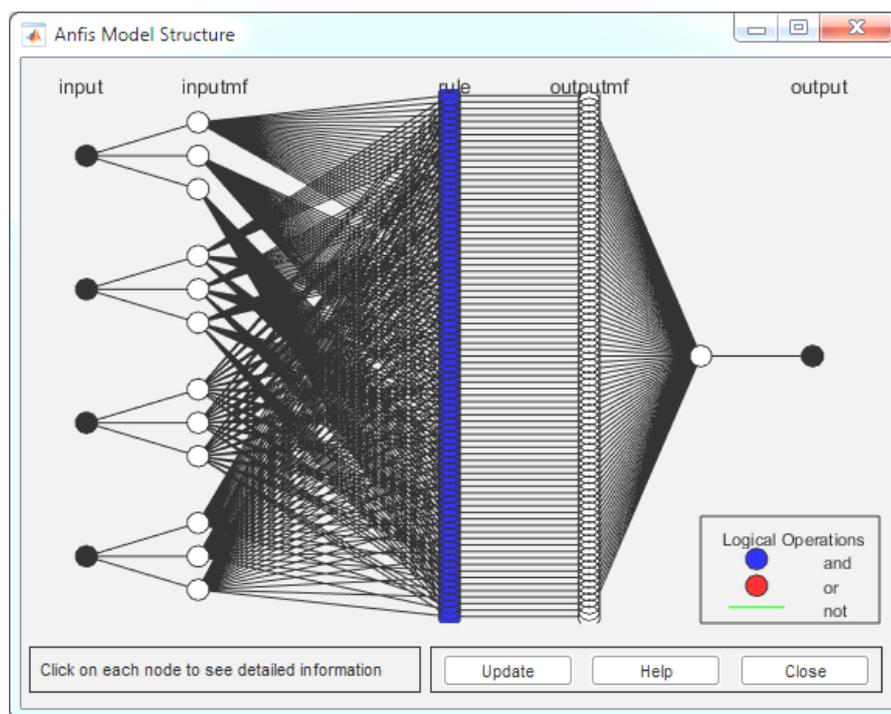


Рис. 2. Структура моделируемой нейронной сети

После получения структуры, для наглядности, можно получить визуализацию нейронной сети, прогнозирующей значения величин. Визуализация изображена на рис. 3.

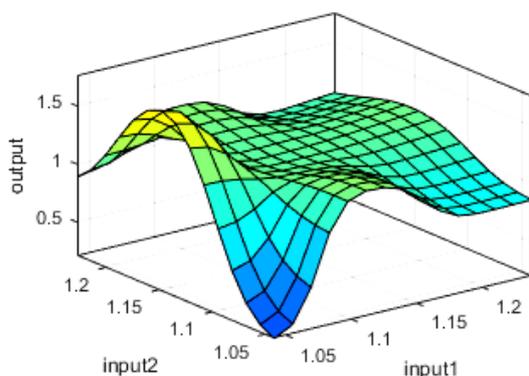


Рис. 3. Визуализация моделируемой нейронной сети

Получение спрогнозированного значения валютной пары осуществляется при помощи специальной команды, введенной в командную

строку. Однако важно помнить, что полученное значение валютной пары получено с учетом погрешности вычисления, и может отличаться от реального на сотые и тысячные величины.

Сравнив полученное значение с реальным, выяснилось, что они различаются на 0,00158. Можно сделать вывод, что нечеткая нейронная сеть подходит для прогнозирования значений валютной пары величин, так как она выдает приблизительно такое же значение, какое имеет реальная величина валютной пары.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интернет-ресурс: allrefrs; Режим доступа: allrefrs.ru/3-44909 (Дата обращения: 12.02.18)
2. Интернет-ресурс: lib2.podelise; Режим доступа: <http://lib2.podelise.ru/docs/71191/index-1618.html> (Дата обращения: 12.02.18)
3. Интернет-ресурс: knowledge.allbest; Режим доступа: https://knowledge.allbest.ru/programming/3c0a65635a2ad68a4d43b88421316d36_1.html (Дата обращения: 12.02.18)

УДК 621.867.8

*А. И. Репников, А. В. Омаров, И. Е. Грязнов***УПРАВЛЕНИЕ ОСВЕЩЕНИЕМ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ZIGBEE****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

Проведен анализ беспроводной сети *ZigBee*, а также определены ее характерные особенности. Была разработана система беспроводного управления освещением на основе этой сети. Оптимальным образом подобраны компоненты, необходимые для построения и корректной работы этой сети.

Исследование выполнено на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Волгоградского государственного технического университета.

Ключевые слова: беспроводная сеть; *ZigBee*; управление освещением.

*A. I. Repnikov, A. V. Omarov, I. E. Gryaznov***THE CONTROL OF LIGHTING ON THE BASIS OF WIRELESS NETWORK ZIGBEE****Volgograd State Technical University**

The analysis of wireless network *ZigBee* has been carried out and also its characteristics have been defined. The system of wireless control of lighting on the basis of this network has been developed. The components necessary for construction and correct work of this network have been picked up in the most optimum way.

The research is executed at the кафедра's Automation of Technological Processes of the Volgograd State Technical University.

Keywords: wireless network; *ZigBee*; control of lighting.

В настоящее время происходит интенсивная автоматизация различных процессов и объектов: коммерческих зданий, предприятий, жилых помещений. Начинается переход от проводных сетей и кабелей к беспроводным технологиям, таким, как *WiFi*, *Bluetooth*, *ZigBee* и многие другие. Широко распространяется явление «умных домов», где автоматизированные системы выполняют различные функции: управляют освещенностью помещения, производят сбор данных о затратах электрической энергии, затрат воды, обеспечивают противопожарную безопасность, сигнализацию, и т. д.

Теоретически, любую беспроводную сеть можно использовать для автоматизации зданий, и, в частности, для управления освещением. Однако выбор *ZigBee* в данном случае представляется наилучшим вариантом, так как она обладает рядом характерных особенностей: относительно низкая скорость передачи данных и малая стоимость аппаратных составляющих. Однако главной отличительной от других беспроводных сетей особенностью является работа устройств в спящем режиме. Иными словами, устройство почти все свое время «спит», но когда появляется необходимость передать или принять пакет данных, оно включается и начинает функционировать. Причем многие устройства могут работать и как источники, и как приемники данных.

ZigBee это спецификация сетевых протоколов высокого уровня, созданная на основе сетевого стандарта *IEEE 802.15.4*, которая использует в своих целях нижние уровни, реализованные в самих устройствах: физического (обеспечивающего нужную пользователю частоту) и канального (предотвращение коллизий и обеспечение каждому устройству физического адреса). А реализация сети происходит на сетевом уровне с помощью специальных программ – приложений. Все эти протоколы образуют стек и представляют собой некую конструкцию.

Беспроводная сеть *ZigBee* строится на основе трех основных типов устройств: координатора, маршрутизатора и конечного устройства. Координатор проводит сканирование свободных и доступных частотных каналов, на которых представляется возможным создание сети, формирует и присваивает сети идентификатор, подключает новые сетевые устройства к ней (в число которых входят маршрутизаторы и конечные устройства), проводит маршрутизацию и буферизацию данных для спящих конечных устройств. Маршрутизатор определяет наиболее подходящий путь для передачи данных, при этом выступая в роли и источника передачи данных, и приемника, и ретранслятора сообщений (то есть узел-посредник, принимающий сигнал, усиливающий его и передающий дальше, на следующее устройство). Конечное же

устройство никоим образом не участвует в управлении сети, оно лишь передает (или принимает) данные, а также, в ряде случаев, собирают какую – либо интересующую пользователя информацию.

Чтобы создать беспроводную систему управления освещением на основе сети *ZigBee*, необходимы эти три устройства, описанные выше: координатор, маршрутизатор и конечное устройство.

В проектируемой нами системе координатор будет выполнять следующие функции: управлять сетью и служить посредником в связи между двумя другими устройствами. В маршрутизаторе будет выполняться приложение, управляющее освещением (причем некоторые приложения не просто включают и выключат освещение, но и могут изменять его яркость, и т. д.). Все эти устройства питаются от батареек, причем это могут быть как пальчиковые батарейки, так и дисковые.

Чтобы создать беспроводную сеть из трех ранее упомянутых нами устройств за наиболее короткое время и с относительно небольшими экономическими затратами, можно использовать так называемые *ZigBee* – модули, на которых их разработчиками уже установлены все необходимые аппаратные части: микроконтроллер, трансивер, антенна, шлюзы и прочие элементы микросхемы (кнопки, резисторы, и т. д.). Кроме того, на многих модулях также установлен по умолчанию стек протоколов *ZigBee*, что позволяет сэкономить время разработчику сети на программную реализацию. Наиболее оптимальным вариантом является *ZigBee* – модуль от компании *JENNIC*, который содержит в себе все вышеперечисленные элементы и, помимо всего прочего, ПО (стек протоколов), необходимое для управления освещением (библиотеки, кластеры). Непосредственно управление осуществляется беспроводным микроконтроллером JN5139. Модуль на основе JN5139 изображен на рисунке.

Так как в проектируемой нами сети три устройства, то и модулей таких будет столько же. Использовать такой модуль удобно не только из-за его сравнительной дешевизны (стоимость менее 5 \$), но и имеется возможность обновлять ПО на расстоянии, то есть без каких-либо дополнительных соединений с модулем.

После монтажа на модуль всех необходимых элементов плата вставляется в корпус, специально предусмотренный для нее разра-

ботчиками. Каждое из устройств оснащено кнопками и парой светодиодов, сигнализирующих о состоянии системы.



ZigBee-модуль на основе JN5139

Рассмотрим функции, которые выполняет каждый из модулей в разрабатываемой нами системе. На каждой из плат установлено ПО, выполняющее определенную последовательность действий.

После включения устройства с помощью ПО выполняется его идентификация и роль в сети (в первом случае – это координатор), затем происходит загорание одного из светодиодов, показывающего, что на плату подано питание, а затем гаснет после удачного запуска сети. С помощью платы координатора другие устройства получают свои индивидуальные адреса, а также разрешения на подключение другим устройствам к сети и связи для конечных устройств между собой, а также он направляет передачу данных в нужном направлении.

Плата управления освещением запрограммирована несколько иным образом. После нажатия кнопки включения и подачи питания загорается первый светодиод, устройство начинает поиск доступной сети и отправляет запрос на присоединение к ней, и, одновременно с этим, посылает аналогичный запрос к координатору, что подключиться и к конечному устройству. После успешного подключения к сети на ней загорается второй светодиод. Так как включение и установление связи происходит быстро, то оба светодиода загораются фактически одновременно. После подключения устройства к сети первый светодиод гаснет, после включе-

ния освещения с помощью платы выключателя второй светодиод тоже погаснет.

И, наконец, плата выключателя после подачи питания также начинает проводить поиск доступной сети и посылает запрос на подключение к ней и также посылает запрос координатору, оба светодиода загораются. После успешного установления соединения с сетью и нажатия кнопки плата выключателя будет посылать команду включения или выключения освещения на плату управления освещением, первый светодиод гаснет. После смены команды (включения или выключения освещения), второй светодиод также гаснет.

Спроектированная система позволяет передавать данные с низкой мощностью, что позволяет долго не менять батарейки (иногда время бесперебойной работы устройства фактически определяется сроком службы самой батарейки). Сами устройства сравнительно дешевы, но основная сложность связана с программированием стека *ZigBee*.

На основе контроллера JN5139 было продемонстрировано использование сети *ZigBee* для включения – выключения света. Однако сети *ZigBee* могут применяться и для решения более сложных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агафонов, Н.* Технологии беспроводной передачи данных ZigBee, BlueTooth, WiFi; Режим доступа: http://wireless-e.ru/articles/bluetooth/2006_1_10.php (Дата обращения: 12.02.18)
2. Портал о современных технологиях мобильной и беспроводной связи; Режим доступа: <http://1234g.ru/blog-of-wireless-technologies/zigbee/topologiya-zigbee> (Дата обращения: 12.02.18)
3. *Пушкарев, О.* Построение ZigBee – модуля на базе беспроводного микроконтроллера JENNIC JN5139 с питанием от дисковых элементов; Режим доступа: http://www.wireless-e.ru/articles/bluetooth/2007_2_68.php (Дата обращения: 12.02.18)
4. *Еркин, А.* Особенности проектирования беспроводных ZigBee – сетей на базе микроконтроллеров фирмы JENNIC; Режим доступа: http://www.wireless-e.ru/articles/bluetooth/2010_02_20.php (Дата обращения: 12.02.18)

УДК 628. 004.8

Г. Г. Русакова, М. М. Русакова, Л. В. Мазина, Е. В. Губицкая
**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРЕБКОВОЙ СУШИЛКИ
 ДЛЯ СУШКИ БЕЗЭФИРНОГО ГОРЧИЧНОГО ЖМЫХА**
 Волгоградский государственный технический университет
 E-mail: pebg@vstu.ru

В Волгоградском регионе одной из основных масличных культур является горчица. Содержащееся в семенах горчицы значительное количество сырого протеина и жира наделяет их высоким ростостимулирующим качеством [1]. Однако наличие в них токсичных веществ (синигрина и эфирного горчичного масла) не позволяет использовать эти семена для кормления сельскохозяйственных животных без предварительной подготовки [3]. Это приводило к тому, что после получения горчичного масла и горчичного порошка жмых (порядка 70 % от массы семян) направлялся в отход.

В настоящее время жмых перерабатывают в соответствующий основным нормативным показателям кормовой продукт с нестабильным остаточным содержанием влаги, что приводит к его порче при хранении.

Для сушки продуктов, содержащих протеин, используют сушилки: туннельные, распылительные, барабанные, с псевдоожиженным слоем [2]. В производстве используют гребковую сушилку.

Ключевые слова: горчичный жмых, сушка, гребковая сушилка.

G. G. Rusakova, M. M. Rusakova, L. V. Mazina, E. V. Gubitskaya
**THE RESULTS OPERATION RAKE DRYER FOR DRYING
 OF AN ETHER-LESS MUSTARD OIL CAKE**
 Volgograd State Technical University

In the Volgograd region one of the main oilseeds is mustard. Containing in the seeds of mustard a significant amount of crude protein and fat imparts them a high growth-stimulating quality [1]. However, the presence in them of toxic substances (sinigrin and essential mustard oil), does not allow using them for feeding farm animals without prior preparation [3]. This led to the fact that after obtaining mustard oil and mustard seed oil cake (about 70% of the mass of seeds) was sent to waste.

Currently, the cake is processed into a feed product corresponding to the main normative indices with an unstable residual moisture content, which leads to its spoilage during storage.

To dry products containing protein, use dryers: tunneling, spraying, drum, with fluidized bed [2]. In production, a roller dryer is used.

Keywords: mustard cake, drying, roller drier.

Основным переработчиком семян горчицы является ООО «Волгоградский горчично-маслобойный завод «Сарепта». Процесс очистки горчичного жмыха от токсичных соединений предусматривает технологические стадии: гидролиз синигрина до эфирного горчичного масла; выделение эфирного горчичного масла отпаркой его из жмыха; сушку жмыха, очищенного от токсичных соединений с последующим использованием его в качестве кормового продукта.

Имеющееся оборудование на ООО «ВГМЗ «Сарепта» не позволяло перерабатывать в полном объеме образующийся горчичный жмых.

Коллективом исследователей Волгоградских государственных университетов (технического и аграрного) совместно со специалистами ООО «ВГМЗ «Сарепта» за период 2006–2016 гг. доработаны технологии и технические средства для гидролиза синигрина в горчичном жмыхе, и выделение из него эфирного горчичного масла после гидролиза синигрина [5–9].

В настоящее время завод «Сарепта» поставляет в торговую сеть безэфирный горчичный жмых (концентрат), соответствующий основным нормативным показателям технических условий, однако имеющий нестабильное остаточное содержание влаги.

Так как концентрат поступает в торговую сеть и на предреализационное хранение с низкими показателями качества по остаточному содержанию влаги, находящимися в предельном пороговом состоянии, то при его хранении за счет интенсификации процессов автоокисления и порчи, появляется необходимость перевода такого концентрата, являющегося кормовой добавкой в категорию низко протеиновых кормов.

Материалы и методы

В связи с тем, что в промышленных условиях аппаратное оформление технологической схемы подготовки материала к сушке (фильтрация, центрифугирование) и тип сушилки могут быть разными (тоннельная, барабанная, распылительная, в кипящем слое и др.) [2], необходимо знать время сушки материала с различным содержанием в нем влаги.

В лабораторных и опытных работах при рассмотрении влияния технологических параметров на степень сушки продуктов переработки семян горчицы, после извлечения из них эфирного горчичного масла были проведены исследования на сушилках: туннельной, распылительной, барабанных, с псевдоожиженным слоем [5].

Остаточное содержание влаги в пробах высушиваемого продукта определяли по ГОСТ 13979.1–68.

Результаты и обсуждение

ООО «ВГМЗ «Сарепта» основным технологическим аппаратом стадии сушки безэфирного горчичного жмыха техническим проектом [4] была предложена барабанная вакуумная гребковая сушилка.

Гребковая сушилка представляет горизонтальный оваловый аппарат, снабженный люками загрузки и выгрузки продукта, оборудованные герметичными быстрозакрывающимися устройствами (рис. 1). Внутри аппарата расположены два вала, оснащенные по всей длине лопатками одной конструкции (рис. 2). Валы вращаются в направлении друг к другу (рис. 3). Конструкция лопаток позволяет производить предварительную настройку угла атаки. Снаружи аппарат оборудован греющей рубашкой, по которой циркулирует горячая вода.

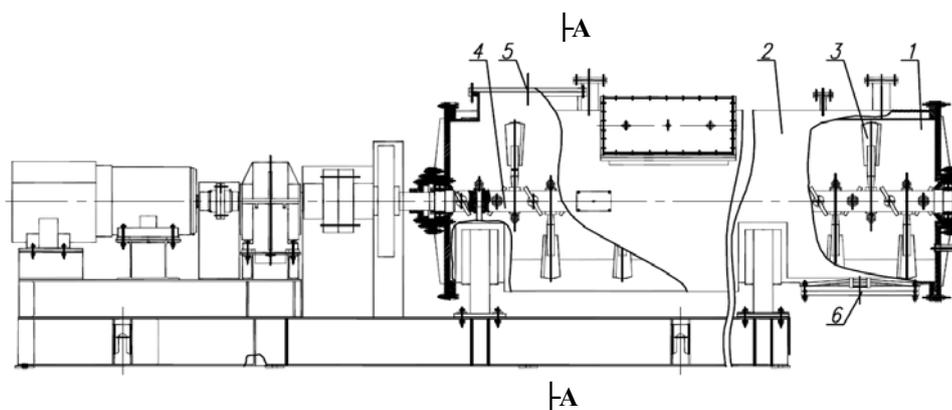


Рис. 1. Гребковая сушилка:

1 – корпус; 2 – рубашка; 3 – лопатки; 4 – вал; 5 – загрузочный люк; 6 – разгрузочный люк

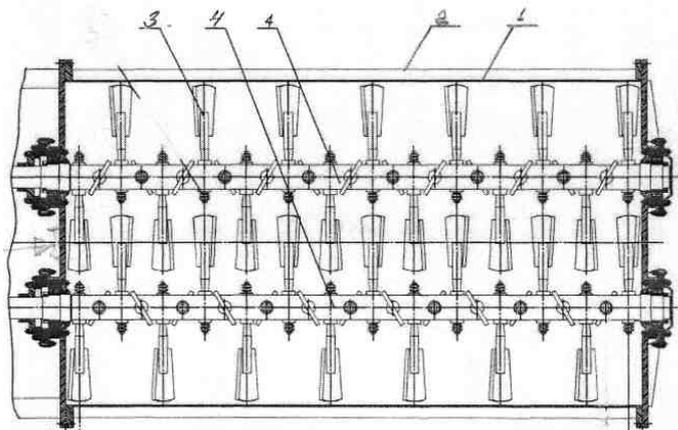


Рис. 2. Размещение лопаток на валах

Корпус сушилки и электропривод установлены на сварной раме, закреплены – зафиксированы на болтах крепежными гайками.

Сушилка работает следующим образом: из бункера (на рисунке не показан) через люк 5 в сушилку непрерывно подается высушиваемый материал. По заполнении сушилки загрузочное устройство герметично закрывается, при частоте вращения ротора сушилки 60...80 об/мин.

На рис. 3 показано поперечное сечение сушилки с вращением валов навстречу друг к другу.

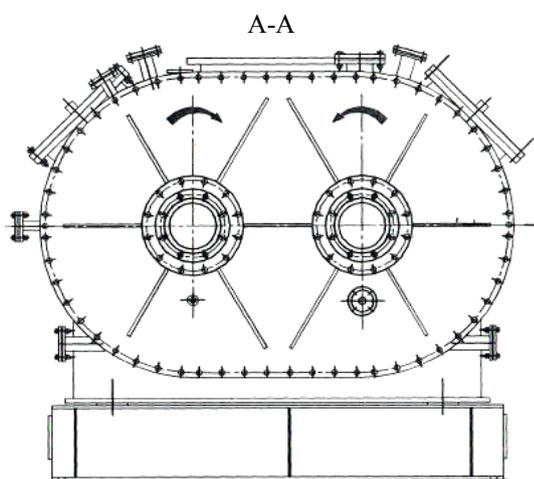


Рис. 3. Поперечное сечение сушилки

Привод аппарата реверсивный, с плавным регулированием частоты вращения роторов от электродвигателя с редуктором. Регулирование частоты вращения (120 об/мин) осуществляется с помощью частотного преобразователя.

Для поддержания заданного температурного режима технологического процесса сушилка оборудована греющей рубашкой 2, в которой циркулирует горячая вода.

Нагрев воды до температуры 100 °С производится острым паром, поступающим из общезаводского коллектора.

Температура нагрева жмыха контролируется термопреобразователем, установленным в корпусе 1 сушилки.

Выгружают готовый продукт через люк 6.

Режим сушки производится при параметрах: температура жмыха 55...60 °С, остаточное давление 0,1...0,2 кгс/см² (75...150 мм. рт. ст.), частота вращения ротора 120 об/мин, время сушки 180...240 мин. Параметры задаются оператором исходя из фактической влажности продукта, подаваемого на сушку.

По окончании режима вакуумирования сушилка переводится в режим выгрузки.

Высушенный продукт представляет собой сыпучую массу с температурой 55...60 °С, с остаточным содержанием влаги 11...15 % (при норме по ТУ не более 8 %).

Из сушилки готовый продукт выгружают на вибросита и далее подают в бункер хранения с последующей фасовкой в мешки.

В процессе исследований кинетики сушки безэфирного горчичного жмыха с влажностью 50 % в вакуумной гребковой сушилке, установлены недостатки: безэфирный горчичный жмых в сушилке подгорает; образуются окатыши; потери протеина в кормовом продукте до 18 %, время сушки 240 минут.

В результате многолетней эксплуатации гребковой сушилки в промышленных условиях на реальных средах выявлены дополнительные недостатки: периодичность процесса; высокая нагрузка на лопатки, что приводит к их поломке; имеет место унос мелкодисперсной пыли высушенного продукта, схема металлоемка. В промышленной гребковой сушилке имеет мес-

то подгар высушиваемого материала и образование окатышей; не сокращены потери протеина в кормовом продукте и длительность процесса его сушки.

Недостатки в конструкции гребковой сушилки, не позволяют получить высоко протеиновую кормовую добавку, предназначенную для реализации и, особенно, к хранению.

Для надежного сохранения питательных веществ в очищенных продуктах переработки семян горчицы и предотвращения их порчи при хранении представляется необходимым разработать завершающую стадию технологического процесса подготовки продуктов переработки семян горчицы к скармливанию, технологию и технические средства их сушки, после извлечения из них эфирного горчичного масла.

Результаты выполняемой работы по данному направлению на обсуждение будут представлены в последующих работах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьева, В. Н. Семена сарептской горчицы, состав и свойства входящих в них компонентов / В. Н. Григорьева [и др.] // Масложировая промышленность. – 1992. – № 2. – С. 6–16.
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пос. для хим.-технол. спец.

вузов. – 8-е изд. перераб. / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

3. Куликов, В. М. Изучение кормового достоинства и эффективность использования побочных продуктов горчичного производства (обезвреженный и необезвреженный горчичный жмых, высевки, горчичная шелуха, фуз) в рационах крупного рогатого скота / В. М. Куликов [и др.] // Отчет о НИР. – Волгоград: СХИ, 1993. – 82 с.

4. Линия по производству кормового концентрата и эфирного горчичного масла. – Волгодонск: ЗАО ЗТО ОНИКС, 2007. – 40 с.

5. Лучковский, Д. В. Совершенствование технологии и оборудования переработки отходов горчично-маслобойного производства: магист. дис. / Д. В. Лучковский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 115 с.

6. Парахневич, Д. В. Комплексная переработка семян горчицы: монография / Д. В. Парахневич [и др.]. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ ВПО ВГСХА, 2009. – 193 с.

7. Парахневич, Д. В. Новая технология переработки семян горчицы: монография / Д. В. Парахневич [и др.]. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2014. – 142 с.

8. Русакова, Г. Г. Горчица: монография / Г. Г. Русакова. – Волгоград: ФГУ ВПО ВГСХА. ИПК «Нива», 2012. – 600 с.

9. Русакова, М. М. Аппарат для очистки от токсичных соединений отходов переработки семян горчицы / М. М. Русакова [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ «Волгоградская ГСХА». – 2012. – № 3. – С. 165–170.

10. Щербаков, В. Г. Биохимия и товароведение масличного сырья: монография / В. Г. Щербаков. – М.: Пищевая пр-ть, 1979. – 3 изд. – 285 с.

УДК 658.52.011.56:519.17

Ю. П. Сердобинцев, А. К. Иванюк, В. А. Рябчук, М. В. Панченко

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСПЫТЫВАЮЩИХ ВНЕШНЕЕ ДАВЛЕНИЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: ivanyuk_aleksei@mail.ru

На сегодняшний день актуален вопрос автоматизации измерения напряженно-деформированного состояния корпусов и их конструктивных элементов электронных приборов, испытывающих внешнее механическое и гидростатическое воздействие при проверке на соответствие техническому заданию, а также при контрольных итоговых испытаниях готовых приборов на производстве. Предложена идея комплексной автоматизированной системы и разработан алгоритм определения деформации конструктивных элементов.

Ключевые слова: автоматизация производства, конструктивные элементы приборов, напряженно-деформированное состояние, тензометрия.

Yu. P. Serdobintsev, A. K. Ivanyuk, V. A. Ryabchuk, M. V. Panchenko

ALGORITHM OF DEFINITION OF TENSELY DEFORMED CONDITION OF THE STRUCTURAL ELEMENTS WHICH ARE EXTERNAL PRESSURE

Volgograd State Technical University

Today topical issue of automation of measurement of the intense deformed condition of cases and their structural elements of the electronic devices experiencing external mechanical and hydrostatic impact when checking for compliance to the specification and also at control total tests of ready devices on production. The idea of the complex automated system is offered and the algorithm of definition of deformation of structural elements is developed.

Keywords: production automation, structural elements of devices, tensely deformed state, tenzometriya.

На сегодняшний день актуальна проблема неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов электронных приборов, испытывающих внешнее механическое и гидростатическое воздействие, при контрольных итоговых испытаниях готовых приборов на производстве. Во время проведения опытных испытаний новых образцов зачастую при проверке на прочность довольно трудно определить деформацию в реальном времени с привязкой к изменяющейся нагрузке. Более того при испытании готовых приборов, к примеру гидростатическим давлением, корпуса с внутренней составляющей могут быть разрушены, поэтому требуется постоянный автоматизированный мониторинг состояния корпуса-оболочки (герметичный пластиковый корпус, используемый для изготовления биев и маячков) и своевременной остановки испытания при необходимости [1].

Из этого следует, что целью данной работы является повышение эффективности проведения неразрушающего контроля для корпусов электронных приборов испытывающих внешнее воздействие. Для этого необходимо разработать алгоритм определения напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов испытывающих внешнее давление.

Для решения поставленной задачи был произведен выбор аппаратуры - микроконтроллер Arduino Nano, для измерения внешней силы используется резистивный датчик. Была собрана конструктивная схема измерительного устройства. Для тарирования датчика и исследования процесса деформации в первую очередь была определена зависимость изменения сопротивления тензорезистивного датчика от изменения нагрузки [2].

После этого полученная функция была записана в разработанную программу (язык C++) для микроконтроллера, что позволяет в дальнейшем получать непрерывную информацию о деформации исследуемого объекта и нагружаемого веса. Таким образом, была получена обратная связь с нагрузочным устройством [3].

Следующим этапом был разработан алгоритм автоматизированного измерения и кон-

троля НДС (рис. 1). По теоретическим расчетам задается предельная нагрузка для исследуемого объекта, задаются шаг нагрузки, коэффициент запаса прочности, определяемый по табличным данным для используемого материала и допустимое значение деформации. На следующем этапе определяется предельная деформация. Оператором назначается начальная нагрузка [4]. На устройстве вывода отображаются значения сопротивления тензорезистивного датчика. По экспериментально выведенным формулам определяются значения нагрузки (Н) и деформации (мм). После значения нагрузки сравнивается со значением предельной нагрузки. В случае, если текущая нагрузка меньше предельной, сравниваются значения деформации с допустимым значением, если оно меньше, то на экран выводится информация о том, что данные значения входят в допустимый диапазон, и исследуемый объект успешно проходит испытания. Если текущая деформация больше допустимой, происходит сравнение с предельной деформацией. Пока значение деформации не превышает предельного, на экране отображается предупреждение о том, что объект исследования требует доработок в своей конструкции, и возможна частичная потеря работоспособности объекта [5]. При превышении предельного значения деформации выводится сообщение о том, что данная деформация может привести к полной потере работоспособности и разрушению конструкции исследуемого объекта. Если нагрузка достигает предельных значений, то происходит аварийная остановка испытания, сопровождающаяся световым сигналом [6].

После составления алгоритма была разработана программа на основе алгоритма на языке C++. Вывод данных представлен на рис. 2.

В таблице выводимых значений отображаются данные трех тензорезистивных датчиков при разной нагрузке испытываемой конструкции. Также производится сортировка по критерию годности участков конструкции, на которых установлены тензорезистивные датчики. Такая визуализация позволяет быстро определить, какой участок конструкции необходимо усилить [7].

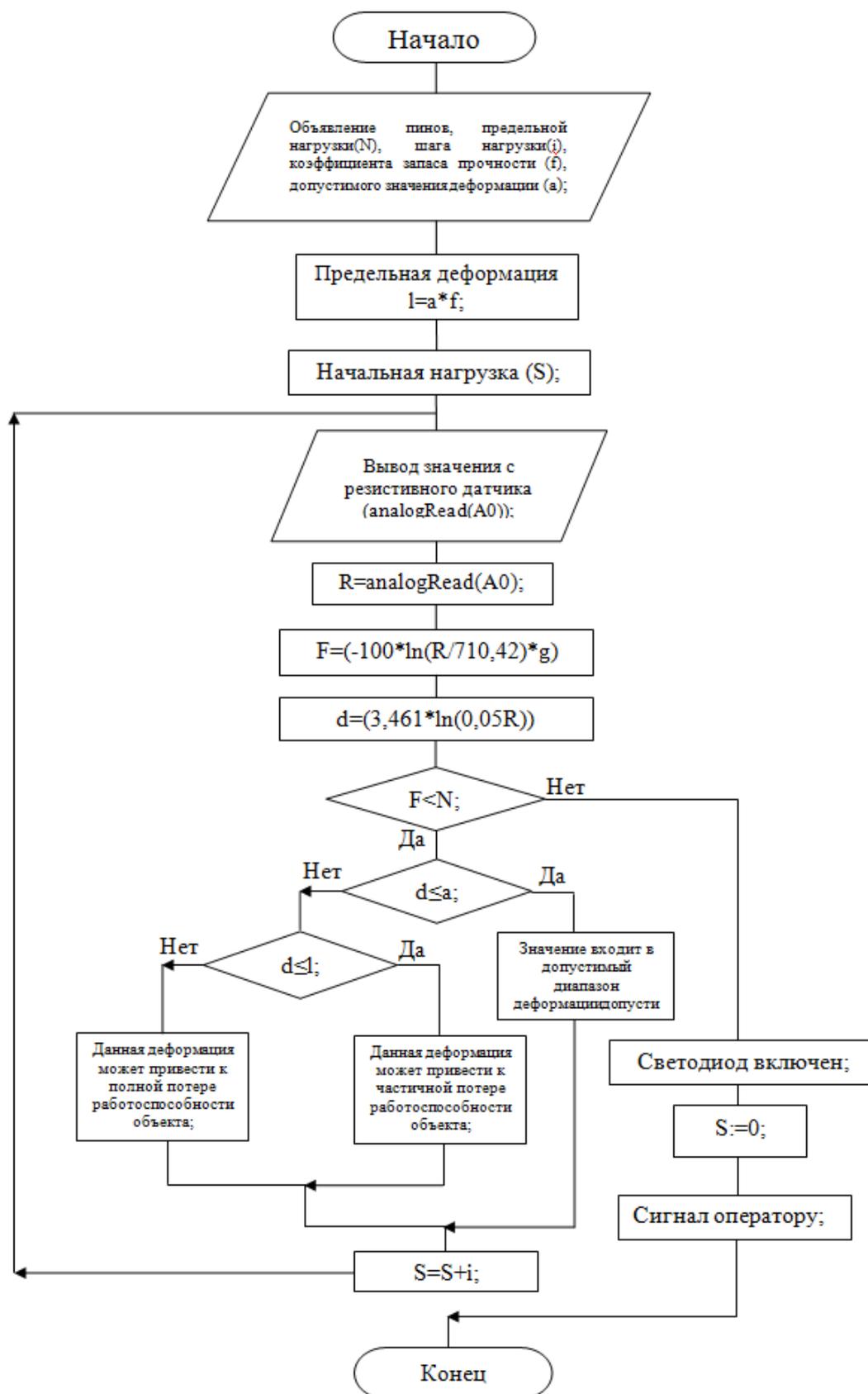


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного измерения и контроля НДС

	vhodit v dopustimiy diapazon	trebuets chastichnoy dorabotki	polnaya poterya rabotosposobnosti
R0 = 522 kOm R1 = 307 kOm R2 = 654 kOm		d1 = 9.45 mm	d0 = 11.29 mm d2 = 12.07 mm
R0 = 467 kOm R1 = 71 kOm R2 = 102 kOm	d1 = 4.38 mm d2 = 5.64 mm	d0 = 10.90 mm	
R0 = 452 kOm R1 = 168 kOm R2 = 573 kOm	d1 = 7.37 mm	d0 = 10.79 mm	d2 = 11.61 mm
R0 = 516 kOm R1 = 634 kOm R2 = 526 kOm			d0 = 11.25 mm d1 = 11.96 mm d2 = 11.32 mm
R0 = 339 kOm R1 = 624 kOm R2 = 158 kOm	d2 = 7.15 mm	d0 = 9.80 mm	d1 = 11.91 mm
R0 = 283 kOm R1 = 262 kOm R2 = 179 kOm	d2 = 7.59 mm	d0 = 9.17 mm d1 = 8.90 mm	
R0 = 379 kOm R1 = 637 kOm R2 = 558 kOm		d0 = 10.18 mm	d1 = 11.98 mm d2 = 11.52 mm
R0 = 338 kOm R1 = 414 kOm R2 = 560 kOm		d0 = 9.79 mm d1 = 10.49 mm	d2 = 11.53 mm
R0 = 381 kOm R1 = 60 kOm R2 = 644 kOm	d1 = 3.80 mm	d0 = 10.20 mm	d2 = 12.02 mm

Автопрокрутка

Рис. 2. Выходные данные с Arduino Nano

Таким образом, была предложена идея комплексной автоматизированной системы неразрушающего контроля электронных приборов. Предложен алгоритм определения напряженно деформированного состояния конструктивных элементов испытывающих внешнее давление.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анцыперов, С. А. Современные методы измерения напряженно-деформированных состояний корпусов конструкций и аппаратов / С. А. Анцыперов, А. К. Иванюк // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 69–71.

2. Виртуальные испытания как средство оптимизации затрат в опытном производстве гидроакустических приборов / А. А. Емельяненко, А. К. Иванюк, О. И. Жабин, Д. В. Ярошик // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 9. – С. 25–27 + 2-я и 3-я стр. обложки.

3. П. м. 172816 Российская Федерация, МПК G01B7/16, G01N3/08 Устройство для измерения деформации при испытаниях конструкций на прочность / Ю. П. Сердобинцев, А. К. Иванюк, В. А. Рябчук, М. В. Панченко ; ВолгГТУ. – 2017.

4. Сердобинцев, Ю. П. Analyzing the stress-strain state of object bodies subjected to hydrostatic pressure using modern CAD systems [Электронный ресурс] / Ю. П. Сердобинцев, А. К. Иванюк // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016). – [Publisher: IEEE], 2016. – 5 p. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911678.

5. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017611758 от 9 февраля 2017 г. Российская Федерация, МПК. Измерение НДС резистором изгиба / Ю. П. Сердобинцев, А. К. Иванюк ; ВолгГТУ. – 2017.

6. Иванюк, А. К. Проведение имитационных исследований в современных САД средах / А. К. Иванюк, Ю. П. Сердобинцев // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2016) : тез. 16-й междунар. конф. (г. Москва, 17–19 окт. 2016 г.) / под ред. А. В. Толока ; ФГБУН «Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН», РФФИ (грант № 16-37-10306/16). – Москва, 2016. – С. 138.

7. Сердобинцев, Ю. П. Deformation of Instrument Housings under External Pressure / Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров, А. К. Иванюк // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, No. 8. – С. 675–678.

УДК 658.52:621.9.04

С. В. Хатюхин, А. А. Антонюк, А. Г. Алехин

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведен анализ систем обработки металлов электрохимическим полированием. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния установленных параметров варьирования на качество обрабатываемой поверхности, на основании которых получена математическая модель процесса электрохимической полировки. Рассчитаны параметры системы, обеспечивающие оптимальный режим работы.

Ключевые слова: электрохимическая полировка, анодная плотность тока, электролит, травление.

S. V. KHatyukhin, A. A. Antonyuk, A. G. Alyokhin

DEVELOPMENT AND CALCULATION OF ELECTROCHEMICAL POLISHING CYLINDRICAL ALUMINUM PRODUCTS

Volgograd State Technical University

The analysis of metal treatment systems by electrochemical polishing is carried out. The results of experimental studies of the influence of the established variation parameters on the quality of the treated surface are presented, on the basis of which a mathematical model of the electrochemical polishing process was obtained. The system parameters are calculated, which ensure the optimal operation mode.

Keywords: electrochemical polishing, anode current density, electrolyte, etching.

Несмотря на достаточно широкую область применения электрохимической обработки, существенным недостатком этого метода является технологическая сложность. Если при выборе состава электролита можно руководствоваться некоторыми соображениями теоретического порядка, то установление оптимального режима электрохимической полировки (ЭХП) осуществляется пока лишь опытным путем. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является применение системы автоматического управления процессом ЭХП металлических изделий. Поэтому создание экспериментальной управляемой установки ЭХП для поиска оптимальных параметров и дальнейшего проектирования САУ процесса обработки является актуальной задачей [1, 4].

В результате анализа процессов, протекающих при ЭХП металла, была разработана экспериментальная установка, представляющая собой нагреваемую ванну с раствором ортофосфорной кислоты и подведенными к ней электродами. Схема разработанной экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Отшлифованный алюминиевый образец 2 (анод) включают в цепь постоянного тока, создаваемого выпрямителем 6, и помещают в электролитную ванну 3, заполненную электролитом 4. Катодом 1 служит полый стальной цилиндр,

внутри которого помещен отшлифованный образец. Для равномерного протекания процесса полирования электролит перемешивают электрической мешалкой 5.

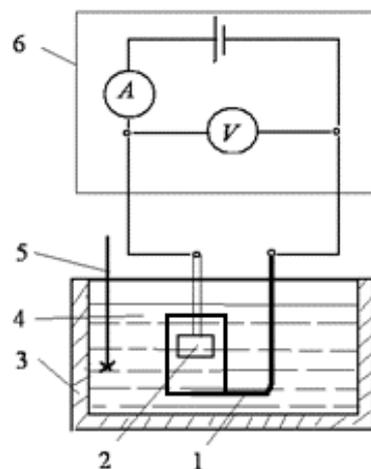


Рис. 1. Схема установки для электролитического полирования

Натурный эксперимент был проведен методами планирования эксперимента, где параметром оптимизации являлась шероховатость поверхности детали, а варьируемыми факторами взяты величина анодного потенциала, анодная плотность тока, напряжение на клеммах ванны, температура и концентрация электролита. Ме-

тодом регрессионного анализа была разработана математическая модель процесса ЭХП в MathCad, где ключевым фактором явилась анодная плотность тока. На рис. 2 изображен график зависимости анодной плотности тока j от величины напряжения U в ванне.

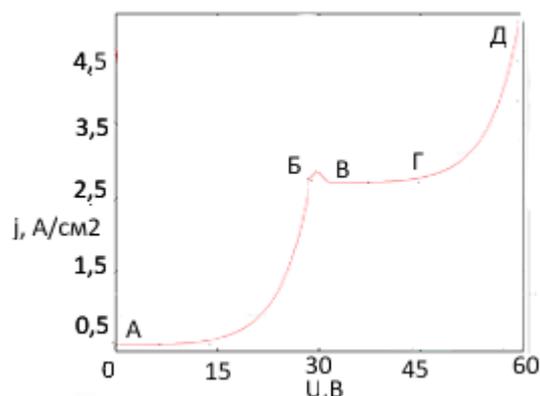


Рис. 2. График зависимости анодной плотности тока от величины напряжения в ванне

На участке АБ повышение тока почти пропорционально увеличению напряжения. На участке БВ режим нестабилен, наблюдается колебание тока и напряжения. Предельный ток, соответствующий участку ВГ, характеризует процесс формирования на аноде пассивной пленки. При этом повышение напряжения в довольно широком интервале не сопровождается изменением плотности тока. По достижении напряжения, соответствующего точке поворота Г на графике, начинается новый процесс – образование газообразного кислорода [2, 3].

Установлена следующая зависимость влияния плотности тока на процесс ЭХП и качество поверхности обрабатываемой детали: при плотностях тока, значительно превышающих оптимальные значения (больше $2,5 \text{ A/cm}^2$), происходит бурное газовыделение, перегрев и травление поверхности металла, повышается удельный расход энергии и снижение выхода по току. Также экспериментально было установлено, что на интенсивность газообразования оказывает величина зазора между анодом и катодом. Для обеспечения оптимальных значений плотности тока при необходимом напряжении на клеммах электролизной ванны был проведен расчет допустимого диаметра цилиндра катода в зависимости от диаметра обрабатываемой детали. На рис. 3 показано взаиморасположение анода и катода, а также указаны максимальный и минимальный диаметры цилиндра катода.

Таким образом, оптимальное отношение диаметра катода D_K к диаметру анода D_A должно находиться в пределах от 4 до 5.

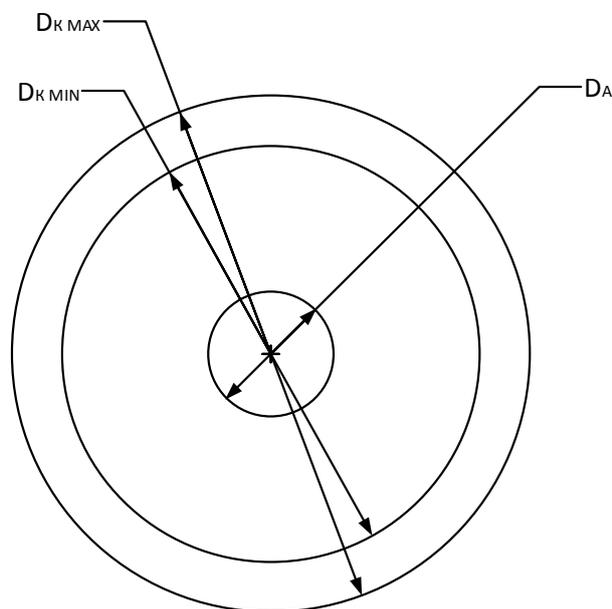


Рис. 3. Схема оптимального расположения анода и катода

Применение предложенной схемы установки и найденных оптимальных параметров для электрохимической полировки алюминиевых изделий позволяет повысить эффективность обработки и избежать бурного газовыделения, перегрева и травления поверхности металла.

В дальнейшем планируется усовершенствование данной системы путем автоматизации процесса по полученной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щиголов, П. В. Электрохимическое и химическое полирование металлов / П. В. Щиголов // Технология обработки поверхности металла, 2005. – № 1. – С. 64–72.
2. Пяндрин, Т. Н. Электрохимическая обработка металлов / Т. Н. Пяндрин // Металлургия. – 2010. – 6. – С. 21–25.
3. Масловский, В. В. Полирование металлов и сплавов / В. В. Масловский, П. Д. Дудко // Металлургия. – 2012. – № 4. – С. 27–30.
4. Сухотин, А. М. Технология химической и электрохимической обработки поверхности металлов / А. М. Сухотин // Электрохимия. – 2007. – № 1. – С. 8–11.
5. Грилихес, С. Я. Электрохимическое травление, полирование и оксидирование металлов / С. Я. Грилихес // Технология обработки поверхности металла. – 2010. – № 1. – С. 69–72.
6. Грилихес, С. Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С. Я. Грилихес // Технология обработки поверхности металла. – 2011. – № 2. – С. 39–43.

УДК 001.51: 621–023

*А. А. Яковлев, О. С. Харькин, С. Г. Поступаева, А. А. Михайлов***АЛГОРИТМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ
С ГАЗООБРАЗНОЙ АКТИВНОЙ СРЕДОЙ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: yaa_777@mail.ru

Описан алгоритм, позволяющий на основе построения модели физического принципа действия разработать таблицу возможных технических решений технологических лазеров с газообразной активной средой и выявить в ней наиболее перспективные варианты для дальнейшей конструктивной реализации.

Ключевые слова: технологический лазер, физический принцип действия, техническое решение.

*A. A. Yakovlev, O. S. Khar'kin, S. G. Postupaeva, A. A. Mikhailov***ALGORITHM FOR DEVELOPMENT OF NEW
DESIGN OF TECHNOLOGICAL LASERS
WITH GASEOUS ACTIVE ENVIRONMENT****Volgograd State Technical University**

An algorithm is described that allows developing a table of possible technical solutions of technological lasers with a gaseous active medium on the basis of constructing a model of the physical principle of action and identifying in it the most promising options for further constructive realization.

Keywords: technological laser, physical principle of operation, technical solution.

Технологические лазеры (ТЛ) с газообразной активной средой получили распространение в различных областях техники. В настоящее время возрастают требования к срокам их разработки, поэтому повышение производительности труда конструкторов является актуальной задачей. Одним из путей ее решения является создание методов проектирования для поддержки принятия решений на начальных этапах проектирования ТЛ.

В основу предлагаемого метода заложена модель физического принципа действия (ФПД), позволяющая определить структуру проектируемого устройства, физические процессы, необходимые для его функционирования, и состав конструктивных элементов [1]. Модель представляет собой ориентированный граф, позволяющий учитывать перемещения и взаимодействия активной среды ТЛ в пространстве и во времени [2]. В рамках метода предусмотрен алгоритм построения данной модели ФПД на основе описания конструкции-прототипа.

Для повышения производительности труда разработчиков ТЛ также необходима методика синтеза технических решений, которая позволит формализовать и автоматизировать наиболее нетривиальные и трудоемкие процессы поиска новых технических решений ТЛ [3, 4].

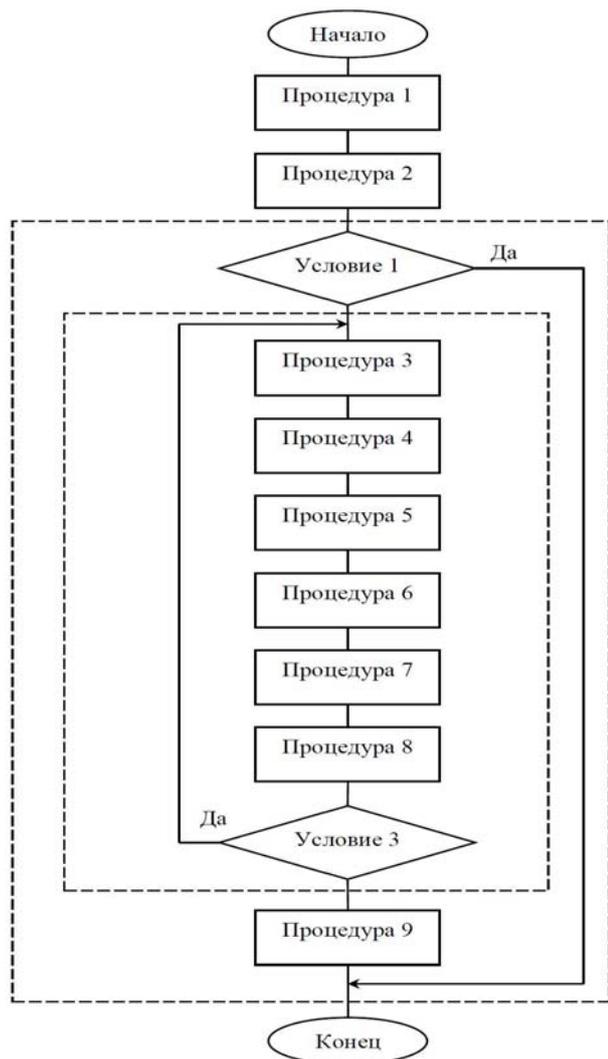
Данная методика позволяет на основе модели ФПД сформировать список элементарных функции конструктивных элементов [3]. Каждая элементарная функция соответствует определенным элементам графа ФПД (вершинам или ребрам). Элементарные функции являются связующим звеном между моделью ФПД и конструкцией проектируемого устройства. Разработанная методика синтеза технических решений представлена в виде блок-схемы на рисунке.

Он состоит из восьми процедур, вызов которых определяется двумя условиями. После выполнения двух процедур проверяется условие 1. При его выполнении (не найдено вариантов активной среды) алгоритм заканчивается. В противном случае выполняется тело цикла, которое состоит из последовательного вызова процедур 3–8. Продолжение цикла определяется условием 2. Далее приведен список процедур и условий алгоритма синтеза технических решений ТЛ.

Процедура 1. Определение списка показателей качества

Входные данные: техническое задание на разработку ТЛ.

Выходные данные: список показателей качества.



Алгоритм синтеза технических решений лазеров с газообразной активной средой

Процедура 2. Выбор вещества рабочего тела. Выявление альтернативных вариантов для реализации активной среды

Входные данные: модель ФПД с вербальными описаниями его компонентов (вершин и дуг).

Выходные данные: список альтернативных вариантов веществ для реализации активной среды.

Проверка условия 1. Не найдено альтернативных вариантов активной среды?

Процедура 3. Определение элементарных функций, связанных с вершинами и дугами графа ФПД

Входные данные: 1) описание активной среды; 2) модель ФПД.

Выходные данные: 1) список элементарных функций.

Процедура 4. Определение элементарных функций для изоляции внешних степеней свободы.

Входные данные: 1) описание активного вещества; 2) модель ФПД.

Выходные данные: список элементарных функций.

Процедура 5. Определение источников информации

Входные данные: список элементарных функций.

Выходные данные: список источников информации.

Процедура 6. Составление списка альтернативных элементов

Входные данные: 1) список источников информации; 2) список показателей качества.

Выходные данные: список альтернативных конструктивных элементов.

Процедура 7. Составление матрицы технических решений

Входные данные: 1) списки элементарных функций; 2) список элементов с оценками по показателям качества на которые они влияют.

Выходные данные: матрица технических решений.

Процедура 8. Синтез вариантов технических решений

Входные данные: 1) матрица технических решений; 2) список элементов.

Выходные данные: список технических решений.

Проверка условия 2. Имеются альтернативные варианты активной среды?

Процедура 9. Выбор лучших технических решений

Входные данные: 1) список технических решений; 2) список показателей качества; 3) список критериев выбора.

Выходные данные: список лучших технических решений.

Множество технических решений получается путем подбора различных комбинаций конструктивных элементов так, чтобы получить из них наборы, выполняющие все задокументированные функции. Количество элементов в техническом решении может быть различным, что отличает данный подход от того, который используется в морфологическом методе.

Представленная методика позволяет на основе структуры проектируемого устройства, представленной в виде модели ФПД, осуществлять генерацию новых технических решений ТЛ из элементов, существующих в патентном фонде и научно-технической литературе. В результате повышается производительность (сот-

ни и тысячи новых технических решений в месяц) труда конструктора на начальных стадиях проектирования ТЛ с газообразной активной средой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камаев, В. А. Обучение концептуальному проектированию преобразователей энергии на базе системного подхода / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Открытое образование. – 2005. – № 5 (52). – С. 62–69.
2. Яковлев, А. А. Метод построения моделей физических принципов действия преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 10. – С. 22–28.

3. Яковлев, А. А. Инженерно-физический подход к проектированию преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 2. С. 32–38.

4. A new method of search design of refrigerating systems containing a liquid and gaseous working medium based on the graph model of the physical operating principle [Электронный ресурс] / А.А. Яковлев, В.С. Сорокин, С.Н. Мишустина, Н.В. Пройдакова, С.Г. Поступаева // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, No. 1 : International Conference on Information Technologies in Business and Industry (21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation). – 7 p. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/803/1/012181>.

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 (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2018 г. Поз. № 7ж. Подписано в печать 26.02.2018 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 10,13.

Тираж 80 экз. Свободная цена. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.