

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

**Редакционная коллегия:**

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

Серия  
«ПРОГРЕССИВНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

# ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

*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.

*Ханов Г. В.*, д.т.н., проф.

*Тескер Е. И.*, д.т.н., проф.

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

*Паиков 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.

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

Международный индекс журнала  
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется  
по подписке.

Индекс журнала по каталогу  
Агентства «Роспечать»

для Российской Федерации –  
80811(ОК+ЭК). По вопросам  
подписки обращаться  
в издательство.

**Тел. издательства ВолГТУ:**

(8442) 24-84-06

Факс (8442) 24-84-06

otr@vstu.ru

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

**№ 5 (200)**  
**Май**  
**2017**

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**

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

**Адрес редакции:**

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.

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

**E-mail:** president@vstu.ru

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

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

### **Editorial board:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Revin A. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SERIES  
«ADVANCED  
TECHNOLOGY IN  
MACHINE BUILDING»

# IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY

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

## Editorial board:

### Chairman

**Polyanchikov Y.N.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.  
**Serdobintsev Y.P.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (Vice-chairman)  
**Bez'yazychniy V.F.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (RSATU  
named after P.A. Solovyov, Rybinsk)  
**Skhirtladze A.G.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.  
(MSTU STANKIN, Moscow)  
**Mukhin A.V.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof. (Bauman MSTU, Moscow)  
**Brzhozovsky B. M.**, D. Sc.  
(SSTU, Saratov)  
**Korolev A.V.**, D. Sc., Prof.  
(SSTU, Saratov)  
**Shumyacher V.M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof., Rector  
(Volzhski affiliate of VSUACE,  
Volzhski)  
**Sidyakin Y.I.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Khanov G.V.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Tesker E.I.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Blagoveschenskaya M.M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof., Vice-rector  
(MSUFP, Moscow)  
**Pashkov E.V.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof., First vice-rector  
(SEVNTU, Sevastopol)  
**Popov V.I.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof. (MSUAB, Moscow)  
**Serdobintsev S.P.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.  
(KSTU, Kaliningrad)  
**Plotnikov A.L.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Kraynev D.V.** (executive secretary),  
Cand. Sc., Ass. Prof.

International index of the journal  
ISSN 1990-5297.

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

**Tel. Of VSTU editorial office:**  
(+7 8442) 24-84-06  
Fax: (+7 8442) 24-84-06  
otr@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 5 (200)**  
**May**  
**2017**

**FOUNDER:**  
FSBEI of Higher Professional Education  
«Volgograd State Technical University»

**Editorial office address:**  
Volgograd, Lenin avenue, 28.  
Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

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

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

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

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

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Александров А. А. 32, 46  
Алехин А. Г. 76  
Балаев А. Ф. 7  
Банников А. И. 30  
Барабанов В. Г. 51, 59  
Букатин А. С. 55  
Бурков Ю. Г. 55  
Ветлицын Н. Ю. 41  
Гаврилов Д. П. 59  
Генералов С. П. 70  
Голубин О. С. 66  
Горюнов В. А. 55, 66  
Грязнов И. Е. 78  
Гудеев М. С. 12  
Драчев О. И. 14, 18  
Дудников Д. А. 55  
Егоров Н. И. 25, 41  
Ермишов Д. Д. 62  
Зверьяк Е. А. 82  
Као С. Ч. 25  
Капитанов А. В. 68  
Карлов В. И. 85, 91  
Кожевникова А. А. 30  
Козловцева Н. В. 68  
Корзин В. В. 55, 66  
Крайнев Д. В. 20  
Крылов Е. Г. 62, 68  
Крыхтин Ю. И. 85, 91  
Кузнецова А. С. 36  
Курсин О. А. 25  
Кухтик М. П. 62, 70  
Лапиков М. А. 73  
Липатов А. А. 26, 28  
Мазырина А. М. 82  
Макаров А. М. 62, 68, 70, 73  
Макарова О. А. 30  
Мушкин О. В. 73  
Нестеренко П. С. 43  
Николаев Е. В. 76  
Нилов Д. Ю. 20  
Носенко В. А. 32, 36  
Носенко С. В. 36  
Отений Я. Н. 20  
Плотников А. Л. 25  
Полянчиков Ю. Н. 41  
Полянчикова М. Ю. 41  
Поступаева С. Г. 78  
Рязанов А. Н. 66  
Савчиц А. В. 82  
Санинский В. А. 46  
Сердобинцев Ю. П. 73  
Сердюков Н. Д. 36  
Сиваков И. В. 82  
Тышкевич В. Н. 46  
Фам С. Б. 25  
Фролов Е. М. 12  
Харитонов И. А. 70  
Харькова Е. А. 51  
Чигиринский Ю. Л. 43  
Ягодкин Д. С. 20

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

### Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Балаев А. Ф.</i> Технология стабилизации колец подшипников на основе геометрической наладки оборудования для бесцентровой обкатки.....	7
<i>Гудеев М. С., Фролов Е. М.</i> Степени готовности современных систем числового программного управления металлорежущими станками к четвертой промышленной революции.....	12
<i>Драчев О. И.</i> Исследование влияния термосиловой обработки на эксплуатационные характеристики маложестких осесимметричных деталей.....	14
<i>Драчев О. И.</i> Система автоматического управления эксплуатационной точностью длинномерных валов.....	18
<i>Крайнев Д. В., Отений Я. Н., Нилов Д. Ю., Ягодкин Д. С.</i> Повышение качества обработанной поверхности при точении аустенитной стали с опережающим пластическим деформированием.....	20
<i>Курсин О. А., Плотников А. Л., Као С. Ч., Фам С. Б., Егоров Н. И.</i> Исследование способа хонингования с предварительным наводораживанием при обработке крупногабаритных изделий из аустенитных сталей.....	25
<i>Липатов А. А.</i> Неустойчивость деформирования в контактной зоне в условиях неустойчивого стружкообразования при резании аустенитной стали твердосплавным инструментом.....	26
<i>Липатов А. А.</i> Характер контактного взаимодействия на площадке износа твердосплавного инструмента при точении аустенитной стали.....	28
<i>Макарова О. А., Кожевникова А. А., Банников А. И.</i> Исследование нароста на вершине зуба пилы при термофрикционном резании горячего проката.....	30
<i>Носенко В. А., Александров А. А.</i> Зависимость среднего и дисперсии длины зерен фракций шлифовальных порошков карбида кремния черного от размера ячейки проходного сита.....	32
<i>Носенко С. В., Носенко В. А., Сердюков Н. Д., Кузнецова А. С.</i> Составляющие силы резания плоского врезного шлифования титанового сплава высокоструктурными кругами.....	36
<i>Полянчикова М. Ю., Полянчиков Ю. Н., Егоров Н. И., Ветлицын Н. Ю.</i> Формирование структуры однокомпонентного абразивного инструмента на этапе изготовления прессовки абразивной смеси.....	41
<i>Чигиринский Ю. Л., Нестеренко П. С.</i> К вопросу управления точностью продольного профиля деталей типа нежесткий вал.....	43
<i>Санинский В. А., Тышкевич В. Н., Александров А. А.</i> Комплектование многоместного приспособления для одновременной гидроабразивной обработки длинномерных труб.....	46

## Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Барабанов В. Г., Харьковская Е. А.</i> Разработка систем автоматизации контроля герметичности запорных газовых кранов.....	51
<i>Букатин А. С., Дудников Д. А., Горюнов В. А., Корзин В. В., Бурков Ю. Г.</i> Формирование микроструктур быстродействующих струйных систем управления на основе фоторезиста SU-8 и ПДМС.....	55
<i>Гаврилов Д. П., Барабанов В. Г.</i> Использование преобразователя частоты для управления криогенным насосным агрегатом.....	59
<i>Ермишов Д. Д., Макаров А. М., Крылов Е. Г., Кухтик М. П.</i> Моделирование физических процессов в биореакторе.....	62
<i>Корзин В. В., Голубин О. С., Горюнов В. А., Рязанов А. Н.</i> Применение струйных малогабаритных регуляторов в качестве альтернативы мембранным регуляторам.....	66
<i>Крылов Е. Г., Макаров А. М., Козловцева Н. В., Капитанов А. В.</i> Выявление критических состояний технологической системы с использованием таблиц решений.....	68
<i>Кухтик М. П., Макаров А. М., Харитонов И. А., Генералов С. П.</i> Расчет оптимальных параметров настройки пи-регулятора методической печи.....	70
<i>Мушкин О. В., Макаров А. М., Сердобинцев Ю. П., Лапиков М. А.</i> Структурно-функциональный анализ систем автоматического дозирования сыпучих материалов.....	73
<i>Николаев Е. В., Алехин А. Г.</i> Настройка цифровых регуляторов для объектов второго порядка с запаздыванием.....	76
<i>Поступаева С. Г., Грязнов И. Е.</i> Реализация алгоритмов нечеткого вывода для настройки пи-регулятора.....	78
<i>Савчиц А. В., Зверяк Е. А., Сиваков И. В., Мазырина А. М.</i> Разработка адаптивного позиционного регулятора совместно с системой диагностирования технического состояния для электронагревательных элементов.....	82
<i>Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.</i> Разработка новой блокирующей обоймы конического инерционного синхронизатора фрикционных устройств трансмиссий транспортных машин для повышения надежности и долговечности работы в масле.....	85
<i>Крыхтин Ю. И., Карлов В. И.</i> Разработка, изготовление и испытание дисков с комбинированной поверхностью трения на базе бронзового плазменного покрытия для повышения надежности и долговечности работы в масле фрикционных устройств трансмиссий транспортных машин.....	91

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.789

*А. Ф. Балаев*

### ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НАЛАДКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БЕСЦЕНТРОВОЙ ОБКАТКИ

Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

E-mail: bandrey.sc@gmail.com

Кольца подшипников относятся к категории маложестких деталей, релаксация остаточных напряжений которых сопровождается значительной деформацией колец и потерей достигнутой геометрической точности. Один из перспективных технологических подходов по снижению остаточных напряжений и стабилизации размеров состоит в циклическом нагружении колец. Для реализации данного подхода разработана технология стабилизации геометрических параметров колец подшипников, которая заключается в многократном циклическом упругом нагружении детали при ее обкатке между тремя вращающимися валками. Непрерывное движение колец и создание технологической упругой деформации обеспечивается геометрической наладкой валкового устройства. Геометрическая наладка состоит в развороте осей вращения двух валков на регулируемый угол друг относительно друга в вертикальной плоскости и установке расстояния между осями. С увеличением угла разворота валков увеличиваются продольная подача колец и производительность обработки, но уменьшается число циклов нагружения и исходная технологическая деформация. Для снятия остаточных напряжений необходимо определенное количество циклов нагружения при заданной величине технологической деформации. Для расчета оптимальных геометрических параметров наладки, обеспечивающих снятие остаточных напряжений колец при максимальной производительности, была разработана аналитическая модель.

*Ключевые слова:* технология, модель, стабилизация, бесцентровая обкатка, кольца подшипников, наладка.

Bearing rings are classified as low-rigid parts, residual stress relaxation is accompanied by significant deformation of the Rings and the loss of geometric accuracy achieved. One of the most promising technological approaches to reduce residual stresses and stabilize the size of a cyclic loading rings. To implement this approach created the technology of stabilization of geometrical parameters of bearing rings, which is repeated cyclic loading of elastic parts at its run-in between the three rotating rollers. The continuous movement of the rings and the creation process of elastic deformation is provided by the geometrical adjustment roller device. Geometric adjustment comprises adjusting the angle of rotation of rotation axes of the two rolls relative to each other in a vertical plane and the distance between the axles. Increasing the angle of rotation of the rollers increases the velocity of the rings and processing performance, but reduces the number of loading cycles and initial technological deformation. For removal of residual stresses must be a certain number of cycles at a given value technological deformation. To calculate the optimal geometric parameters of adjustment to ensure the removal of residual stresses rings at maximum capacity, the analytical model was developed.

*Keywords:* technology, model, stabilization, centerless running, bearing rings, adjustment.

#### Введение

Остаточные напряжения являются одной из главных причин снижения геометрической точности деталей в процессе их эксплуатации, особенно в подвижных узлах машин и механизмов. Наиболее чувствительны к влиянию остаточных напряжений маложесткие цилинд-

рические детали, к которым относятся кольца подшипников. Даже небольшие остаточные напряжения, возникающие в кольцах подшипников в процессе механической и термической обработки, приводят к значительной деформации колец и потери достигнутой геометрической точности. По этой причине технологичес-

кий процесс изготовления металлических колец подшипников содержит операцию отпуска, призванную стабилизировать геометрические параметры изделия, путем снятия остаточных напряжений.

Наибольшее распространение в производстве получил термический отпуск, который заключается в нагреве, выдержке на протяжении нескольких часов при постоянно поддерживаемой высокой температуре, и последующем медленном охлаждении деталей. Несмотря на достаточную изученность данной технологии стабилизации металлических изделий, она обладает низкой производительностью и большой энергоемкостью. Устранение этих недостатков лежит в исследовании и разработке новых способов стабилизации основанных на иных физических механизмах релаксации остаточных напряжений. Один из таких перспективных подходов, эффективность которого получила многократное подтверждение [1], заключается в применении энергии вибромеханических колебаний, при постепенном накоплении которой в материале происходят сдвиговые деформации, сопровождаемые релаксацией остаточных напряжений. Для реализации данного подхода авторами был разработан и апробирован в условиях реального производства способ обработки кольцевой детали непрерывной обкаткой тремя валками [2].

#### Технология стабилизации колец бесцентровой обкаткой

Разработанная технология стабилизации геометрических параметров колец подшипников заключается в многократном циклическом нагружении детали при ее обкатке между тремя вращающимися валками. По действием повторяющейся упругой деформации колец при обкатке валками под давлением происходит постепенное накопление внутренней энергии в зонах остаточных напряжений. По мере накопления внутренней энергии дислокационных образований происходят сдвиговые пластические деформации микрозерен материала, сопровождаемые релаксацией остаточных напряжений. Поскольку прирост внутренней энергии осуществляется небольшими порциями, вследствие повторяющегося циклического характера нагружения в области упругих деформаций, то достигшая критического уровня энергия вызывает пластический сдвиг прежде, чем начнется пластическая деформация самих зерен. Благодаря такому подходу изменение формы и раз-

меров обрабатываемой детали в ходе обработки не происходит.

Поскольку кинематика движения обкатываемых колец аналогична кинематике при их бесцентровом суперфинишировании, то для обкатки применяется аналогичное валковое устройство и принцип его наладки. Валковое устройство, представленное на рисунке, состоит из двух цилиндрических валков с равными диаметрами, имеющих возможность разворота осей вращения на угол  $2\lambda$  относительно друг друга в вертикальной плоскости и установки расстояния  $2\nu$  между ними. Обрабатываемая деталь  $1$  базируются по цилиндрическим поверхностям валков  $2$  и  $3$ . Для создания упругой технологической деформации  $\Delta$  к детали  $1$  прикладывается нагрузка  $P$  с помощью вала  $4$ , обеспечивающего силовое замыкание контакта детали и трех валков. Радиальная нагрузка  $P$ , создаваемая валком  $4$ , прикладывается к детали в месте, равноудаленном от мест ее контакта с базирующими валками. Один из базирующих валков сообщает вращательное движение  $n$  детали  $1$ , в результате чего происходит волнообразное упругое деформирование материала по всей окружности детали на величину технологической деформации  $\Delta$ . Взаимный разворот осей валков в противоположном направлении на угол  $2\lambda$  обеспечивает непрерывную продольную подачу вращающейся детали вдоль траектории  $5$ .

Как было установлено в работе [3], траектория движения детали представляет собой дугу окружности, радиус которой однозначно связан с отклонением траектории  $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$  в вертикальной плоскости. Поэтому для определения отклонения  $\Delta h$  достаточно вычислить положение центра детали в среднем и одном из крайних сечений  $Z_{\Sigma}$ . Отклонение в вертикальной плоскости  $\Delta h$  при постоянном положении оси верхнего валка непосредственно определяет величину изменения технологической деформации. Очевидно, что при дуговой симметричной траектории движения детали в верхней точке, соответствующей среднему сечению  $Z_{\Sigma}$ , технологическая деформация будет принимать максимальное значение соответствующее начальной или номинальной величине  $\Delta_0$ . В нижней точке, соответствующей крайним сечениям  $Z_{\Sigma}$ , технологическая деформация будет принимать минимальное значение. Таким образом, общая технологическая деформация  $\Delta$  представляет собой разность номинальной технологической деформации  $\Delta_0$ , обеспечиваемой от-

носителем положением верхнего валка,  $\Delta_v$ , обусловленной траекторией движения детали и варьируемой технологической деформации:  $\Delta = \Delta_o - \Delta_v(\Delta h)$ .

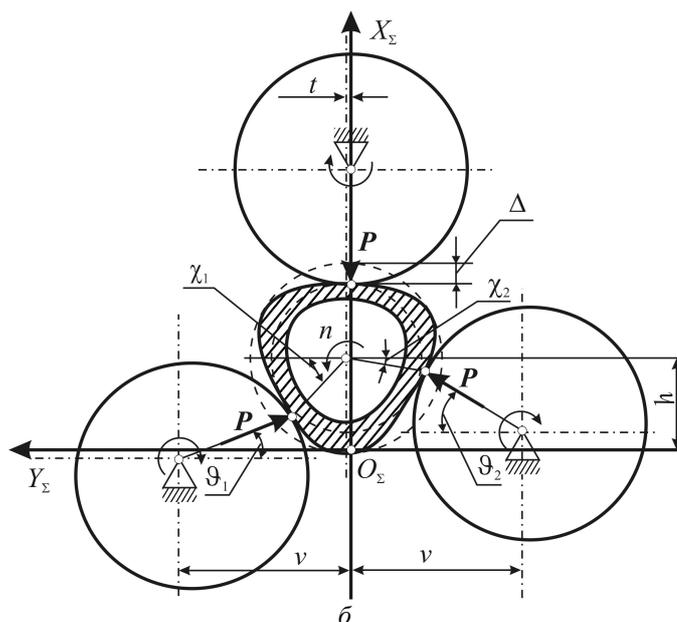
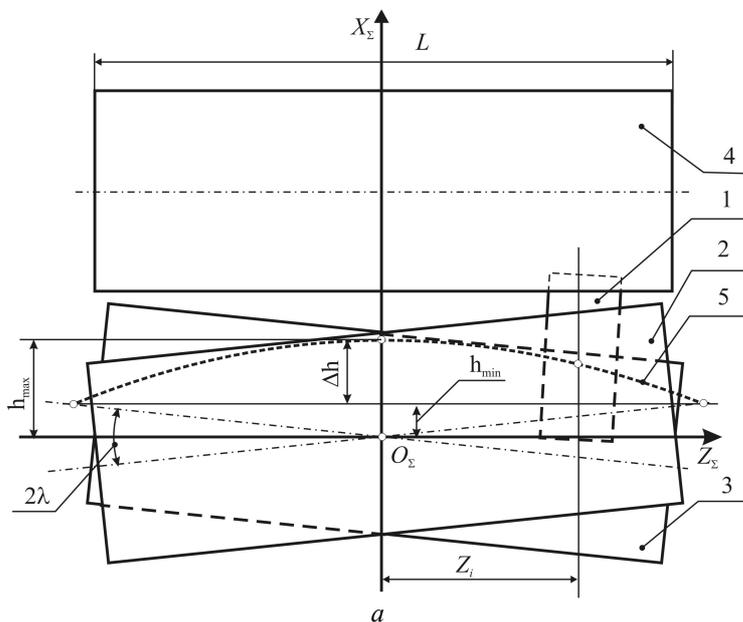


Схема геометрической наладки валкового устройства:  
 а – вид в плоскости  $X_z O_z Z_i$ ; б – вид в сечении  $Z_i$ ;  
 1 – кольцо; 2, 3, 4 – валки; 5 – траектория движения детали

Поскольку угловой шаг между точками контакта детали с валками при параллельных осях валков составляет  $120^\circ$ , а разворот осей валков на угол  $\lambda$  менее  $10^\circ$  не оказывает существенного изменения углового шага то, с достаточной для практики точностью, можно принять допущение о равенстве упругих деформации детали в трех точках контакта. На основании это допущения из очевидных геометрических соотношений общая технологическая

деформация будет определяться выражением:

$$\Delta = \Delta_o - \frac{2}{3} \Delta h. \quad (1)$$

Согласно работе [4], величина снимаемых напряжений находится в прямой зависимости от количества циклов нагружения и величины нагрузки, определяющей номинальную технологическую деформацию. Количество циклов нагружения кольца необходимое для снятия остаточных напряжений определяется выражением:

$$N_m(\Delta) = c_p K_p \cdot \frac{\sigma_m^2(\Delta)}{\sigma_{mo}^2(\Delta)} \left( \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\theta_p} J_M(\theta)^2 d\theta + \frac{4k_\sigma^2(\Delta) \cdot h^6}{W^2} \int_{\theta_p}^0 J_P(\theta)^2 d\theta \right) \cdot \left( \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\theta_p} J_M(\theta)^2 d\theta \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – деформация колец;  $h$  – расстояние от центральной оси сечения до крайней точки сечения;  $W$  – момент сопротивления изгибу;  $\theta$  – центральный угол сечения;  $\theta_p$  – угол, при котором осуществляется переход от упругой зоны деформации к пластической;  $\sigma_{mo}$  – максимально напряжение, возникающее в материале кольцевой детали в процессе обкатки;  $\sigma_m$  – максимальное напряжение упругой деформации детали, определяемое без учета пластической деформации;  $K_p$  – коэффициент потерь энергии при обкатке;  $c_p$  – число точек приложения нагрузки;  $\alpha$  – угловой шаг точек приложения внешней нагрузки;  $k_\sigma$  и  $J_M(\theta)$  – прочие обозначения, приведенные в работе [4].

При этом нужно учитывать, что количество циклов нагружения детали, обеспечиваемое при заданных параметрах наладки исходя из геометрической схемы на рисунке, определяется условием:

$$N_o(v, \lambda) = 3L(2\pi R \cos \vartheta(v, \lambda) \sin \lambda)^{-1}. \quad (3)$$

Если обеспечиваемое геометрической наладкой количество циклов будет недостаточно, т.е.  $N_o < N_m$ , то напряжения снимутся не полностью. Для определения требуемого количества циклов необходима величина  $\Delta h$ . Траектория движения детали и величина  $\Delta h$  при прочих равных условиях определяется геометрической наладкой оборудования, которая сводится к установке межосевого расстояния  $v$  и угла  $\lambda$  перекрещивания осей валков. Наибольшее влияние на изменение  $\Delta h$ , а соответственно и на изменение технологической деформации, оказывает разность углов перекрещивания осей валков. С увеличением угла перекрещивания осей валков увеличивается кривизна и отклонение траектории  $\Delta h$ , а соответственно снижается минимальная величина общей технологической деформации  $\Delta$ . При наладке также необходимо учитывать, что чем меньше угол перекрещивания осей валков  $\lambda$ , тем медленнее движется де-

таль, тем больше число циклов нагружения. Поэтому задав величину  $\Delta h$  в качестве граничного условия согласно выражению (2), можно определить геометрические параметры наладки  $v$  и  $\lambda$  из решения геометрической задачи одновременного контакта детали и валков.

#### Аналитическая модель для расчета геометрических параметров наладки бесцентровой обкатки колец

Определить геометрические параметры наладки валкового устройства для бесцентровой обкатки цилиндрических деталей можно применив полученное ранее общее решение геометрической контактной задачи [3] для бесцентрового суперфинишного станка. В основе данной задачи лежит условие одновременного контакта поверхности детали с двумя базирующими валками, представленное в исходной форме системой векторных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \vec{r}_B^I &= \vec{r}_3^I; \\ \vec{r}_B^{II} &= \vec{r}_3^{II}; \\ \vec{\tau}_B^I &= \vec{\tau}_3^I; \\ \vec{\tau}_B^{II} &= \vec{\tau}_3^{II}. \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $\vec{r}_B^I, \vec{r}_B^{II}, \vec{r}_3^I, \vec{r}_3^{II}$  – радиус-векторы точек контакта левого, правого валков и заготовки в системе координат станка  $S_\Sigma$  соответственно;  $\vec{\tau}_B^I, \vec{\tau}_B^{II}, \vec{\tau}_3^I, \vec{\tau}_3^{II}$  – нормированные касательные к поверхностям левого, правого валков и заготовки в системе координат станка  $S_\Sigma$  соответственно.

Решение в задаче [3] было получено для общего случая, учитывающего произвольно заданный профиль деталей и базирующих валков. Применительно к деталям с цилиндрической наружной поверхностью и цилиндрическими поверхностями базирующих валков после преобразования система (4) в координатной форме принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 f_1 &= R \cos \vartheta^I \cos \lambda + (R \cos \vartheta^I \sin \lambda - Z_i) \operatorname{tg} \lambda - h + r \sin \chi^I = 0; \\
 f_2 &= v - R \sin \vartheta^I - r \cos \chi^I + t = 0; \\
 f_3 &= R \cos \vartheta^I \cos \lambda + (R \cos \vartheta^I \sin \lambda - Z_i) \operatorname{tg} \lambda - h + r \sin \chi^I = 0; \\
 f_4 &= R \sin \vartheta^I - v + r \cos \chi^I + t = 0; \\
 f_5 &= \frac{R \sin \vartheta^I}{\sqrt{R^2 \cos^2 \vartheta^I \cos^2 \lambda + R^2 \sin^2 \vartheta^I}} - \cos \chi^I = 0; \\
 f_6 &= \frac{R \cos \vartheta^I \cos \lambda}{\sqrt{R^2 \cos^2 \vartheta^I \cos^2 \lambda + R^2 \sin^2 \vartheta^I}} - \sin \chi^I = 0; \\
 f_7 &= \frac{R \sin \vartheta^I}{\sqrt{R^2 \cos^2 \vartheta^I \cos^2 \lambda + R^2 \sin^2 \vartheta^I}} - \cos \chi^I = 0; \\
 f_8 &= \frac{R \cos \vartheta^I \cos \lambda}{\sqrt{R^2 \cos^2 \vartheta^I \cos^2 \lambda + R^2 \sin^2 \vartheta^I}} - \cos \chi^I = 0;
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $R$  – радиус валка;  $r$  – радиус детали;  $t, h$  – координаты оси детали в системе  $S_{\Sigma}$ ;  $\chi^I, \chi^{II}, \vartheta^I, \vartheta^{II}$  – углы контакта детали и с левым и правым валками соответственно;  $Z_i$  – рассматриваемое сечение контакта детали и валков в системе  $S_{\Sigma}$ .

Положение детали, определяемое координатами  $(t, h)$ , находится из решения системы (5) путем минимизации целевой функции, представляющей собой сумму квадратов левых частей уравнений:

$$\Phi(\vartheta^I, \vartheta^{II}, \chi^I, \chi^{II}, h, t) = \sum_{i=1}^8 f_i^2 \rightarrow \min. \quad (6)$$

В результате решения системы (5) в разных сечениях  $Z_i$  находят углы контакта  $\chi_1, \chi_2, \vartheta_1, \vartheta_2$

детали с валками и координаты  $h, t$  заготовки в системе станка. Полученная последовательность координат положений центра детали представляет собой множество точек траектории движения детали, определяющей степень изменения технологической деформации по мере обработки. Параметры наладки, обеспечивающие заданную величину отклонения траектории  $\Delta h$ , могут быть найдены путем минимизации целевой функции (7), представляющей сумму функционалов (6) в крайнем ( $Z_i=0$ ) и среднем ( $Z_i=L/2$ ) сечениях в системе  $S_{\Sigma}$ , в которых центр детали занимает положения в вертикальной плоскости  $h_{\min}$  и  $h_{\min}+\Delta h$  соответственно:

$$\Omega(v, \lambda, \Delta h) = \Phi(\lambda, v) \Big|_{Z_i=0, h=h_{\min}} + \Phi(\lambda, v) \Big|_{Z_i=L/2, h=h_{\min}+\Delta h} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Поскольку при бесцентровой обкатке цилиндрических деталей величина общей технологической деформации по мере движения детали изменяется тем быстрее, чем больше угол разворота осей валков, то величина снимаемых остаточных напряжений, при прочих неизменных технологических параметрах, будет находиться в прямой зависимости от угла перекрещивания осей валков. Это положение подтверждается данными полученными в результате проведенного эксперимента.

#### Заключение

Описан новый подход к снятию остаточных напряжений бесцентровой обкаткой упругодеформирующими валками на основе геомет-

рической наладки оборудования. Установлено, что упругая технологическая деформация изменяется в процессе движения детали в зависимости от ее текущего положения. Степень изменения технологической деформации зависит от угла перекрещивания осей валков. Полученная математическая модель позволяет вычислить геометрические параметры наладки, обеспечивающие заданную величину изменения технологической деформации. Разработанный с учетом модели геометрической наладки способ бесцентровой обкатки колец может быть рекомендован в качестве более производительной и менее энергоемкой замены операции температурного отпуска.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рагульскис, К. М. Вибрационное старение / К. М. Рагульскис, Б. Б. Стульпинас, К. Б. Толутис. – Л. : Машиностроение, 1987. – 72 с.
2. Способ обработки кольцевой детали непрерывной обкаткой тремя валками: пат. RU 2583520 C1 от 10.05.2016 № 134 / Королев А. В., Королев А. А., Балаев А. Ф., Яковин А. С.
3. Захаров, О. В. Обобщенная геометро-аналитическая

модель для расчета формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, А. Ф. Балаев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2006. – № 10. – С. 11–15.

4. Balaev, A. F., Zakharov, O. V., Korolev, A. V., Korolev, A. A., Kochetkov, A. V. Modeling the mechanism of stress relaxation of ring parts at high-cycle loading // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. 2015. pp. 1–4.

УДК 621.9.06-529

*М. С. Гудеев, Е. М. Фролов*

**СТЕПЕНИ ГОТОВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИМИ СТАНКАМИ К ЧЕТВЕРТОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ**

**Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: Gudeev.M.S@mail.ru

В работе рассмотрены современные системы ЧПУ и различия между ними. Изучены возможности интеграции пользовательского программного обеспечения для обработки сигналов с датчиков. Рассмотрена возможность обработки сигналов встроенными инструментами в системах. Предложена схема обработки сигнала с датчиков.

*Ключевые слова:* индустрия 4.0, четвертая промышленная революция, системы ЧПУ, термоЭДС.

The paper discusses modern CNC system and the differences between them. The possibilities of integration of custom software for processing signals from the sensors. The possibility of signal processing tools integrated into the systems. Proposed signal processing circuit with sensors.

*Keywords:* Industry 4.0, fourth industrial revolution, CNC system, thermoEMF signal processing.

К настоящему времени тенденция комплексной автоматизация производства привела к возникновению явления, получившего название «Индустрия 4.0», другими словами к четвертой промышленной революции. Производственное, складское оборудование, автоматизированные рабочие места специалистов подключаются к телекоммуникационным сетям, в том числе к интернету, для взаимодействия друг с другом, для сбора большого объема данных с целью автоматической настройки технологических и вспомогательных процессов, а также регулировки производства в зависимости от потребления продукции. Встраивание датчиков в готовую продукцию позволяет сообщить производителю о скором выходе из строя детали или изделия, и позволить ему ко времени поломки произвести запчасть и отправить потребителю. Все это уменьшает время простоя оборудования, влияние человеческого фактора, объем человеческого труда на производстве.

Современное станочное оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ) час-

то имеет открытую архитектуру, что дает возможность корректировать алгоритмы управления, либо позволяет загружать пользовательское программное обеспечение. В нем предусмотрены резервные вычислительные мощности и возможность подключения и программирования дополнительного оборудования. Все это создает программно-аппаратную базу не только для контроля протекания технологических процессов, но и для управления ими непосредственно в ходе их выполнения, что позволяет более эффективно вести борьбу с главным врагом автоматизированного производства – простоем оборудования.

В большинстве случаев причиной простоя станочного оборудования является выход из строя режущего инструмента. Это связано с недостатками методов назначения режимов резания. В настоящее время существует множество способов повышения надежности назначения режимов резания (говоря о надежности мы имеем ввиду способность инструмента проработать закладываемый при планировании произ-

водства период). Одним из наиболее подходящих для применения в промышленных условиях является метод пробного прохода, основанный на измерении величины термоЭДС, генерируемой в зоне резания [1]. Но остается открытым вопрос возможности реализации подобных методов на современных серийных металлорежущих станках, как в аппаратном, так и в программном плане.

В настоящее время системы ЧПУ универсальны и подходят под множество станков. Они выполняются в виде отдельных от станка блоков, к которым подключаются датчики и различное технологическое оборудование. Производители станков в свою очередь, заранее готовят свою продукцию к возможности работы с несколькими системами ЧПУ. Например, система ЧПУ OSP-200L используется на множестве

станков OKUMA (Серии Genos L / LT EX / Multus B / VTM / VTR / VTM-YB).

Рассмотрим возможности интеграции пользовательского программного обеспечения для обработки сигналов с датчиков, не входящих в комплект поставки станка, на примере метода пробного прохода.

В общем виде схема регистрации и обработки сигнала термоЭДС, представленная на рисунке, может выглядеть следующим образом. При первом варианте реализации оцифровка сигнала происходит в блоке оцифровки сигнала (1). Сигнал термоЭДС преобразовывается через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), затем через переходник (вход SPI / выход RS-232 / выход USB) подключается к порту COM (RS-232/ RS-232C/ RS-232C2), или к USB ПЛК (программируемого логического контроллера) системы ЧПУ.

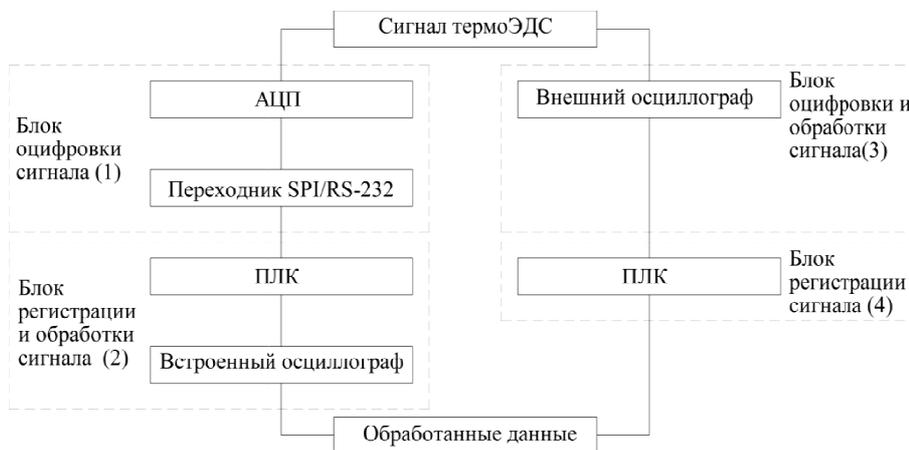


Схема обработки сигнала

Полученный сигнал приходит в блок регистрации и обработки (2), в котором обрабатывается на встроенном осциллографе (Fagor, Heidenhain) и в виде переменных вносится в программу. В системах Fagor дополнительный интерфейс к терминалу и приложения для доступа к переменным пишется на языке программирования Visual Basic. В системах Heidenhain для последующей работы с данными требуется приобрести дополнительную лицензию, регулировка переменных производится через внешние приложения по сети Ethernet. При втором варианте реализации сигнал с термопары принимается на внешний осциллограф (блоком оцифровки и обработки сигнала (3)), после чего обработанный сигнал приходит в блок регистрации сигнала (4) системы ЧПУ через USB.

Дальнейшая процедура обработки данных зависит от системы ЧПУ. В системах Siemens доступа к ядру и терминалу напрямую нет, вы-

вод данных на терминал возможен при приобретении дополнительного программного обеспечения. Системы ЧПУ фирмы Bosch Rexroth имеют гибкую наладку, что позволяет встраивать сторонние приложения (через OPC, XML, .NET). У систем ЧПУ Beckhoff имеется возможность надстроек терминала, которые разрабатываются на языках программирования C/C++ , Delphi, Java. Для регулировки режима резания в этих системах используется ПЛК, т. к. ядро закрыто. В системах ЧПУ NCT программное обеспечение реализовано ядром на C++ и терминалом на C#, для полноценной интеграции сторонних приложений специализированных механизмов нет. Системы ЧПУ фирмы Okuma (OSP-200L/P300L/P300S) умеют хранить до 8 дополнительных подпрограмм и использовать 200 переменных. Данные могут загружаться из файлов xls/x. В таблице сравним современные системы ЧПУ.

Сравнительная таблица систем ЧПУ

Система	Sinumerik 840D sl (Siemens)	iTNC 530 (HEIDEN HAIN)	IndraMotion MTX Advanced (Bosch Rexroth)	TX 1270 (Beckhoff)	CNC 8070 (Fagor)	NCT 201 (NCT)	OSP-200L (Okuma)
ОС терминала	Linux	MS Windows 7	MS Windows	MS Windows NT	MS Windows XP Embedded	S Windows CE	MS Windows 7/XP
ОС ядра	Solans	HEROS	UNIX	Twin CAT			
Средства расширения терминала	WinCC flexible	RemoTools SDK	WinStudio	ADS шина (Automation Device Specification)	FGUIM - визуальная конфигурация	-	-
Средства расширения ядра системы	Compile Cycles	Нет данных	OCE, – через ПЛК программы	C/C++, Delphi, Java Через ПЛК	Нет данных	-	-
Способы передачи данных между компонентами	Системные переменные	Нет данных	NCS функции	Нет данных	Нет данных	-	Системные переменные
RS-232	+	+	+	+	+	+	+
USB	+	+	+	+	+	+	+
Осциллограф	-	+	-	-	+	-	-
Уровень доступа системы	Средний	Низкий	Средний	Низкий	Средний	Низкий	Средняя

Приведенный выше анализ говорит о том, что современные системы ЧПУ технически готовы к четвертой промышленной революции. Следующей важной проблемой на ее пути является несовершенство методов получения оперативной информации о протекании процесса резания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плотников, А. Л. Способ получения оперативной информации о свойствах контактной пары деталь-инструмент с использованием предварительного пробного прохода / А. Л. Плотников, Е. М. Фролов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2008. – № 3, вып. 1. – С. 39–47.
2. Сосонкин, В. Л. Системы числового программного управления : учеб. пособие / В. Л. Сосонкин, Г. М. Мартинов. – М. : Логос, 2005. – 296 с.

УДК 621.7

*О. И. Драчев*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОСИЛОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОЖЕСТКИХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Тольяттинский государственный университет

E-mail:doi05@mail.ru

Во многих современных агрегатах, машинах и приборах применяются ответственные малоожесткие детали типа «вал». Непрерывный рост объема производства малоожестких деталей обусловлен совершенствованием прочностных расчетов, оптимизацией форм деталей и конструкций, постоянным снижением металлоемкости изделий и возрастающим выпуском прецизионных машин.

*Ключевые слова:* малоожесткая деталь, внутренние напряжения, технология термосиловой обработки, технологическая наследственность.

In many modern aggregates, the machinery and appliances responsible low-tough details like "shaft" are applied. Continuous growth of production volume of low-tough details is caused by enhancement of strength calculations, optimization of forms of details and designs, fixed decrease in metal consumption of products and the increasing release of precision machines.

*Keywords:* low-tough detail, internal tension, technology of thermopower handling, technological heredity.

Диспропорции в конструктивных параметрах мало жестких деталей создают серьезные технологические трудности в производстве [3–4], основные причины которых следующие: упругие и пластические деформации на всех стадиях обработки, сборки и эксплуатации деталей, влияние технологической наследственности на надежность работы, коробление заготовок, вызванное неравномерными остаточными напряжениями, вносимыми на всех стадиях обработки.

Отрицательное действие перечисленных факторов при изготовлении мало жестких деталей приводит к нарушению технологических баз, погрешностям формы и размеров деталей, поверхностным дефектам, в конечном счете, к снижению эксплуатационной надежности мало жестких деталей.

Анализ производственного опыта изготовления мало жестких деталей в индивидуальном и мелкосерийном и серийном производствах показал, что традиционные способы обработки мало жестких длинномерных осесимметричных деталей малоэффективны и поэтому вопросы их изготовления на практике решаются ограничением режимов обработки, вводом операций ручной доводки. Такой путь существенно увеличивает трудоемкость обработки и не гарантирует требуемое качество изделий.

В данной работе предлагается новый технологический прием управления технологической наследственностью и остаточными напряжениями, которые влияют не только на геометрическую точность в процессе изготовления, но и на эксплуатационную точность и надежность работы машин. Технология термосилового обработки (ТСО) реализуется с помощью установки (рис. 1) [1].

Установка включает в себя заготовки 1, на резьбовые концы 2 которых надеваются сферические шайбы 3 и накручиваются гайки 4, устанавливаются по пазам 5 ступеля 6. Ступель 6

содержит две трубы, верхнюю 7 и нижнюю 8, которые имеют параболический профиль. Трубы 7 и 8 соединяются по резьбе 9. Внутри ступеля 6 находится полость 10, в которую засыпан наполнитель 11 (песок, чугунная дробь). Полость 10 закрыта с двух сторон резьбовыми заглушками 12. Коэффициент линейного расширения ступеля 6 больше чем у деталей 1.

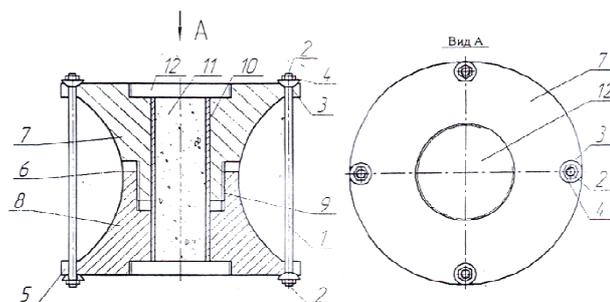


Рис. 1. Общий вид установки для ТСО

Устройство для ТСО работает следующим образом. После фиксации заготовок 1 по сферическим шайбам 3 в пазах 5 ступеля 6 происходит нагрев установки до рабочих температур. За счет большего коэффициента линейного расширения ступеля 6, и соответственно большего удлинения происходит растяжение деталей 1. При охлаждении, за счет большей теплоемкости, охлаждение ступеля 6 происходит медленнее деталей 1, что позволяет сохранить их напряженное состояние в течение всего цикла обработки. При необходимости можно установить несколько деталей для одновременной обработки или отрегулировать длину ступеля 6 под детали 1 другой длины путем относительного поворота верхней 7 и нижней 8 труб.

Для реализации установки в лабораторных условиях были проведены аналитические исследования на растяжение и сжатие распредвала а/м ВА3 по программе ANSYS 12.

Зависимость внутренних напряжений от сил растяжения представлена на рис. 2.

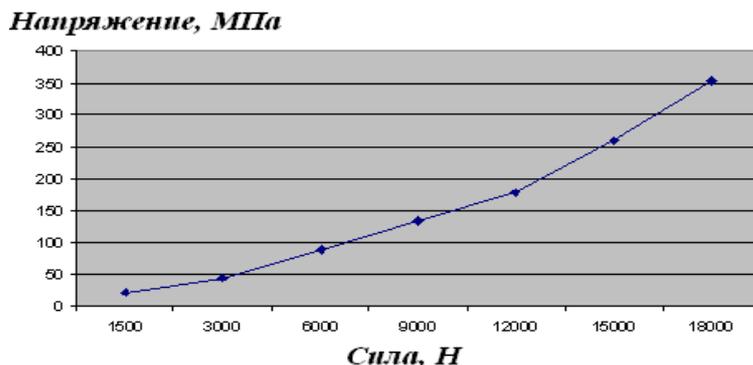


Рис. 2. Зависимость внутренних напряжений от силы растяжения

Из графика видно, что в данном диапазоне нагрузок зависимость близка к линейной, так как заготовка находится в зоне упругих деформаций.

Анализ результатов исследований показывает большую разницу в деформации по длине

изделия, здесь играет роль разная площадь сечения по длине распредела.

С целью устранения полученной неравномерности была разработана установка [2], в которой осевая нагрузка была с противоположным знаком (сжатия).

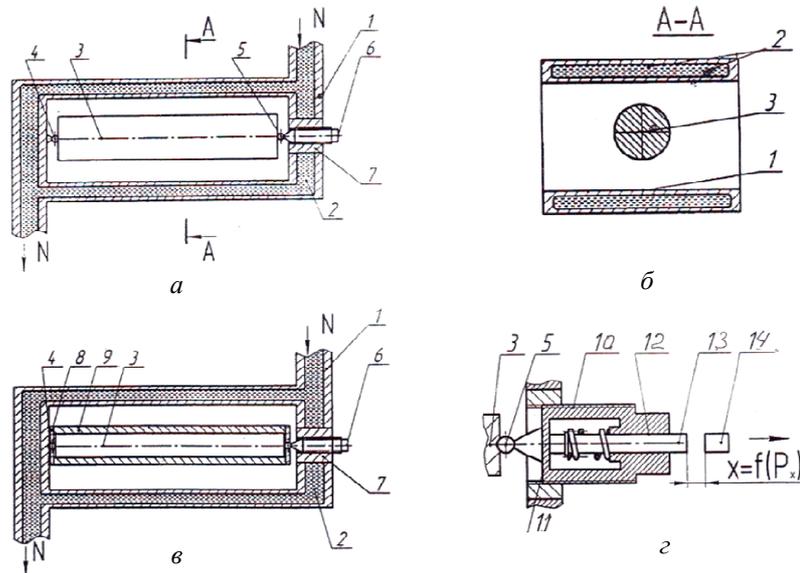


Рис. 3. Общий вид установки ТСО сжатием

Установка ТСО содержит (рис. 3) ступель 1 с внутренними полостями (каналами) 2 для прохождения по ним охлаждающей жидкости, например жидкого азота. Для фиксации вала 3 в продольном положении ступель 1 снабжен шаровыми опорами 4 и 5, из которых первая выполнена неподвижной, а вторая – подвижной, причем последняя зафиксирована на винте 6, вкрученном во втулку 7, запрессованную в ступель 1. Для фиксации вала 3 в поперечном положении этот вал установлен в шаровые опоры 4 и 5, которые через пластины 8 фиксируют направляющую втулку 9.

Подвижная шаровая опора 5 может быть выполнена в виде полого цилиндра 10, опорная стенка которого со стороны вала 3 является упругой мембраной 11, а с противоположной стороны имеет центральное отверстие 12, через которое проходит подпружиненный шток 13, который может взаимодействовать с датчиком перемещения 14.

Установка работает следующим образом. Заготовку вала 3 размещают между шаровыми опорами 4 и 5 и фиксируют винтом 6. Далее через ступель 1 по каналам 2 нагнетается охлаждающая жидкость под давлением. За счет разницы коэффициентов линейного сжатия ступель  $\alpha_{ст}$

и заготовки  $\alpha_{заг}$  при их охлаждении возникает разница в температурных сокращениях  $\Delta l$ , равная  $\Delta l = \Delta T (\alpha_{ст} - \alpha_{заг})$ , где  $\Delta T$  – изменение температуры при охлаждении;  $L$  – длина заготовки.

Уменьшение длины ступеля 1 и заготовки вала 3 за счет температурного сжатия приводит к деформации вала.

При использовании подвижной шаровой опоры 5 осевая сила, возникающая при обработке, приводит к деформации мембраны 11, которая смещает подпружиненный шток 13. Смещение штока 13 регистрируется датчиком перемещения 14, что позволяет определять силовую нагрузку непосредственно при обработке.

Зная зависимости влияния холода на чугун, проанализируем зависимость холода на предел усталости чугуна, рис. 4.

Из графиков следует, что значение ударной вязкости возросло с 10 000 до 12 400 Дж/м<sup>2</sup> значение модуля упругости увеличилось с 160 до 188 ГПа в ходе обработки холодом.

На основании проведенных исследований, разработанная новая технология термосиловой обработки маложестких деталей с применением комплексного нагружения, которая повышает точность геометрической формы, выравнивает остаточные напряжения.

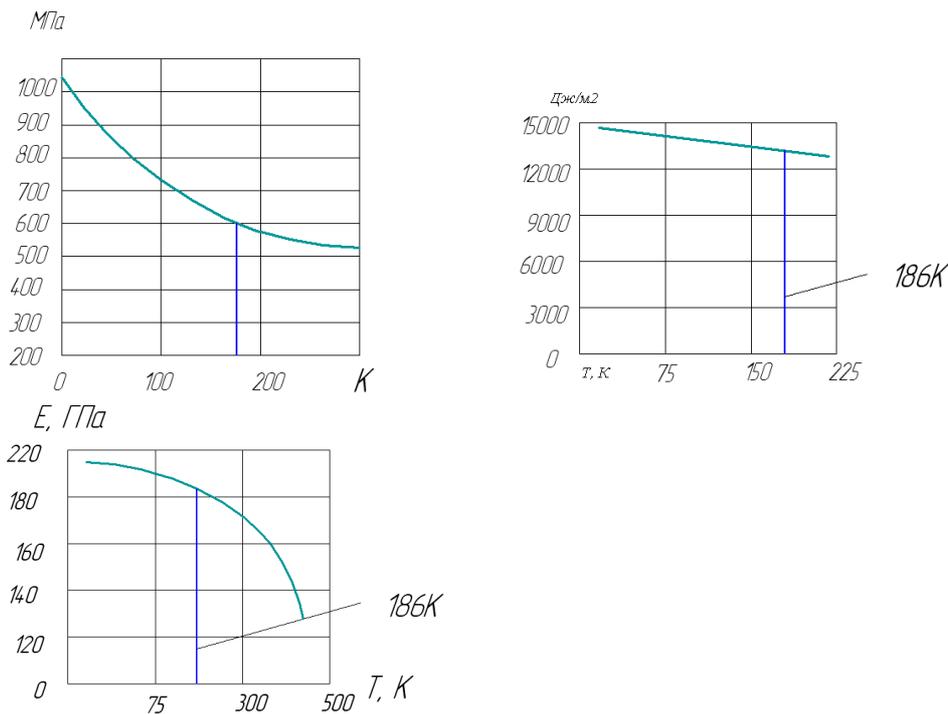


Рис. 4. Влияние холода на предел усталости, ударной вязкости и модуля упругости

В результате одновременного температурно-силового воздействия на материал детали происходят процессы упруго-пластического деформирования, которые вследствие неравномерности температурного поля по длине заготовки и неоднородности физико-механических свойств, приводят к неравномерности осевых и поперечных деформаций. Такой технологический прием предоставляет возможность не только снизить нагрузку на узлы конструкции, но и за счет устранения технологической наследственности от предыдущих операций, позволяет заложить в конструкцию детали новую благоприятную наследственность с упорочением.

Такой подход обеспечивает высокую стабильность геометрических форм детали, выравнивание остаточных напряжений, повышение эксплуатационной точности и надежности работы механизма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 2381282 Российская федерация, МПК7С21 Д8/06. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей / Драчев О. И., Расторгуев Д. А. ; заявитель Тольяттинский государственный университет. – № 2008140009/02 ; заявл. 08.10.2008 ; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 4 – 4 с.
2. Патент 2462518 Российская федерация, МПК7С21Д8/06. Устройство для термосиловой обработки маложестких деталей / Драчев О. И., Расторгуев Д. А. ; заявитель и патентообладатель Тольяттинский государственный университет. – № 20010130208/02 ; заявл. 09.09.2010 ; опубл. 09.03.2012, Бюл. № 5 – 5 с.
3. Драчев, О. И. Автоматическое управление процессом точения маложестких деталей / О. И. Драчев, А. Н. Кравцов ; науч. ред. В. Н. Тисенко ; ВолгГТУ. – Тольятти : ЗАО «ОНИКС», 2012. – 250 с. : ил. табл. – (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / под общ. ред. Ю. М. Соломенцева).
4. Драчев, О. И. Обеспечение эксплуатационных свойств изделий при автоматизированном проектировании / О. И. Драчев, А. Н. Кравцов, Н. В. Кравцов ; под ред. Ю. М. Соломенцева ; Закрытое акционерное об-во «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). – Ирбит: ОНИКС, 2011 – 257 с.

УДК 621.048.35

*О. И. Драчев***СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ДЛИННОМЕРНЫХ ВАЛОВ**

Тольяттинский государственный университет

E-mail: doi05@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы повышения эксплуатационной точности деталей типа «вал». Представлена новая технология автоматического управления упругопластическими деформациями.

*Ключевые слова:* мало жесткий вал, термосиловая обработка, система автоматического управления.

In article questions of obtaining high operational precision of low-rigid shaft by automatic control of elasto-plastic deformation are considered, and the new technology of it increase by automatic control is presented.

*Keywords:* low-rigid shaft, thermopower processing, system of automatic control.

Ежегодно в стране изготавливают сотни тысяч цилиндрических деталей, типа валов, штанг, штоков и т. д., значительная часть которых относится к мало жестким изделиям. При изготовлении таких деталей постоянно повышаются требования к их точности в процессе эксплуатации.

В процессе изготовления деталей машин (механообработка, отделочно-упрочняющие процессы, термообработка и др.), а так же при сборке и монтаже возникают остаточные напряжения, которые отрицательно сказываются на работоспособности изделий машиностроения.

Исследование причин искривления мало жестких цилиндрических деталей показало, что при их изготовлении возникают остаточные деформации в большинстве случаев превышающие существующие допуски на геометрические размеры. Наиболее распространены деформации изгиба (отклонения от прямолинейности оси) и коробление. Иногда процент брака по этим параметрам в опытной партии изделий доходит до 50 %. Для обеспечения прямолинейности осей цилиндрических деталей в технологический процесс их изготовления вводят операцию правки.

В области технологии изготовления мало жестких валов [1, 3, 4, 5] к настоящему времени получены многие важные результаты. Усовершенствованы методики расчета напряжений и деформаций [1, 2, 6], определены оптимальные режимы обработки, разработано технологическое оборудование [3] и оснастка. Несмотря на это, используемые в производственных условиях способы правки в некоторых случаях не дают должного эффекта, либо обеспечивают временный результат, либо приводят к повреждению поверхности, что недопустимо при восстановле-

нии прямолинейности готовых деталей.

В настоящее время, наиболее широкое применение в производственных условиях получила холодная правка валов на прессах. Однако, правка изгибом имеет весьма существенные недостатки. Поэтому для ответственных высоко-нагруженных валов и осей была разработана технология управления упругопластической деформации с применением САУ [5], позволяющая минимизировать уровень остаточных напряжений и выровнять их по длине заготовки вала, что приводит к стабилизации формы готового изделия на все время его эксплуатации.

При реализации предлагаемой технологии рассмотрим процесс термосиловой обработки для металлов с схематизированной кривой деформации без упрочнения и с небольшой площадью текучести и упрочнением. Если величина изгибающего момента такова, что наибольшее напряжение изгиба  $\sigma \leq \sigma_{02}$ , то заготовка-вал изогнется в зоне упругой деформации, тогда  $\sigma_{\max} = M / W \leq \sigma_{02}$ , здесь  $M$  – изгибающий момент сопротивления площади поперечного сечения вала. При  $\sigma \geq \sigma_{02}$  деформируемая зона вала переходит в пластическую и в зоне защемления образуется «пластический шарнир», здесь предельный изгибающий момент равен  $M_{\text{пред}} \geq \sigma_{02} \cdot W$ . В соответствии с теоремой о разгрузке остаточные напряжения в зоне пластического шарнира (после снятия момента  $M$ ) равны  $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{02} - \sigma_{\max}$ .

На рис. 1 показаны эпюры распределения действующих и остаточных напряжений в процессе упругопластического изгиба и после него.

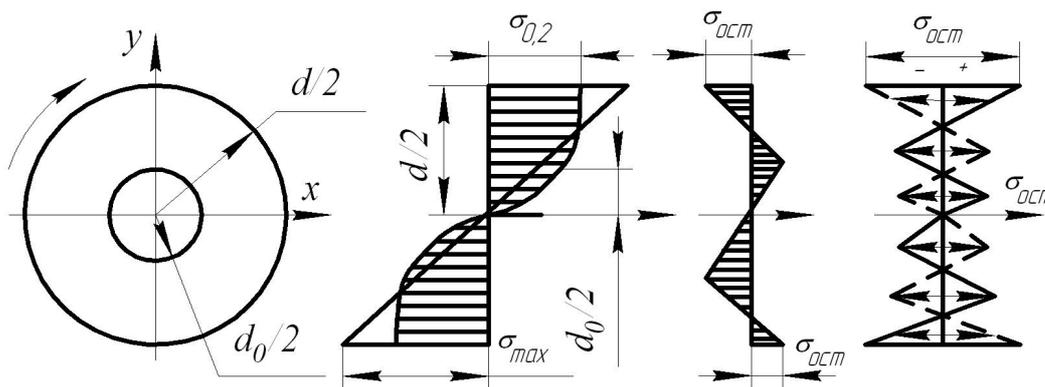


Рис. 1. Эпюры действующих, остаточных при одноразовых деформациях, малоциклических остаточных напряжений в зоне заделки

Эпюра остаточных напряжений после многоцикловой деформации приведена на рис. 1, здесь  $d$ ,  $d_0$  – наружный диаметр заготовки вала и диаметр зоны-ядра упругости (для упрочняющего материала);  $\sigma_{ост}$  – остаточное напряжение. Эпюра является самоуравновешенной.

При малоцикловой упругопластической деформации в сечениях по всей длине заготовки вала продольные волокна пластически деформируются в разных направлениях и следовательно пластическое последствие различных волокон будет направлено в различные стороны, что исключает самопроизвольное искривление оси вала в процессе эксплуатации.

Для реализации теоретических предпосылок описанных выше была разработана технология термосиловой обработки осесимметричных деталей, включая силовое воздействие на заготовку вала за пределом действия закона упругости в пределах выбранного участка заготовки. А управление пределом текучести при силовом воздействии производят путем регулирования температурного воздействия на участок заготовки. Деформирование заготовки производят со знакопеременным изгибом, при этом одновременно с сформированием заготовки со знакопеременным изгибом осуществляют вращение заготовки с одновременной ее осевой подачей. Изгибающий момент к заготовке прикладывают на расстоянии, не превышающем пяти диаметров заготовки от места изгиба с фиксацией проработанного участка заготовки в поперечном направлении.

Установка для термосиловой технологии (рис. 2) работает следующим образом.

Заготовку вала 2 устанавливают на опорные

ролики 1, по которым ее перемещают через силовые ролики 3 и нагревательный элемент 4 и далее пропускают через вращающуюся муфту 6 до входа в направляющую трубу 9. Далее включают блок питания 5 нагревательного элемента 4. Температуру нагрева и время выдержки определяют исходя из материала заготовки 2, ее диаметра и необходимой глубины пластической деформации функционально связанной с величиной диаметра заготовки и контролируют датчиком температуры 16. После прогрева зоны заготовки 2 включают одновременно привод вращения 12, привод осевой подачи 11, привод поворота 13, который поворачивает направляющую трубу 9. После захода правого конца заготовки 2 в направляющую трубу 9 повернутую на заданный угол  $\alpha$  перемещают подвижный стол 7 в направлении перпендикулярном оси заготовки 2 на заданное расстояние от оси. Точность перемещения подвижного стола 7 контролируется датчиком линейного перемещения 8. При этом происходит изгиб заготовки 2 относительно ближайшей пары силовых роликов 3. Выходящий из зоны нагрева участок заготовки 2 подвергается изгибу знакопеременно на угол  $\alpha$  за счет ее вращения. При этом контролируется величина изгибающего момента  $M_u$  датчиком контроля усилий перегиба 14. Информация от датчиков 8, 14 и 16 поступает в блок управления 15, где рассчитывается точка перехода из упругой зоны в пластическую по вычислению производной  $dM/da$  в зависимости от температуры нагрева и дополнительно увеличивают величину пластической деформации на 0,5–1 %. Процесс проводится непрерывно по всей длине заготовки.

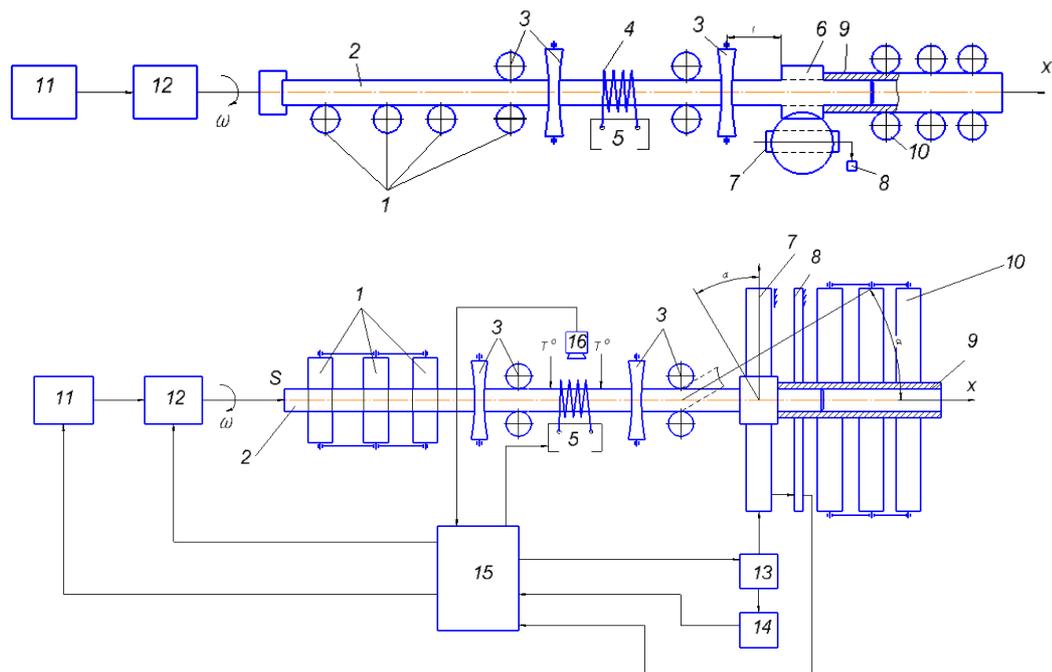


Рис. 2. Общий вид установки

Разработанная технологическая операция позволяет получить заготовку вала с минимальными и равномерными остаточными напряжениями, что позволяет сохранить точность готового изделия на весь срок службы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бубнов, А. С. Напряженное состояние при правке стесненным сжатием стержневых изделий / А. С. Бубнов, С. А. Зайдес // Обработка сплошных и слоистых материалов : межвуз. междунар. сб. науч. тр. / под ред. Г. С. Гуна. – Магнитогорск : МГТУ, 2003. – С. 18–22.

2. Биргер, И. А. Остаточные напряжения : монография / И. А. Биргер. – М., 1963. – 232 с.

3. Драчев, О. И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей : монография / О. И. Драчев. – С. Петербург : Политехника, 2005. – 289 с.

4. Драчев, О. И. Новые технологии термосиловой обработки маложестких валов / О. И. Драчев, Д. Ю. Воронцов, Д. А. Расторгуев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – С. 32–35.

5. Патент № 2552206 от 10 июня 2015. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / О. И. Драчев.

6. Макаревич, Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро [и др.]. – Мн. : УП «Технопринт», 2003. – 352 с.

УДК 621.9.015

### Д. В. Крайнев, Я. Н. Отений, Д. Ю. Нилов, Д. С. Ягодкин ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

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

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности обработки труднообрабатываемых сталей аустенитного класса методом опережающего пластического деформирования. Приведены рекомендации по назначению рациональных нагрузок опережающего пластического деформирования для полустогового точения и чистового точения стали 12Х18Н10Т.

**Ключевые слова:** шероховатость, скорость резания, опережающее пластическое деформирование, дислокации, упрочнение.

In the article the questions of increase of efficiency of machining of hard-to-tread austenitic steels by the method of advanced plastic deformation. The recommendations for the appointment of a rational loads of advanced plastic deformation for semi-rough and finish turning of steel 12H18N10T (AISI 321) is offered.

**Keywords:** roughness, cutting speed, advanced plastic deformation, dislocations, hardening.

Повышение требований к эксплуатационной стойкости и надежности деталей машин вызывает необходимость появления новых конструкционных материалов, что приводит к совершенствованию методов их получения, создания и разработки методов повышения эффективности процессов механической обработки, интенсификации процессов резания, повышения стойкости инструмента, производительности производства и качества поверхности обрабатываемых деталей.

В настоящее время существует значительное количество методик и способов совершенствования операций механической обработки и ее оптимизации, направленных на решение этой задачи.

Вопросам повышения эффективности процесса резания и неразрывно с ним связанной проблемой исследования механизмов и закономерностей контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала занимались ученые Н. Н. Зорев, В. Ф. Бобров, А. Н. Резников, В. Н. Подураев, В. С. Камалов, Н. В. Талантов и многие другие.

Необходимость повышения эффективности процессов механической обработки, а также качества поверхности и точности выпускаемых деталей требует создания новых и совершенствования существующих технологических методов. При этом особое внимание уделяется методам чистовой обработки, которые наряду с высокой производительностью должны обладать технологической простотой и универсальностью. Кроме того, современные технологические приемы должны иметь под собой четкую научную и практическую базу, что позволило бы максимально надежно и эффективно использовать возможности механических производств.

Жаропрочные нержавеющие стали аустенитного класса широко применяются в современном производстве, однако относятся к труднообрабатываемым материалам. Такие стали отличаются высокой степенью упрочнения в процессе деформации резанием, обладают способностью сохранять исходную твердость и прочность при повышенных температурах, что обуславливает высокие удельные нагрузки на контактные поверхности инструмента в процессе резания. Обработка жаропрочных сталей аустенитного класса сопряжена с низким качеством получаемых поверхностей деталей, повышенным износом инструмента и, как следствие, вынужденным занижением режимов резания.

Низкая обрабатываемость таких сталей объясняется рядом причин [2–5], среди которых можно выделить высокую твердость и прочность, повышенную наклепываемость и способность аустенитной структуры сохранить упрочненное состояние до высоких температур, что приводит к повышению уровня тепловыделения и росту температуры резания. Кроме того, низкая теплопроводность жаропрочных материалов затрудняет сток тепла из контактных зон в стружку и обрабатываемую заготовку. Факт существования в зоне резания при обработке нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов значительно более высоких температур, чем для легкообрабатываемых сталей, установлен как экспериментальным, так и расчетным путем [3, 8, 9, 10]. Поэтому повышение эффективности их обработки является актуальной задачей современного машиностроения. Эта задача решается различными путями: повышением работоспособности режущего инструмента, улучшением производительности процесса и качества получаемых изделий. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД), совмещающее стадии предварительного поверхностного пластического деформирования и последующего съема припуска на обработку режущим инструментом, является комбинированным методом обработки, позволяющим получить комплексный результат повышения эффективности процесса по перечисленным выше направлениям. Изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала после стадии ОПД обуславливает формирование таких условий протекания физических процессов в зоне резания, которые способствуют снижению работы стружкообразования, нагрузок на режущий клин, улучшению условий контактного взаимодействия и формирования новой поверхности [1].

Высокие контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента приводят к сколам режущей кромки и деформации твердого сплава. Возникновение таких нагрузок обусловлено не столько большими значениями сил резания, сколько малой протяженностью контакта стружки с инструментом, повышенным уровнем вибраций, а также циклическим характером температурно-силовых нагрузок на инструмент [6, 7, 10].

Повышенный уровень вибраций при резании, приводит к временным тепловым и силовым нагрузкам на инструмент. Повышенная ад-

гезионная активность обрабатываемого материала приводит к его схватыванию с режущими поверхностями инструмента. Наличие в обрабатываемом материале тугоплавких карбидных и интерметаллидных фаз, обладающих высокой твердостью, оказывает абразивное воздействие на инструмент.

Общепринято, что главной причиной интенсивного износа инструмента труднообрабатываемых материалов является высокая температура резания. Факт существования в зоне резания при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов значительно более высоких температур, чем для легкообрабатываемых сталей, установлен как экспериментальным, так и расчетным путем [3, 8, 9, 10]. Поэтому исследованиям температур последние десятилетия отводилась первостепенная роль.

Так как в результате опережающего пластического деформирования процесс резания облегчается вследствие уменьшения величины колебаний сил резания и температуры в зоне контактного взаимодействия, то вполне обоснованно предположить, что шероховатость поверхности также должна уменьшаться.

В настоящее время вопрос формирования микропрофиля обработанной поверхности при токарной обработке исследован не достаточно полно и требует отдельных исследований. Однако в ряде работ отмечается, что величина шероховатости во многом зависит от характеристик и параметров контактного взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала, а также от геометрии и состояния режущих кромок резца.

Известно, что на свойства и качество обработанной поверхности оказывают влияние исходные свойства обрабатываемого материала, его неоднородность и степень деформации. Неоднородный характер развития пластической деформации оказывает сложное влияние на характеристики упрочнения. В зоне опережающей деформации перед режущей кромкой обрабатываемый материал испытывает деформацию сжатия, степень которой быстро возрастает по мере приближения к режущей кромке. В зоне контакта с задней поверхностью инструмента под действием касательных напряжений, обусловленных трением, обрабатываемый материал подвергается деформации растяжения. Действие касательных напряжений распространяется только на поверхностный слой, поэтому изменение характера деформации

влияет на уменьшение ее степени на небольшой глубине под обработанной поверхностью. Вероятностная природа пластической деформации, упрочнения и физико-механического состояния поверхностного слоя создает предпосылки не только дестабилизации, но и создания устойчивых субструктур.

В результате пластического деформирования происходит изменение твердости поверхностных слоев обрабатываемого материала, что связано с увеличением в них плотности дислокации, а также изменением величины скрытой энергии. Скрытая энергия деформирования или энергия, накопленная обрабатываемым материалом в результате упрочнения, может рассматриваться как интегральная характеристика напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя после обработки резанием. Ее величина определяется упругими искажениями кристаллической решетки, обусловленными наличием дислокаций, их плотностью и характером распределения по глубине поверхностного слоя.

Согласно работе [11], скрытая энергия оказывает сильное влияние на эксплуатационные свойства детали, а также на шероховатость поверхности. Управляя величиной скрытой энергии путем изменения технологических условий резания, можно обеспечить повышенное качество обработки деталей. При этом управление включает в себя одновременное обеспечение улучшенных геометрических характеристик обработанной поверхности и оптимального напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя с учетом требований эксплуатации. Установленная связь уровня скрытой энергии не только с управляемыми параметрами резания, но и, например, с износом резца, дает возможность включить в управление фактор времени и прогнозировать точность и качество обработки.

Несмотря на то, что установить тесную связь уровня скрытой энергии с выходными параметрами резания, в частности, с точностью обработки и качеством поверхности является на данный момент трудновыполнимой задачей, сам факт наличия такой связи позволяет обосновать возможность управления указанными параметрами, изменяя свойства обрабатываемого материала, а именно, сообщая ему определенную степень деформации. Основываясь на этом, можно утверждать, что предварительное пластическое деформирование обрабаты-

ваемой детали способно влиять на точность и качество поверхности, полученной в результате дальнейшей обработки.

Оценка влияния ОПД на формирование микропрофиля обработанной поверхности проводилась при получистовом и чистовом точении стали аустенитного класса 12Х18Н10Т. Оценка шероховатости обработанной поверхности выполнялась по величине среднего арифметического отклонения профиля Ra (рис. 1), а также по виду опорных кривых профиля поверхности (рис. 2).

Анализ полученных данных позволяет говорить о том, что применение ОПД позволяет уменьшить величину Ra, при этом при чистовом точении это влияние значительнее.

ОПД оказывает влияние не только на высоту неровности, но и на характер шероховато-

сти. Так, опорные кривые обработанной поверхности под действием ОПД смещаются вправо (рис. 2), что свидетельствует о повышении заполненности материалом, следовательно, улучшаются эксплуатационные характеристики обработанной поверхности.

С целью определения рациональных режимов ОПД, также проведены исследования влияния нагрузки на величину среднего арифметического отклонения профиля Ra при точении стали 12Х18Н10Т аустенитного класса. Установлено, что рациональными нагрузками ОПД являются в случае получистового точения 1500–1600 Н, в случае чистового точения нагрузка не более 1400Н. При дальнейшем увеличении нагрузки улучшения качества поверхности деталей из аустенитной стали не наблюдается.

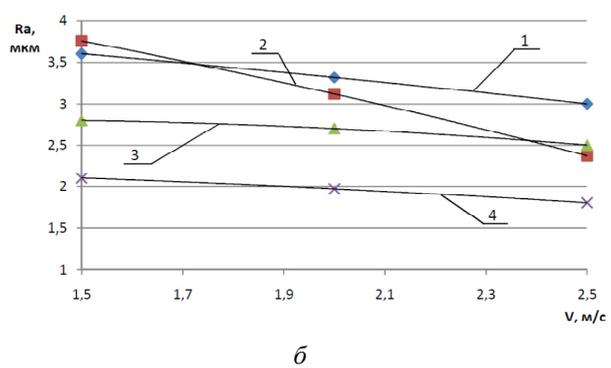
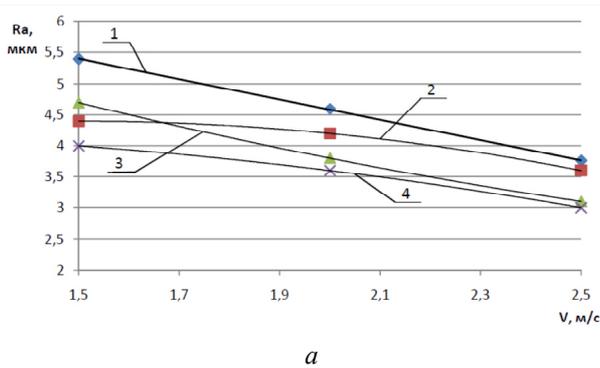


Рис. 1. Влияние скорости резания на величину Ra при точении стали 12Х18Н10Т:  
 а – глубина резания  $t = 0,5$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об; б – глубина резания  $t = 0,2$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об  
 Обработка без опережающего пластического деформирования:

1 – ВК8; 2 – Т15К6; обработка с опережающим пластическим деформированием (нагрузка 1400 Н): 3 – ВК8; 4 – Т15К6

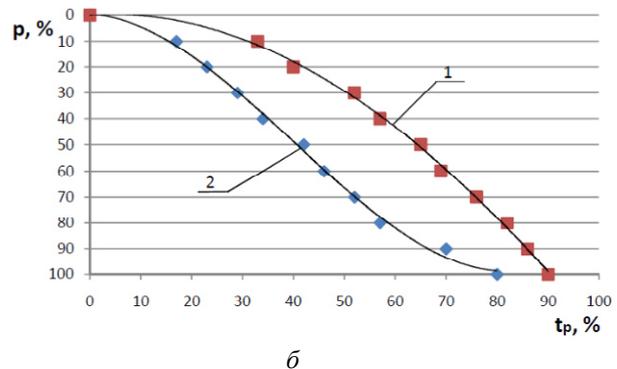
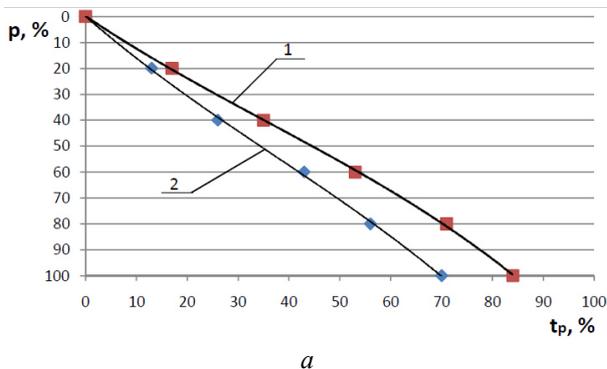


Рис. 2. Опорные кривые обработанной поверхности:  
 а – сталь 12Х18Н10Т, твердый сплав ВК8; б – сталь 12Х18Н10Т, сплав Т15К6.  
 Режимы обработки: глубина резания  $t = 0,2$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об, скорость  $V = 2$  м/с.  
 1 – обработка с предварительным пластическим деформированием (нагрузка 1400 Н);  
 2 – обработка без опережающего пластического деформирования

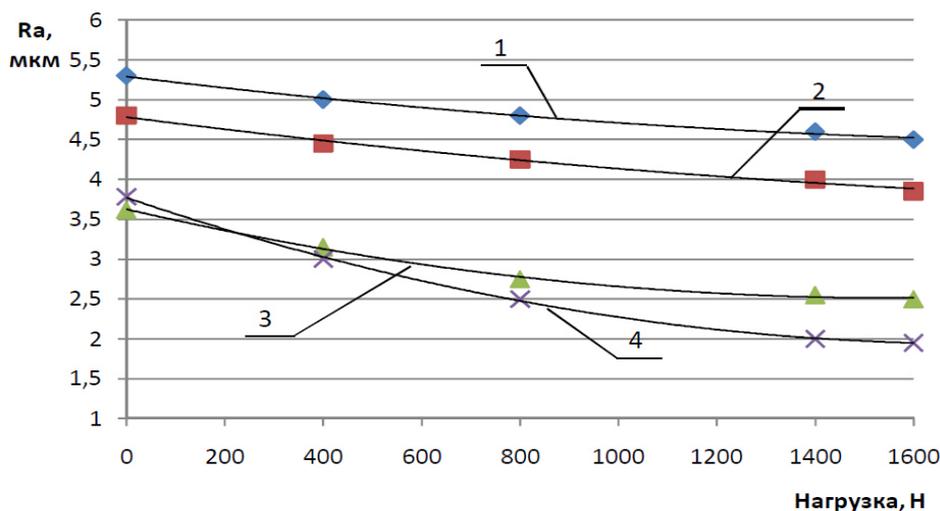


Рис. 3. Влияние нагрузки ОПД на величину Ra при обработке стали 12Х18Н10Т, подача  $S = 0,1$  мм/об, скорость  $V = 2$  м/с. Полушторчатое точение (глубина резания  $t = 0,5$  мм): 1 – VK8; 2 – T15K6; чистовое точение (глубина резания  $t = 0,2$  мм): 3 – VK8; 4 – T15K6

Таким образом, установлено, что опережающее пластическое деформирование позволяет повысить качество обработанной поверхности при полушторчатой и чистовой обработке сталей аустенитного класса, а также повысить эксплуатационные свойства обработанной поверхности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием коррозионно-стойких сталей / А. Р. Ингеманссон, Н. Г. Зайцева, Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев.
2. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 587 с.
4. Полянчиков, Ю. Н. Некоторые аспекты износа твердосплавного инструмента / Ю. Н. Полянчиков, Н. П. Черемушников, Д. В. Крайнев // Волжский технический вестник. – 2004. – № 4. – С. 40–41.
5. Полянчиков, Ю. Н. Неустойчивость процесса резания титановых сплавов и аустенитных сталей / Ю. Н. Полянчиков, Н. П. Черемушников, В. А. Солодков, Д. В. Крайнев, Н. М. Цыганова // Известия ВолгГТУ : междуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 1). – С. 50–52.
6. Ефимович, И. А. Циклический характер напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента в процессе резания / И. А. Ефимович // Вестник машиностроения. – 2003. – № 7. – С. 48–52.
7. Безъязычный, В. Ф. Кинематический анализ формирования сливной стружки / В. Ф. Безъязычный, С. В. Михайлов // Вестник машиностроения. – 2003. – № 11. – С. 48–50.
8. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
9. Трент, Е. М. Резание металлов / Е. М. Трент. – М. : Машиностроение, 1980. – 263 с.
10. Уткин, Е. Ф. Особенности протекания процессов пластического деформирования при резании труднообрабатываемых сталей и сплавов / Е. Ф. Уткин, Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Лукашенко, А. Н. Федулов // Известия ВолгГТУ : междуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 1). – С. 60–61.
11. Стариков, В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Стариков. – М. : Машиностроение, 1989. – 296 с.

УДК 621.923

О. А. Курсин, А. Л. Плотников, С. Ч. Као, С. Б. Фам, Н. И. Егоров

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ХОНИНГОВАНИЯ  
С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАВОДОРАЖИВАНИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Анализируется новый прогрессивный метод хонингования для повышения качества обработанной поверхности и снижения износа абразивного инструмента с максимальной производительностью при хонинговании изделий из низкоуглеродистых сталей.

*Ключевые слова:* хонингование, наводороживание, качество поверхности, низкоуглеродистая сталь, абразивная обработка.

The proposed new progressive method of honing to improve the surface quality and reduce the wear of abrasive tools with maximum performance when honing products from low-carbon steels.

*Keywords:* honing, saturation of the surface by hydrogen, quality of a surface, low carbon steel, abrasive processing.

Среди прогрессивных методов финишной обработки деталей ведущее место занимает хонингование. Этот метод получил широкое применение в машиностроении при чистовой обработке внутренних, наружных и плоских поверхностей благодаря высокой точности и качеству поверхностей ответственных сопряжений [1].

Недостатком метода является невысокое качество поверхности при обработке цилиндров компрессоров из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T. Образуются наплывы вдоль следа обработки, что говорит о необходимости повышать твердость поверхности.

К способами повышения твердости поверхности относятся: азотирование [2], цементация,

нитроцементация, борирование [3], лазерное легирование поверхностного слоя [4]. Однако такие способы имеют общие недостатки: снижение коррозионной стойкости изделий, вследствие выбивания атомов хрома атомами углерода или азота, а также возникают тепловые деформации, вследствие нагрева крупногабаритных длинных изделий до температур 700–950 °С.

Предлагается новый низкотемпературный метод обработки – хонингование с предварительным наводороживанием [5]. Метод наводороживания производится в электролитической установке с титановым анодом. Химические уравнения процесса электролита серной кислоты представлены на таблице.

**Химические уравнения процесса электролита серной кислоты**

Уравнение диссоциации электролита: $H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$			
Катодный процесс		Анодный процесс	
Катод (-)	К катоду – катионы $H^+$ . Восстанавливаются ионы $H^+$ : $2H^+ + 2\bar{e} \rightarrow H_2$	К аноду – анионы $SO_4^{2-}$ и молекулы $H_2O$ . Окисляется вода: $H_2O - 2\bar{e} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+$	Анод (+)
Суммарное уравнение электролиза: $2H^+ + 2\bar{e} \rightarrow H_2$ $H_2O - 2\bar{e} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+$ $H_2O = H_2 + \frac{1}{2}O_2$			

Водород проникает в железо в виде протонов, чем и объясняет его глубокая проникающая способность. Адсорбируясь на дефектах структуры – дислокациях и границах зерен.

В качестве электролита в нашей работе используется 0,1 н. р-р  $H_2SO_4$  + 0,5 г/л тиомочевина. Плотность тока наводороживания со-

ставляет 7,5–20 А/см<sup>2</sup>. Продолжительность экспериментов составляет от 30 мин до 90 мин [6]. В итоге твердость поверхностного слоя повышается до 60 %

Согласно исследованиям Н. А. Галактионовой [7], водород оказывает слабое влияние на предел прочности и предел текучести стали.

Более значительным и характерным является сильное уменьшение пластичности стали, выражающееся в положении удлинения и относительного суждения. Это означает, что истинное сопротивление разрыву по мере насыщения металла водородом сильно уменьшается и склонность к хрупкому разрушению повышается. При правильном выборе глубины срезаемого слоя, хрупкий слой металла удаляется в процессе обработки, что составляет от 0,5 до 1,5 мм.

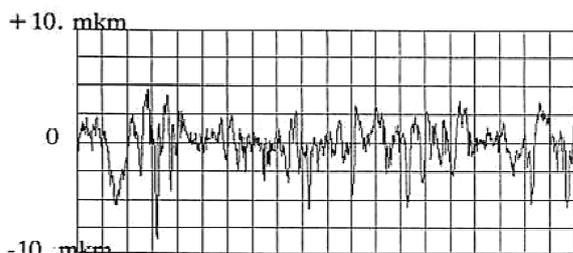


Рис. 1. Профилограмма обработанной поверхности стали 12X18H10T в нормализованном состоянии, полученной обычным хонингованием ( $R_a = 1,35$  мкм)

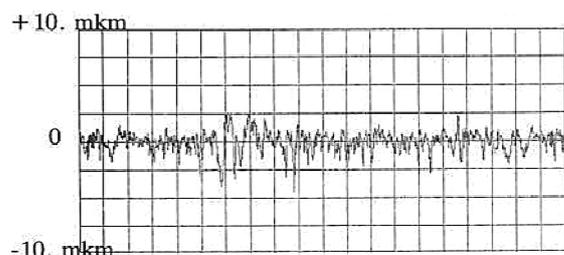


Рис. 2. Профилограмма обработанной поверхности стали 12X18H10T в нормализованном состоянии, полученной хонингованием с предварительным наводороживанием ( $R_a = 0,75$  мкм)

На основе пробных экспериментов удалось снизить параметр шероховатости до 45 % (рис. 1, 2) при глубине срезаемого слоя 0,5 мм а хрупкий слой наблюдается на глубине до 0,6 мм [6]. Это означает, что исключается возможность водородного охрупчивания готовых изделий.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет эффективно работать при обработке «мягких» труднообрабатываемых сталях крупногабаритных изделий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов, С. И. Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов, В. А. Романчук, С. В. Ковалевский. – М. : Машиностроение, 1983. – 135 с.
2. Лахтин, Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 81–88.
3. Прженосил, Б. Нитроцементация / Б. Прженосил. – М. : Машиностроение, 1969. – 212 с.
4. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
5. Полянчиков, Ю. Н. Повышение параметров резания путем поверхностного наводороживания заготовок / Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров, М. Ю. Полянчикова // Научно-технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» № 2-2 (292) 2012 март–апрель. – С. 30–34.
6. Курсин, О. А. Влияние присутствия водорода в поверхностном слое заготовки на микрогеометрию поверхности при финишной абразивной обработке / О. А. Курсин, Н. И. Егоров, И. Ф. Кожемякин, И. С. Филатов, М. Ю. Полянчикова, С. Ч. Као // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 33–35.
7. Галактионова, Н. А. Водород в металлах / Н. А. Галактионова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1967. – 303 с.

УДК 621.9

А. А. Липатов

### НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОГО СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: leandrej@yandex.ru

На микрошлифах корней стружек (косые срезы), полученных при точении аустенитной стали твердосплавным инструментом, проведены исследования микротвердости контактной зоны на передней поверхности. Установлено, что на минимальном расстоянии от передней поверхности неустойчивость деформирования, связанная с неустойчивостью стружкообразования, отсутствует. Неустойчивость деформации развивается в контактной зоне по мере удаления от передней поверхности.

**Ключевые слова:** точение, аустенитная сталь, твердосплавный инструмент, передняя поверхность, неустойчивость стружкообразования, неустойчивость деформирования в контактной зоне, микротвердость.

On the microsections of chip roots (oblique slices) obtained when turning austenitic steel, carbide tool, studies of the microhardness of the contact area on the front surface. It is established that at a minimum distance from the front surface of the unstable deformation related to the instability of chip formation, is missing. The instability of deformation develops in the contact area as the distance from the front surface.

**Keywords:** turning, austenitic steel, carbide tool, the front surface, the instability of chip formation, instability of deformation in the contact zone, microhardness.

Установлено, что неустойчивость стружкообразования, присущая резанию аустенитных сталей и других труднообрабатываемых материалов, существенно влияет не только на интенсивность, но и на механизм изнашивания твердосплавного инструмента [1]. Поэтому выявление физических причин, порождающих неустойчивость и формирование циклических стружек, имеет большое теоретическое и практическое значение.

Работами Н. В. Талантова показано, что одновременно со сменой фаз сжатия и локализованного сдвига при циклическом стружкообразовании меняется интенсивность деформирования обрабатываемой стали в контактной зоне на передней поверхности. Доказательством стали колебания микротвердости контактных объемов обрабатываемого материала, замеренной на микрошлифах корней стружек [2].

Однако в большинстве случаев исследования Н. В. Талантова проводились на прямых срезах корней стружек (секущая плоскость перпендикулярна передней поверхности). При этом, учитывая правила определения микротвердости (центр отпечатка должен располагаться на расстоянии не менее полутора диагоналей от границы раздела фаз, либо – двух его диагоналей от края образца) [2, 3], уколы производились на относительно большом расстоянии от твердого сплава (не менее 15 мкм). Задача данной работы – проверить тезис о циклическом характере деформирования контактных объемов обрабатываемой стали путем измерения их микротвердости на косых срезах (секущая плоскость наклонена по отношению к передней поверхности под углом  $\varepsilon \ll 90^\circ$ ), т. е. значительно ближе к передней поверхности.

Корни стружек получали с помощью «падающего» резца при точении стали 12X18H10T инструментом из ВК6. Скорость резания варьровалась в диапазоне  $v = 60\text{--}120$  м/мин при подаче 0,3 мм/об и глубине резания 1,5 мм. Основные геометрические параметры резцов:  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ . Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3.

Микрошлифы изготавливались таким образом, чтобы секущая плоскость образовывала с передней поверхностью угол  $\varepsilon \approx 15^\circ$ . В виде тупого клина находился обрабатываемый материал. При этом контактная зона растягивалась по высоте приблизительно в четыре раза, а истинное расстояние исследуемых объемов (точек) от передней поверхности было, соответ-

венно, в четыре раза меньше, чем в плоскости микрошлифа. Таким образом, соблюдая все правила, определяли микротвердость  $H_\mu$  контактных объемов стали, расположенных гораздо ближе к передней поверхности.

В качестве примера на рис. 1 приведена фотография косого среза контактной зоны с уколами (травление произведено после определения микротвердости). На рис. 2 приведены соответствующие графики изменения величины  $H_\mu$  по длине контактной зоны на различных (истинных) расстояниях  $z$  от передней поверхности. Из рис. 2 видно, что на минимальном расстоянии от передней поверхности  $z = 4$  мкм (кривая 1; нижний ряд уколов на рис. 1) периодичность деформации отсутствует, а график выглядит точно так же, как и в случае обработки углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса (т. е. при отсутствии неустойчивости). На большем удалении от передней поверхности ( $z = 12$  мкм; кривая 2 на рис. 2; второй снизу ряд уколов на рис. 1) уже проявляется неустойчивость деформирования, нашедшая отражение в периодических колебаниях микротвердости. Наконец, ближе к верхней границе зоны контактных деформаций ( $z = 22$  мкм; кривая 3 на рис. 2; третий снизу ряд уколов на рис. 1) наблюдаются ярко выраженные циклические колебания микротвердости, шаг которых совпадает с шагом циклического изменения картины текстурирования металла на фотографии (рис. 1). Далее (четвертый и пятый ряды уколов) размах колебаний  $H_\mu$  возрастает (графики на рис. 1 не приведены), достигая полного развития в стружке ( $z = 48$  мкм, кривая 4 на рис. 2; короткий верхний ряд уколов на рис. 1).

Аналогичные результаты получены и для других скоростей резания, при которых формируются циклические стружки.

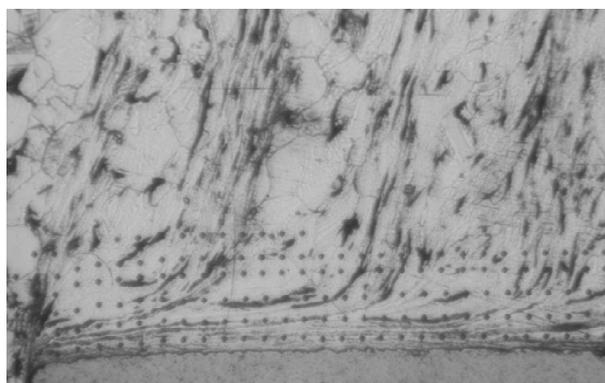


Рис. 1. Микрошлиф корня стружки, полученного при точении стали 12X18H10T резцом из ВК6 (косой срез под углом  $\varepsilon = 15^\circ$ ) со скоростью  $v = 75$  м/мин, с нанесенными уколами

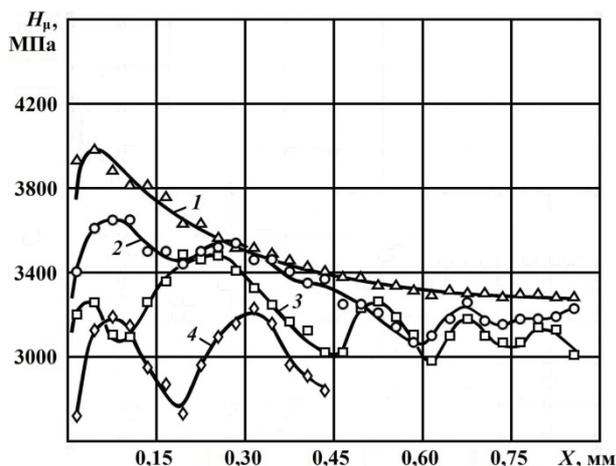


Рис. 2. Графики изменения микротвердости  $H_{\mu}$  по длине контактной зоны на различных расстояниях  $z$  от передней поверхности; 12X18H10T – ВК6;  $v = 75$  м/мин:  
1 –  $z = 4$  мкм; 2 –  $z = 12$  мкм; 3 –  $z = 22$  мкм; 4 –  $z = 48$  мкм

Таким образом, циклическая деформация в контактной зоне имеет место. Однако картина выглядит несколько сложнее, чем это представлено в [2]: на минимальном удалении от передней поверхности инструмента пластическое течение контактных слоев устойчиво.

УДК 621.9

А. А. Липатов

### ХАРАКТЕР КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ПЛОЩАДКЕ ИЗНОСА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: leeandrej@yandex.ru

Металлографическими исследованиями показано, что при резании аустенитной стали в условиях неустойчивого стружкообразования на площадке износа имеет место сплошной контакт обрабатываемого материала с твердосплавным инструментом с установлением прочной адгезионной связи. При этом зона контактных пластических деформаций имеет очень малую толщину.

**Ключевые слова:** точение, аустенитная сталь, твердосплавный инструмент, площадка износа на задней поверхности, сплошной контакт.

Metallographic studies have shown that during cutting of austenitic steel in conditions of instability chip formation at the wear platform takes place the solid contact of the processed material with hard alloy tool with establishing a strong adhesive bond. The contact area of the plastic deformation has a very small thickness.

**Keywords:** turning, austenitic steel, hard alloy tool, wear platform on the back surface, solid contact.

Изучение механизма изнашивания инструмента при резании аустенитных сталей и других труднообрабатываемых материалов имеет большое теоретическое и практическое значение. При этом первостепенным является вопрос о характере контакта обрабатываемого материала с инструментом.

Цикличность деформации развивается по мере удаления от инструмента, достигая полного развития на верхней границе контактной зоны.

Полученные результаты позволяют приблизиться к пониманию физической сущности процессов, происходящих в контактной зоне в условиях неустойчивости стружкообразования, причин неустойчивости и, возможно, к выработке мер, позволяющих блокировать ее негативное воздействие на работоспособность инструмента.

#### 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 ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 30–34.
2. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
3. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов / В. С. Золоторевский. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

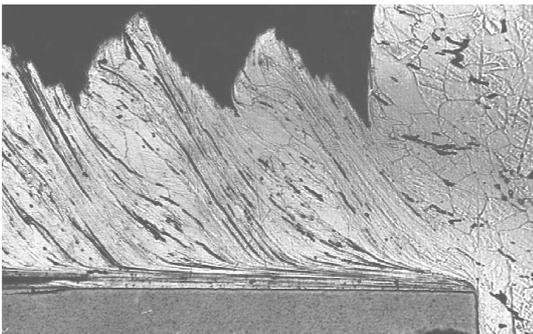
(при пластическом течении контактных слоев стали) [1].

Это зафиксировано фотографиями контактных зон, полученными при большом увеличении на микрошлифах корней стружек. Однако, если для передней поверхности сплошного контакта наблюдался для различных классов обрабатываемых материалов (в том числе – для случая обработки аустенитных сталей), то для площадки износа доказательства приводятся только для случая обработки углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса. Получить корень стружки со сплошным контактом аустенитной стали с площадкой износа достаточно большой ширины  $h_3$  весьма проблематично. Причина в том, что коэффициент термического линейного расширения аустенитной стали в полтора раза больше, чем у перлитных сталей. Соответственно, его отличие от коэффициента расширения твердых сплавов гораздо больше (для стали 12X18H10T  $K_\alpha = 18,3 \cdot 10^{-6}$  в диапазоне температур 20–500 °C [2], для твердого сплава ВК6  $K_\alpha = 4,9 \cdot 10^{-6}$  в диапазоне температур 20–800 °C, для любых вольфрамсодержащих твердых сплавов – не более  $6,6 \cdot 10^{-6}$  [3]). Плоскости контакта по передней поверхности и по площадке износа взаимно перпендикулярны (при переднем угле  $\gamma = 0^\circ$ ). Поэтому при охлаждении корня происходит разрыв контакта по одной из них. Разумеется, почти всегда разрыв происходит по поверхно-

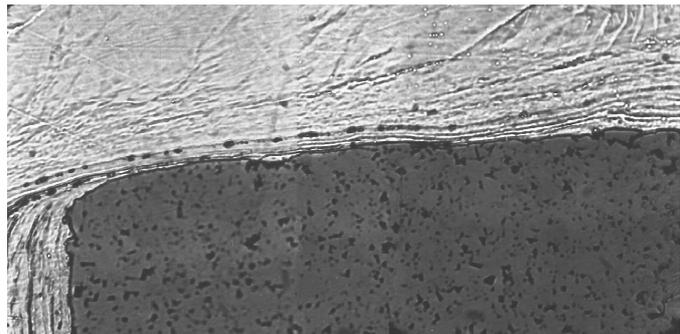
сти меньшей протяженности – площадке износа (для совсем малых величин  $h_3$  контакт может сохраниться – в работе [4] приведено фото такого корня при  $h_3 = 0,04$  мм).

Таким образом, *прямые* доказательства адгезионного схватывания по всей площади контакта (сплошного контакта) на площадке износа твердосплавных резцов при обработке аустенитных сталей ранее не приводились. Имеются лишь косвенные доказательства – на основе экспериментальных данных о силах резания *рассчитана* величина коэффициента «трения» на площадке износа при точении аустенитной стали  $\mu_3 > 1$  [4]. Кроме того, выявлено сохранение существенной адгезионно-усталостной составляющей в механизме изнашивания твердосплавных резцов при обработке аустенитной стали до высоких скоростей резания, что связано с неустойчивостью стружкообразования [5]. Поэтому остается почва для сомнений в отсутствии внешнего трения и наличии на площадке износа сплошного контакта.

Тем не менее, доказательство наличия сплошного контакта удалось получить. На рисунке приведены фотографии микрошлифа корня стружки, полученного при точении аустенитной стали 12X18H10T со скоростью резания  $v = 45$  м/мин инструментом из ВК6 с  $h_3 = 0,3$  мм (площадка износа сформирована искусственно и приработана) – общий вид (а) и контакт на площадке износа при большом увеличении (б).



а



б

Микрошлиф корня стружки, полученного при точении стали 12X18H10T резцом из ВК6 со скоростью  $v = 45$  м/мин (подача 0,3 мм/об):

а – общий вид, увеличение  $\times 80$ ; б – характер контактного взаимодействия на площадке износа, увеличение  $\times 2000$

Первое фото (рисунок а) фиксирует, что для этой скорости полностью развилась неустойчивость стружкообразования, и стружка стала строго циклической. Второе фото (рисунок б) при большом увеличении подтверждает наличие сплошного контакта твердого сплава со сталью – все неровности площадки износа за-

полнены обрабатываемым материалом. При этом зона контактных пластических деформаций имеет крайне малую толщину.

Отметим, что  $v = 45$  м/мин – *минимальная* скорость (и минимальная температура) перехода к строго циклическому стружкообразованию (неустойчивости) [5] – главному фактору, про-

воцирующему разрыв сплошного контакта при резании с появлением внешнего трения. В этом сочетании (развитая неустойчивость стружкообразования при минимальной контактной температуре) наличие разрывов в контакте было бы наиболее вероятным.

Получить такой корень удалось из-за сочетания ряда обстоятельств. Во-первых, появление трещин в твердом сплаве и стали в конце контакта по передней поверхности (рисунок *a*). Во-вторых, сравнительно небольшая скорость, а следовательно, и температура при резании: уменьшение линейных размеров стали и твердого сплава (и их разности) при остывании корня было относительно небольшим. В-третьих, твердый сплав скололся в средней части площадки износа (сохранился контакт по площадке износа на длине порядка 0,15 мм). Это опять-таки уменьшило величину линейного сжатия в контакте при остывании корня.

То, что доказательство сплошного контакта получено не для всей длины контакта обрабатываемой стали с площадкой износа (0,3 мм), его несколько обесценивает. Но обесценивает ненамного, так как следы адгезионных вырывов на площадке (которые могли бы быть результатом разрыва контакта) фиксируются уже на малом расстоянии от режущей кромки, а наибольшая их плотность наблюдается в середине длины контакта [6, 7].

Таким образом, приведено *прямое* доказательством сплошного контакта обрабатываемой аустенитной стали с площадкой износа твердо-

сплавного инструмента при практически используемых скоростях резания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
2. *Материалы в машиностроении. Выбор и применение: Справочник в пяти томах / под общ. ред. И. В. Кудрявцева. Т. 3. Специальные стали и сплавы / под ред. Ф. Ф. Химушина.* – М.: Машиностроение, 1968. – 446 с.
3. *Третьяков, В. И.* Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов / В. И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
4. *Липатов, А. А.* Исследование характера контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности инструмента при резании аустенитной стали / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский, С. И. Кормилицин // *Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 13 (86) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 7). – С. 27–30.
5. *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 ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 30–34.
6. *Липатов, А. А.* Особенности диффузионного изнашивания вольфрамокобальтового твердого сплава при точении высоколегированной аустенитной стали / А. А. Липатов // *Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 39–42.
7. *Липатов, А. А.* Характер распределения температуры по длине контакта обрабатываемого материала с площадкой износа задней поверхности инструмента при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // *Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 21 (148) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 12). – С. 24–26.

УДК 621.9.02

*О. А. Макарова, А. А. Кожевникова, А. И. Банников*

#### ИССЛЕДОВАНИЕ НАРОСТА НА ВЕРШИНЕ ЗУБА ПИЛЫ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОМ РЕЗАНИИ ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: alc19@mail.ru

Исследована микроструктура нароста вершины зуба пилы. Проведено электронно-микроскопическое исследование нароста на вершине зуба горячей пилы. Установлено отсутствие диффузионных процессов на границе соприкосновения нароста с поверхностью зуба, что доказывает адгезионный характер образования нароста.

*Ключевые слова:* термофрикционное резание, нарост, микроструктура нароста, горячий прокат.

Investigated the microstructure of the build-up of the top of the saw tooth. Held electronmicroscopical study the build-up on top of a hot tooth saw. The absence of diffusion processes on the boundary of contact with the growth surface of the tooth, which proves the adhesion nature of the education growth.

*Keywords:* termofikacine cutting, growth, microstructure growth, hot rolled.

В процессе термофрикционного резания горячего трубопровода на стане 2000 ТПЦ-2 наблюдается процесс образования тонких слоев нароста на вершинах зубьев классических пил [1].

На рис. 1 представлен микрошлиф нароста на контактной поверхности зуба пилы. Микроструктуру металла вершин зубьев исследовали после травления 4 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты (ниталем) при увеличениях от  $\times 50$  до  $\times 500$  на материаловедческом агрегатном микроскопе OLYMPUS BX61 (рис. 1). Фиксирование структуры производилось цифровой камерой DP -12 с последующей обработкой электронного изображения пакетом программ AnaliSyS.

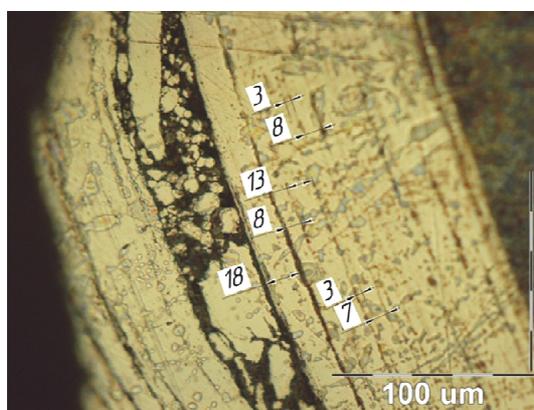


Рис. 1. Микроструктура нароста вершины зуба пилы

Образование нароста обусловлено распределением тепловых потоков при обработке горячих заготовок. В зоне контакта заготовки и инструмента образование граничного слоя сопровождается интенсивным стоком теплоты из заготовки в инструмент. При обработке горячего металла поток тепла, выделяющийся при трении крайне незначителен по сравнению с потоком тепла от нагретой заготовки. Поэтому на контактной поверхности инструмента определяющим процессом является интенсивный отвод тепла из обрабатываемого материала в материал инструмента.

Большую роль играет цикличность процесса обработки. Быстрый нагрев вершины зуба пильного диска в процессе резания и быстрое охлаждение его на воздухе и под действием СОЖ приводит к адгезии (налипанию) горячего металла на контактной поверхности в виде тонкого заторможенного слоя.

В отличие от сложно-напряженного состояния заторможенного слоя при образовании нароста при обработке холодных заготовок [2], заторможенный слой металла при термофрикционном резании возникает вследствие остывания

тонкого слоя горячего металла на холодном зубе.

Материал нароста образует сложную слоистую структуру на вершине зуба пилы (рис. 1). Каждый из слоев отделен от другого оксидной пленкой, которая могла образоваться только в тот момент, когда зуб пилы выходит из зоны резания. Тонкий горячий слой металла в этот момент активно окисляется. В дальнейшем на этот слой налипают последующие слои.

Для определения природы образования нароста на контактной поверхности зуба пилы проводились электронографические исследования на сканирующем электронном микроскопе Versa 3DDualBeam нароста и материала зуба пилы.

Электронномикроскопическое исследование нароста на вершине зуба пилы подтверждает, что он образован материалом горячей трубы при резании (рис. 2). Отсутствие диффузии элементов инструмента в нарост и нароста в инструмент доказывает, что тонкие слои обрабатываемого материала не привариваются к поверхности зуба пилы, а удерживаются адгезионным взаимодействием.

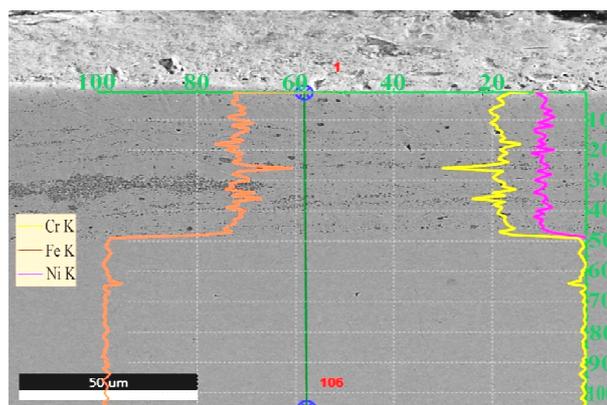


Рис. 2. Электронная фотография вершины зуба классической пилы с наростом

Данные фотографии подтверждают предположение об адгезионном характере взаимодействия нароста и вершины зуба.

### Выводы

Впервые обнаружено отсутствие диффузионных процессов на границе соприкосновения нароста с поверхностью зуба, что доказывает адгезионный характер образования нароста.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банников, А. И. Теоретические основы модернизации термофрикционных пил для резки горячего трубопровода : монография / А. И. Банников ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – 135 с.
2. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.

УДК 621.921.27:620.186.82

*В. А. Носенко, А. А. Александров***ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕГО И ДИСПЕРСИИ ДЛИНЫ ЗЕРЕН ФРАКЦИЙ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЧЕРНОГО ОТ РАЗМЕРА ЯЧЕЙКИ ПРОХОДНОГО СИТА****Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**

E-mail: nosenko@volpi.ru

Исследовано распределение длины зерен фракций шлифовальных порошков зернистостью F36-F180, полученных методом отсева по ГОСТ Р 52381. Длину зерен измеряли по электронным фотографиям проекции профиля зерна на горизонтальную плоскость с использованием специального программного обеспечения. Результаты измерений обрабатывали методами математической статистики. Зависимость средней длины зерен фракции от ячейки проходного сита для каждой зернистости аппроксимирована полиномом первой степени. Зависимости среднего и дисперсии длины зерен шлифовальных порошков одинаковых фракций различных зернистостей от размера ячейки проходного сита аппроксимированы соответственно неполными полиномами первой и второй степени. Определена закономерность изменения коэффициентов полинома с увеличением зернистости и номера фракции шлифовального порошка.

*Ключевые слова:* шлифовальные порошки; карбид кремния черный; фракция, средняя длина, дисперсия, ячейка сита.

The distribution of the length of the abrasive powder grain fractions grit F36-F180, produced by screening according to GOST R 52381 is studied. The length of the grains was measured by projections of electronic grain images on a horizontal plane using special software. The measurement results are treated by methods of mathematical statistics. The dependence of the average length of the grain fraction and the upper sieve for each grain is approximated by a polynomial of the first degree. Dependence of mean and variance of the length of the grain grinding powders for identical fractions of different grit sizes was approximated by partial polynomials respectively first and second degree. The regularities of changes in the coefficients of the polynomial with the increase in grain and rooms fraction grinding powder.

*Keywords:* grinding powders; black silicon carbide; fraction; mean; variance; sieve cell.

Режущая способность и износостойкость абразивного инструмента, сила и температура резания, качество обработанной поверхности, имеют первостепенное значение при обработке особо ответственных деталей машин. Известно, что эти показатели во многом зависят от геометрических параметров зерен шлифовальных порошков [1, 2]. Поэтому актуальным вопросом абразивной обработки является исследование формы и размеров зерен шлифпорошков.

Установлено, что ширина зерен микрошлифпорошков зернистостей M14-M40 в большинстве случаев подчиняется нормальному закону распределения, длина зерен имеет более пологую правую ветвь распределения. Средняя длина и ширина зерен связана с условным обозначением зернистости прямой пропорциональной зависимостью, дисперсии – степенной зависимостью [3].

Кривые распределения длины зерен алмазных порошков зернистостей 160/125, 100/80 и 80/63 имеют выраженную положительную асимметрию [4]. Распределение длины зерен фракций шлифовальных порошков карбида кремния зеленого производства Волжского абра-

зивного завода, рассеянного по ГОСТ Р 52381, также имеют положительную асимметрию [5].

В наибольшей степени исследована ширина зерен [6, 7]. Во многом это объясняется тем фактом, что ширина зерен лежит в основе классификация шлифовальных порошков по зернистости в процессе отсева на ситах при изготовлении [8, 9].

Распределение ширины зерен шлифовальных порошков и отдельных фракций, полученных методом отсева, в большинстве случаев подчиняется нормальному закону [10–14]. Выполнены обстоятельные исследования ширины зерен шлифовальных порошков из карбида кремния черного зернистостью F36-F180 [15–18]. Установлено, что отклонение от нормального закона наблюдается у фракций, оседающих на втором контрольном сите и поддоне [15]. Предельные размеры зерен фракций шлифовальных порошков зернистостей F36-F180 обоснованы с учетом допуска на размер ячейки сита [16, 17].

Длина зерен, как и ширина, относится к основным геометрическим параметрам, но закономерности ее изменения для шлифовальных

порошков различных зернистостей исследованы в меньшей степени.

Цель данной работы заключалась в исследовании распределения длины зерен фракций шлифовальных порошков из карбида кремния черного зернистостью F180-F36 и определении связи среднего и дисперсии длины зерен фракций с размером ячейки проходного сита.

Для исследований выбраны шлифовальные порошки карбида кремния черного марки 54С, серийно изготавливаемые на ОАО «Волжский абразивный завод»: F36, F46, F60, F90, F120, F180. Перед рассевом шлифовальные порошки высушивали в течение 30 минут при температуре 105°. Рассев выполняли на машине типа РО-ТАР. Из каждой фракции методом квартования отбирали пробу для измерения геометрических параметров. Объем выборки зерен в каждой фракции составил от 600 до 1500 зерен. Измерения выполняли фотометрическим методом с использованием специального программного обеспечения [19]. Изображение зерен получали камерой с разрешением 5 Мпикс. При визуальном просмотре изображений исключали из анализа слипшиеся зерна. Расстояние между двумя максимально удаленными точками профиля зерна принимали за длину зерна. Погрешность измерения длины зерна не превышала 5 %.

Шлифовальные порошки рассевали на фракции по ГОСТ Р 52381. От каждой зернистости получено по пять фракций в виде остатков на ситах ( $Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$ ) и поддоне ( $Q_6$ ). Поскольку у шлифовального порошка зернистостью F46 масса остатка на поддоне  $Q_6$  была менее 0,1 г, согласно ГОСТ Р 52381 ее во внимание не принимали и в дальнейших исследованиях не учитывали. Всего получено 34 фракции. Анализ зернового состава шлифовальных порошков показал, что все исследуемые зернистости соответствуют требованиям ГОСТ Р 52381 [8].

Для построения распределения определяли вариационный размах длины в каждой выборке и делили его 10–15 групп. Если частота попадания значений длины зерен в группе была меньше 9, рассматриваемую группу объединяли со следующей. Соответствию длины зерен нормальному закону распределения проверяли по критерию Пирсона. Уровень значимости при проверке статистических гипотез принимали равным 0,05.

Установлено, что подавляющее большинство кривых распределения имеют удлиненную правую ветвь. Для данных, представленных на рис. 1, коэффициент асимметрии колеблется в диапазоне 0,404–1,860. Нормальному закону распределения подчиняются всего 3 из 34 выборок длины зерен:  $Q_5(F46)$ ,  $Q_6(F90)$  и  $Q_6(F180)$ .

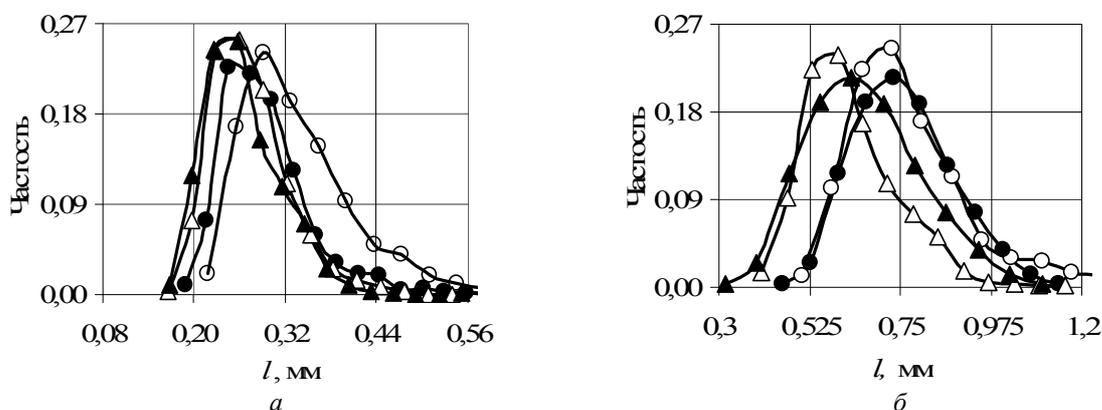


Рис. 1. Плотность распределения длины зерна  $l$  фракций шлифовальных порошков F90 (а) и F46 (б):  
○ –  $Q_2$ ; ● –  $Q_3$ ; ▲ –  $Q_4$ ; △ –  $Q_5$

Исходя из формы кривых и значений коэффициентов асимметрии высказано предположение о возможности распределения по логарифмически нормальному закону. Значения длин были прологарифмированы и обработаны статистически. Установлено, что из 34 выборок около 60 % имеют логарифмически нормальный закон распределения. В наибольшей степени логарифмически нормальному закону подчиняется распределение длины зерен фрак-

ций  $Q_3, Q_4$  и  $Q_5$ . Отклоняется от логарифмически нормального закона длина зерен фракции  $Q_2$  в пяти зернистостях, фракций  $Q_6$  – в четырех. Распределение длины зерен фракции  $Q_2$  имеет еще более выраженную положительную асимметрию. Во фракциях  $Q_6$  возможно образование двухвершинного распределения.

В общем случае средняя длина зерен фракций  $l_m$  внутри каждой зернистости возрастает с увеличением размера ячейки проходного сита

$W$  (рис. 2). Зависимость  $l_m$  от  $W$  в каждой зернистости аппроксимирована полиномом первой степени

$$l_m = a_1 W + c, \quad (1)$$

где  $a_1, c$  – постоянные коэффициенты (табл. 1).

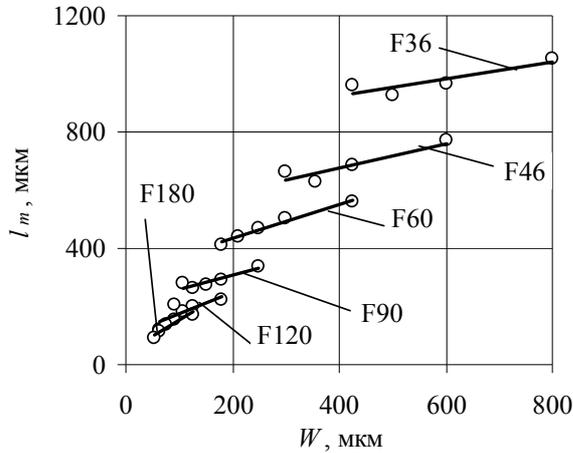


Рис. 2. Зависимость средней длины зерен фракции  $l_m$  от размера ячейки проходного сита  $W$

Анализ рис. 2 и табл. 1 свидетельствует о том, что с увеличением зернистости снижается угол наклона линейной зависимости относительно оси абсцисс, соответственно, коэффициент пропорциональности  $a_1$ , и увеличивается. Снижение коэффициента пропорциональности  $a_1$  свидетельствует об уменьшении влияния размера ячейки проходного сита на среднюю длину зерен фракции с увеличением зернистости шлифовального порошка.

Из рис. 2 также следует, что при одинаковых размерах  $W$  большую среднюю длину имеют зерна фракций более крупной зернистости. Например, при рассеве через ячейку проходного сита  $W=600$  мкм формируются две

фракции  $Q_3(F36)$  и  $Q_2(F46)$ . Большая средняя длина зерна принадлежит фракции более крупной зернистости  $F36$ . Подобные закономерности установлены и при сравнении других фракций, имеющих равный размер ячейки проходного сита.

Таблица 1

Постоянные коэффициенты  $a_1, c$ , коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$  и дисперсия неадекватности  $S_1^2$  полинома (1)

Зернистость	$a_1, \text{мкм}^{-1}$	$c_1, \text{мкм}$	$R^2$	$S_1^2, \text{мкм}^2$
F36	0,28	809	0,779	615,8
F46	0,42	510	0,838	582,3
F60	0,58	318	0,979	66,4
F90	0,47	212	0,858	119,8
F120	0,71	107	0,631	566,6
F180	1,09	45	0,905	99,1

Различия между средними значениями длины зерен фракций, принадлежащих различным зернистостям, но имеющих одинаковый размер ячейки проходного сита, свидетельствуют о необходимости учета влияния на длину зерна, как фактора номера фракции, так и фактора зернистости. В связи с этим исследована взаимосвязь между средним и дисперсией длины зерен одинаковых фракций, принадлежащих различным зернистостям, и размером ячейки соответствующего проходного сита. Зависимость между параметрами удовлетворительно описывается неполным полиномом первой степени (рис. 3, а):

$$l_m = a_2 W, \quad (2)$$

где  $a_2$  – коэффициент пропорциональности (табл. 2).

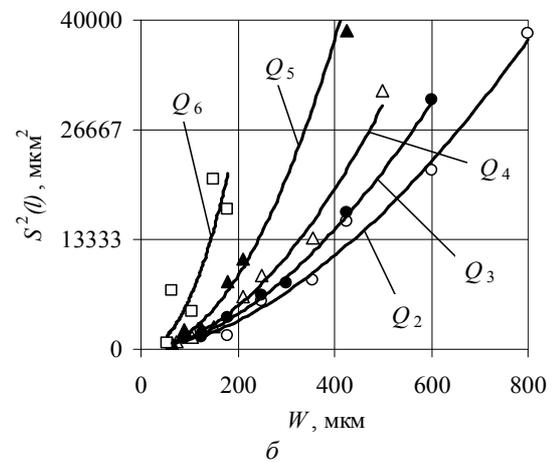
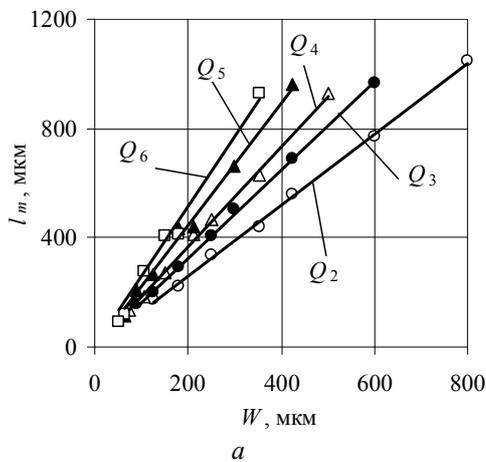


Рис. 3. Зависимость среднего  $l_m$  (а) и дисперсии  $S^2(l)$  (б) длины зерен одинаковых фракций различных зернистостей от размера ячейки проходного сита  $W$

Взаимосвязь дисперсии длины зерен  $S^2(l)$  одинаковых фракций, принадлежащих различным зернистостям, и размера ячейки соответствующего проходного сита  $W$  аппроксими-

ровали степенной зависимостью (3, б):

$$S(l)^2 = a_3 W^e, \quad (3)$$

где  $a_3$  – постоянный коэффициент;  $e$  – показатель степени (табл. 2).

Таблица 2

Постоянные коэффициенты  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $e$ , коэффициенты достоверности аппроксимации  $R^2$  и дисперсия неадекватности  $S_1^2$  зависимостей (2) и (3)

Фракции	Зависимость (2)			Зависимость (3)		
	$a_2, \text{мкм}^{-1}$	$R^2$	$S_1^2, \text{мкм}^2$	$a_3$	$e$	$R^2$
$Q_2$	1,30	0,998	175,6	0,4	1,73	0,934
$Q_3$	1,62	0,999	81,2	0,3	1,78	0,988
$Q_4$	1,84	0,997	243,0	0,2	1,90	0,992
$Q_5$	2,23	0,993	560,0	0,1	2,08	0,970
$\Delta Q$	2,55	0,986	1280,1	0,3	2,14	0,688

Из анализа табл. 2 и рис. 3 следует, что с увеличением номера фракции возрастает коэффициент пропорциональности зависимости (2) и показатель степени зависимости (3), соответственно возрастает угловой коэффициент касательной к графику степенной зависимости дисперсии длины зерен. В обоих случаях увеличение  $a_2$  и  $e$  свидетельствуют о росте влияния ячейки проходного сита фракции на среднее и дисперсию длины зерен формируемых фракций с увеличением номера фракции.

**Выводы**

1. Распределение длины зерен фракций имеет удлиненную правую ветвь. В наибольшей степени логарифмически нормальному закону распределения соответствует длина зерен средних фракций  $Q_3$ ,  $Q_4$  и  $Q_5$ . Распределения зерен самых крупных  $Q_2$  и самых мелких  $Q_6$  фракций отличаются более высоким значением коэффициента асимметрии и в большинстве случаев логарифмически нормальному закону не подчиняется.

2. Среднее и дисперсия длины зерен фракций различных зернистостей, имеющих одинаковый размер ячейки проходного сита, возрастают с увеличением зернистости.

3. Взаимосвязь средней длины зерен фракций и размера ячейки проходного сита внутри зернистости подчиняется линейной зависимости. С увеличением зернистости снижается коэффициент пропорциональности и возрастает свободный член линейной зависимости, соответственно снижается влияние фактора размера ячейки проходного сита на длину зерна.

4. Взаимосвязи среднего и дисперсии длины зерен фракций различных зернистостей, имеющих одинаковый номер проходного сита, с размером ячейки этого сита аппроксимированы соответственно прямой пропорциональной и степенной зависимостями. С увеличением номера фракции коэффициент пропорциональности и показатель степени возрастают, что свидетельствует об увеличении влияния фактора размера ячейки проходного сита, соответственно, на среднее и дисперсию длины зерна.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – К. : Наукова думка. – 1978. – 207 с.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / под ред. д-ра техн. наук проф. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. Носенко, В. А. Статистические параметры геометрических размеров зерен микрошлифпорошков карбида кремния / В. А. Носенко, И. А. Макушкин, А. А. Шегай // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – Вып. 7. – С. 32–34.
4. Аскалонова, Т. А. Анализ методов контроля качества алмазных порошков / Т. А. Аскалонова // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 2. – С. 5–8.
5. Носенко, В. А. Технология шлифования : монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 424 с.
6. Носенко, В. А. Методика и некоторые результаты исследования геометрических параметров порошков из карбида кремния / В. А. Носенко, И. А. Макушкин, К. А. Букштанович // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4–2 (288). – С. 125–130.
7. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / В. Н. Бакул [и др.]. – М. : Машиностроение, 1975. – 296 с.
8. Мгеладзе, В. Ф. Зависимость среднего объема единичного зерна основной фракции от размера ячейки за-

держивающего сита / В. Ф. Мгеладзе, И. В. Лавров // Абразивы. – 1971. – № 1. – С. 1–4.

9. Абразивные материалы и инструменты : каталог ; под ред. В. Н. Тыркова. – М. : ВНИИТЭМР. – 1986. – 391 с.

10. *Гаршин, А. П.* Абразивные материалы и инструменты. Технология производства / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общ. ред. А. П. Гаршина. – СПб. : Изд-во Политехнического университета. – 2008. – 1010 с.

11. *Ли Чан-Цзе.* Об определении геометрии абразивных зерен / Ли Чан-Цзе // Абразивы. – 1961. – № 31. – С. 10–18.

12. *Лавров, И. В.* Закономерность распределения зерен в шлифзерне, шлиф- и микропорошках по крупности / И. В. Лавров, Т. Б. Лобода // Абразивы. – 1973. – № 12. – С. 8–15.

13. *Островский, В. И.* Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л. : Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 144 с.

14. *Михайлов, М. И.* Влияние абразивосодержащего наполнителя на прочность композиционного материала на основе латуни / М. И. Михайлов, Д. В. Никитенко // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 35–42.

15. *Носенко, В. А.* Геометрические параметры зерен шлифовального порошка карбида кремния черного 54CF60 производства Волжского абразивного завода [Электронный ресурс] / В. А. Носенко, А. А. Александров, Е. Ф. Ганшу // Современные проблемы науки и образования : электрон. науч. журнал / РАЕ. – 2014. – № 3. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/117-12798>.

16. *Носенко, В. А.* Распределения ширины зерен шлифовальных порошков из карбида кремния черного различных зернистостей / В. А. Носенко, А. А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 2. – С. 111–117.

17. *Носенко, В. А.* Определение проходного и непроходного размера ширины зерен в пробах при рассеивании шлифовального порошка 54CF60 на контрольных ситах / В. А. Носенко, А. А. Александров // Вісник СевНТУ. – 2014. – № 150. – С. 102–106.

18. *Носенко, В. А.* Определение проходного и непроходного размера ширины зерен в пробах при рассеивании шлифовального порошка 54CF46 на контрольных ситах / В. А. Носенко, А. А. Александров // Вестник Рыбинской гос. авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2014. – № 1. – С. 44–48.

19. *Носенко, В. А.* Связь ширины зерен шлифовальных порошков из карбида кремния черного с размерами ячеек контрольных сит / В. А. Носенко, А. А. Александров // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – № 5. – С. 74–80.

20. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610144, 11.01.11. Программа для автоматизированного определения геометрических параметров шлифовального зерна по фотографии «Зерно НМ ВПИ» / В. А. Носенко, А. А. Рыбанов, И. А. Макушкин, А. А. Шегай, К. А. Букштанович. – ВолгГТУ, 2011.

УДК 621.923

**С. В. Носенко, В. А. Носенко, Н. Д. Сердюков, А. С. Кузнецова**

## СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПЛОСКОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВЫСОКОСТРУКТУРНЫМИ КРУГАМИ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: [nosenko@volpi.ru](mailto:nosenko@volpi.ru)

Исследован процесс плоского врезного шлифования титанового сплава ВТ9 высокоструктурными кругами из карбида кремния зеленого на керамической связке. Показаны закономерности изменения касательной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания и их отношения  $P_z/P_y$  на встречной и попутной подачах за период шлифования и средних значений показателей на установившемся этапе. Рассмотрено влияние подачи на глубину, твердости круга и состава используемой смазочно-охлаждающей жидкости. Исследования проведены на прецизионном профилировальном станке с ЧПУ CHEVALIER модели Smart-B1224 III. Составляющие силы резания измеряли шестикомпонентным силоизмерительным комплексом Amti.

*Ключевые слова:* титановый сплав, плоское шлифование, составляющие силы резания, твердость круга, подача на глубину, смазочно-охлаждающая жидкость, направление подачи стола.

The process of flat infeed grinding of titanium alloy «VT9» by highly porous and highly structural abrasive wheels of silicon carbide green on a ceramic bond is investigated. Regularities changes of the tangent  $P_z$  and the radial  $P_y$  components of the cutting force and their ratio  $P_z/P_y$  on climb and counter giving during grinding and average values of indicators at the established stage are shown. The effect of the feed on the depth, the hardness of the wheel and the composition of the lubricating-cooling liquid used is considered. The studies were carried out on a precision CNC profile grinding machine CHEVALIER model Smart-B1224 III. Components of cutting forces were measured with a six-component Amti load-measuring system.

*Keywords:* Titanium alloy, flat grinding, cutting force components, circle hardness, depth feed, cutting fluid, table feed direction.

Титан и его сплавы применяются для изготовления особо ответственных деталей в различных областях – авиастроение, ракетострое-

ние, судостроение, в химической и пищевой промышленности, медицине [1–3]. Механическая обработка титановых сплавов, в частности,

шлифование связана с большими нагрузками на абразивный материал, основной причиной которых является адгезионная активность титана [4, 5]. Достаточно высокая сила резания приводит к образованию на обработанной поверхности недопустимого дефекта – шлифовочных прижогов.

Для снижения силы резания используют специальные смазочно-охлаждающие технологические средства, мягкие и чрезвычайно мягкие абразивные инструменты, непрерывную правку шлифовального круга [6–13]. Тем не менее, сила резания при шлифовании титановых сплавов с учетом взаимного влияния различных факторов исследована недостаточно, что и определило цель данной работы.

В качестве исследуемых факторов выбраны: направление продольной подачи стола, подача на глубину шлифования, твердость круга и смазочно-охлаждающая жидкость.

Шлифование осуществляли на прецизионном профилировальном станке с ЧПУ CHEVALIER модели Smart-B1224 III методом врезной подачи. Режимы обработки: скорость шлифования – 30 м/с, скорость продольной подачи – 12 м/мин, подачи на глубину:  $S_{11} = 0,005$  мм/ход,  $S_{12} = 0,010$  мм/ход. Шлифование осуществляли высокопористыми высокоструктурными кругами производства ОАО «Волжский абразивный завод», характеристики инструмента: 4CF100G12V

и 64CF100I12V. Обрабатывали заготовки из титанового сплава марки ВТ9. Прижоги на обработанной поверхности определяли методом травления. Составляющие силы резания измеряли шестикомпонентным силоизмерительным комплексом *Amti*.

В качестве смазочно-охлаждающих технологических сред выбраны две жидкости на водной основе: СОЖ 1, содержащая соду кальцинированную; СОЖ 2, основным компонентом которой является  $Na_3PO_4$ .

Применение высокопористого высокоструктурного инструмента на всех рассмотренных режимах и СОЖ обеспечивает бесприжоговое шлифование.

При шлифовании с охлаждением СОЖ 1 по закономерности изменения составляющих силы резания можно выделить два основных этапа: приработка (этап 1) и относительно установившийся (этап 2). В зависимости от условий шлифования этап приработки завершается в интервале до  $192 \text{ мм}^3$  (рис. 1). Составляющие силы резания на этапе приработки возрастают на первых ходах стола, затем снижаются.

Например, на круге твердостью  $G$  с подачей  $0,005$  мм/ход составляющие силы резания достигают своих максимальных значений при наработке  $V=23 \text{ мм}^3$  (3-й ход стола):  $P_{z \max} \approx 50$  Н и  $P_{y \max} \approx 91$  Н. Затем  $P_z$  и  $P_y$  снижаются, при  $V=192 \text{ мм}^3$  равны соответственно 33 и 52 Н.

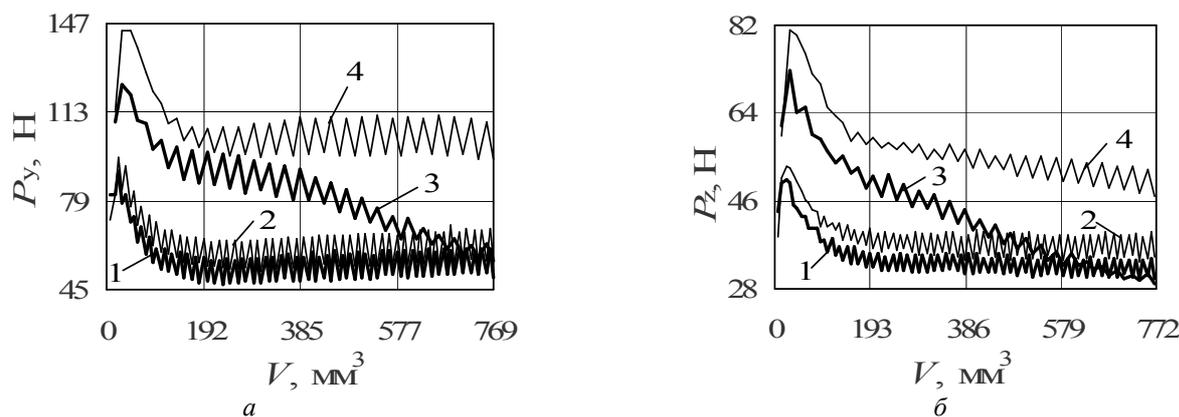


Рис. 1. Изменение составляющих силы резания  $P_y$  (а) и  $P_z$  (б) в зависимости от наработки  $V$  с охлаждением СОЖ 1: 1 – 0,005 мм/ход, твердость  $G$ ; 2 – 0,005 мм/ход, твердость  $I$ ; 3 – 0,010 мм/ход, твердость  $G$ ; 4 – 0,010 мм/ход, твердость  $I$

Отношение  $P_z/P_y$  возрастает на этапе 1 до наработки около  $70 \text{ мм}^3$  (рис. 2, а), что свидетельствует о более высокой интенсивности роста  $P_z$  по сравнению с  $P_y$  в интервале наработки, где обе составляющие силы резания увеличиваются, и менее высокой интенсивности сни-

жения в интервале уменьшения обеих составляющих. При  $V$  более  $70 \text{ мм}^3$  скорости снижения обеих составляющих можно считать стабильными, что подтверждается относительно стабильными значениями отношения  $P_z/P_y$  до конца этапа 1.

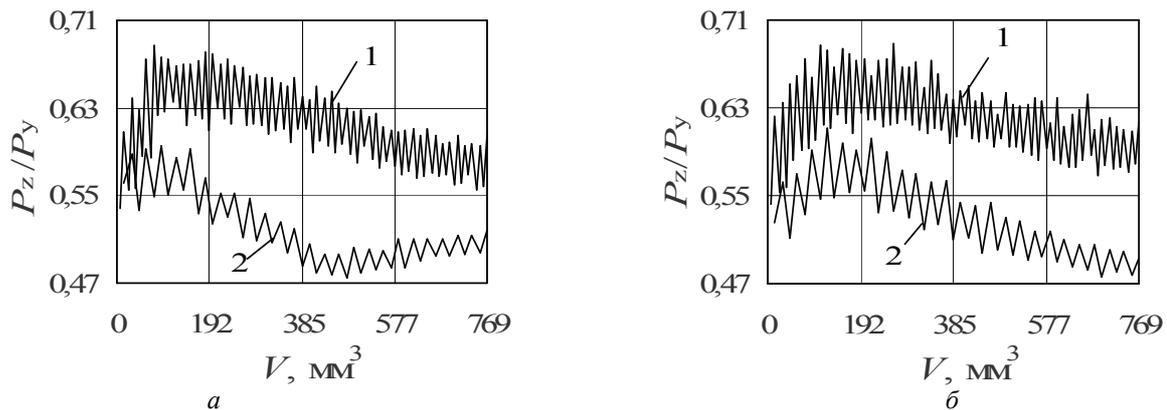


Рис. 2. Изменение отношения  $P_z/P_y$  в зависимости от наработки  $V$  при шлифовании кругом твердостью  $G$  (а) и  $I$  (б) с охлаждением СОЖ 1:  
1 – 0,005 мм/ход; 2 – 0,010 мм/ход

Для круга твердостью  $I$  относительная стабилизация скорости изменения составляющих силы резания достигается при  $V$  более  $100 \text{ мм}^3$ . На этапе 2 наблюдается некоторый рост  $P_y$  и снижение  $P_z$ . В связи с чем, отношение  $P_z/P_y$  уменьшается на 8–12 %.

С увеличением подачи в 2 раза до 0,010 мм/ход круг твердостью  $G$  переходит на втором этапе в режим преимущественного и постоянно возрастающего самозатачивания, о чем свидетельствует почти пропорциональное снижение составляющих силы резания в интервале наработки 192–769  $\text{мм}^3$  в 1,8 раза и интенсивный износ шлифовального круга [14].

Рост твердости круга на две степени от  $G$  до  $I$  в общем случае приводит к увеличению силы резания.

На скорости подачи 0,005 мм/ход, увеличение силы резания незначительное, поэтому режим работы круга практически не изменился.

На подаче 0,02 мм/ход круг твердостью  $I$ , в результате увеличения силы удержания зерен связкой круга продолжает работать в режиме преимущественного самозатачивания, но его доля в смешанном режиме затупления-самозатачивания существенно снижается, что согласуется с ростом силы резания и снижением износа круга.

С охлаждением СОЖ 2 продолжительность этапа приработки увеличилась. Например, при подаче 0,005 мм/ход для круга твердостью  $G$  относительная стабилизация составляющих силы резания после их снижения начинается с наработки не менее  $270 \text{ мм}^3$  (рис. 3, а). Увеличилась и продолжительность изменения отноше-

ния составляющих силы резания. Для рассмотренного примера отношение  $P_z/P_y$  возрастает до наработки около  $190 \text{ мм}^3$  (рис. 3, б), что свидетельствует о более высокой скорости снижения, составляющей  $P_y$ . Похожая закономерность наблюдается и при шлифовании кругом твердостью  $I$ .

Круг твердостью  $G$  на подаче 0,01 мм/ход перешел из режима работы с преимущественным и возрастающим самозатачиванием в смешанный режим работы с некоторым преобладанием затупления. Доказательством этому является рост  $P_y$  в интервале наработки 192–769  $\text{мм}^3$  на 10 % и относительная стабильность составляющей  $P_z$ . Отношение  $P_z/P_y$  на втором этапе снижается на 12 %, что согласуется с изменениями составляющих силы резания.

С увеличением твердости круга возрастает сила резания на первом этапе процесса. Начиная с наработки около  $500 \text{ мм}^3$ , составляющие силы резания для кругов различной твердости сближаются. Составляющая  $P_y$  также имеет тенденцию к росту. Но ее рост на этапе 2, в отличие от круга твердостью  $G$ , не превышает 5 %. Отношение сил на этапе 2 можно считать постоянным.

Рассмотрены закономерности изменения средних значений, составляющих силы резания, полученные за весь период шлифования, и только на этапе 2 в зависимости от условий обработки. Установлено, что обе разновидности показателей в равной степени характеризуют исследуемые процессы. В связи с этим на рис. 4 приведены средние значения показателей, рассчитанные для интервала наработки от 192 до  $769 \text{ мм}^3$ .

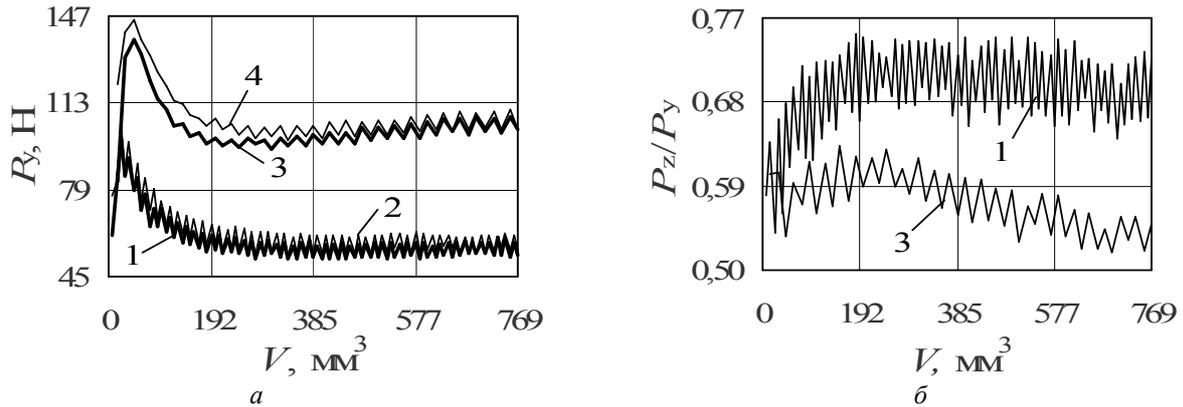


Рис. 3. Изменение составляющей силы резания  $P_y$  (а) и отношения  $P_z/P_y$  (б) в зависимости от наработки  $V$  с охлаждением СОЖ 2:

1 – 0,005 мм/ход, твердость  $G$ ; 2 – 0,005 мм/ход, твердость  $I$ ; 3 – 0,010 мм/ход, твердость  $G$ ; 4 – 0,010 мм/ход, твердость  $I$

На СОЖ 1 с увеличением подачи на глубину в два раза среднее значение радиальной составляющей силы резания  $P_{yc}$  на встречном и попутном движениях стола возрастает для круга твердостью  $G$  в 1,38-1,45 раза, твердостью  $I$  – в 1,65–1,77 раза. Составляющая  $P_{zc}$  в меньшей степени реагирует на увеличение подачи: при шлифовании кругом твердостью  $G$  возрастает на 19–27 %, твердостью  $I$  – на 42–57 % (рис. 4, а, б).

При шлифовании с СОЖ 2 увеличение подачи на глубину приводит к более существенному росту составляющих силы резания:  $P_{yc}$  на

встречной и попутной продольных подачах стола возрастают в 1,75–1,86 раза,  $P_{zc}$  – в 1,46–1,55 раза (рис. 4, в, г). Твердость круга при шлифовании с СОЖ 2 не отражается на степени влияния подачи на глубину. В обоих случаях с увеличением подачи в большей степени возрастают составляющие силы резания на попутном движении стола.

При шлифовании с СОЖ 1 с увеличением твердости круга на подаче 0,005 мм/ход составляющие силы резания  $P_{yc}$  и  $P_{zc}$  независимо от направления подачи возрастают на 9–14 %, с подачей 0,010 мм/ход – на 34–38 %.

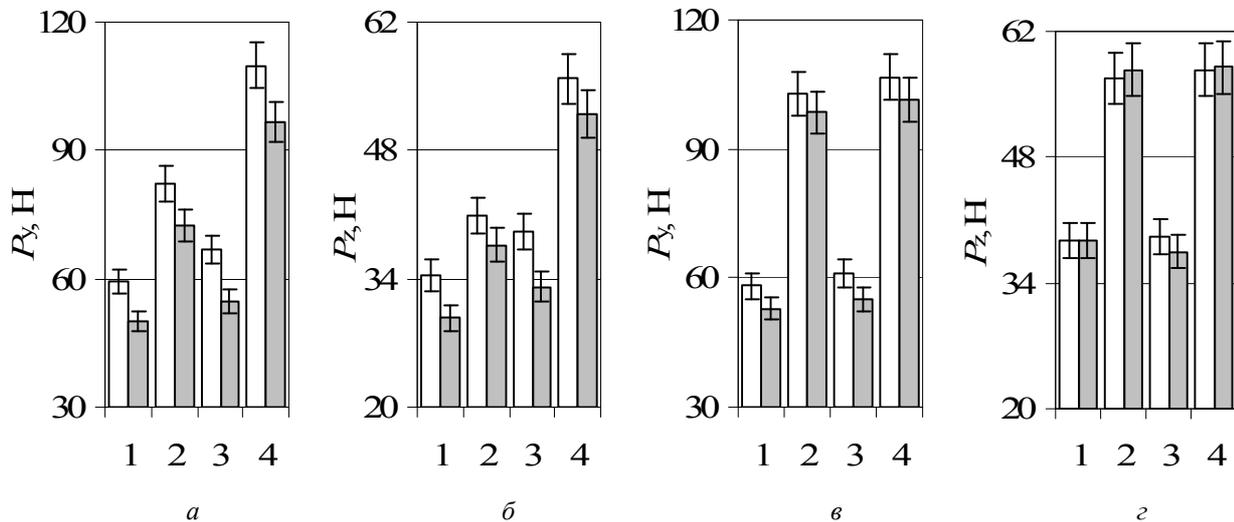


Рис. 4. Средние значения составляющих силы резания  $P_y$  (а, в) и  $P_z$  (б, г) при шлифовании с СОЖ 1 (а, б) и СОЖ 2 (в, г):

□ – встречная подача; ■ – попутная подача;  
1 – твердость  $G$ , 0,005 мм/ход; 2 – твердость  $G$ , 0,010 мм/ход;  
3 – твердость  $I$ , 0,005 мм/ход; 4 – твердость  $I$ , 0,010 мм/ход

Установлено, что наибольшее влияние направление подачи оказывает на радиальную составляющую силы резания  $P_y$ . Например, при

встречном шлифовании с СОЖ 1 среднее значение радиальной составляющей силы резания  $P_{yc}$  (нечетные ходы стола) на 13–19 % больше,

чем при попутном. Для касательной составляющей  $P_{zc}$  различие составляет 7–14 %. На СОЖ 2 различие между встречной и попутной подачами для составляющей  $P_{yc}$  снижается до 4–11 %,  $P_{zc}$  – не превышает 6 %. С увеличением подачи на глубину различия между одноименными составляющими силы резания на встречной и попутной подачах снижаются.

### Выводы

Высокопористый высокоструктурный инструмент характеристик  $64CF100G12V$  и  $64CF100I12V$  на всех рассмотренных режимах и СОЖ обеспечивает бесприжоговое шлифование.

В общем случае составляющие силы резания на встречной подаче больше, чем на попутной. С увеличением подачи на глубину и при шлифовании с СОЖ 2 различия между одноименными составляющими силы резания на встречной и попутной подачах снижаются.

С увеличением подачи на глубину в большей степени возрастает составляющая  $P_y$ . Влияние подачи на составляющие силы резания при шлифовании с СОЖ 2 увеличивается.

Увеличение твердости круга и применение более эффективной СОЖ 2 с присадкой  $Na_3PO_4$  увеличивает продолжительность этапа приработки.

При шлифовании с подачей 0,005 мм/ход шлифовальные круги работают в смешанном режиме затупления-самозатачивания близкого к равновероятному протеканию обоих процессов. С увеличением подачи в два раза круги переходят в режим преимущественного самозатачивания.

Использование СОЖ 2 с подачей 0,02 мм/ход переводит круги в режим близкий к равновероятному затуплению-самозатачиванию с некоторым преобладанием затупления.

### 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. *Давыденко, Л. В.* Титан и титановые сплавы в автомобилестроении / Л. В. Давыденко, С. Б. Белова, Р. А. Давыденко, Ю. Б. Егорова // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 10. – С. 41–42.
3. *Ушков, С. С.* Становление и развитие производства титановых полуфабрикатов для судостроения / С. С. Ушков, А. С. Кудрявцев, Э. А. Карасев // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1. – С. 68–78.
4. *Носенко, В. А.* К вопросу об интенсивности контактного взаимодействия  $d$ -переходных металлов с карбидом кремния при шлифовании / В. А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 5. – С. 78–84.
5. *Носенко, В. А.* Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В. А. Носенко, С. В. Носенко, А. В. Авиллов, В. И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 66–71.
6. *Носенко, В. А.* Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга / В. А. Носенко, С. В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 74–79.
7. *Носенко, С. В.* Влияние правки абразивного инструмента на состояние рельефа обработанной поверхности титанового сплава при встречном глубинном шлифовании / С. В. Носенко, В. А. Носенко, Л. Л. Кременецкий // Вестник машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 64–68.
8. *Носенко, В. А.* Площадь и толщина сечения срезаемого слоя на операции плоского глубинного шлифования / В. А. Носенко, В. К. Жуков, А. В. Авиллов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2006. – № 1. – С. 22–27.
9. *Носенко, В. А.* Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля / В. А. Носенко, С. В. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 4. – С. 92–98.
10. *Полегаев, В. А.* Глубинное шлифование лопаток турбин / В. А. Полегаев, Д. И. Волков // М. : Машиностроение. – 2009. – 272 с.
11. *Старков, В. К.* Повышение эффективности процессов глубинного шлифования / В. К. Старков, С. А. Рябцев, Н. А. Горин ; под ред. В. К. Старкова. – М. : МГТУ «СТАНКИН». – 2012. – 117 с.
12. *Солер, Я. И.* Повышение эффективности использования карбидкремниевых абразивных кругов при плоском шлифовании титанового сплава ВТ20 / Я. И. Солер, Май Динь Ши // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 43–55.
13. *Калинин, С. В.* Получение шероховатости высокой чистоты на поверхности штока гидроцилиндра из титанового сплава ВТ-6 / С. В. Калинин, А. О. Григарин // Сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. – Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2015. – С. 160–162.
14. *Носенко, С. В.* Влияние твердости высокопористого круга на износ инструмента и шероховатость поверхности при шлифовании титанового сплава / С. В. Носенко, В. А. Носенко, Н. Д. Сердюков, Л. Л. Кременецкий // Известия ВолГГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 14 / ВолГГТУ. – Волгоград, 2016. – С. 29–33.

УДК 621.762.4.044

*М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков, Н. И. Егоров, Н. Ю. Ветлицын***ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОДНОКОМПОНЕНТНОГО  
АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ПРЕССОВКИ АБРАЗИВНОЙ СМЕСИ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Формирование физико-механических и структурных характеристик однокомпонентного абразивного инструмента происходит на начальном этапе. В статье приведены результаты исследований по определению плотности исходной формовочной смеси после вибрационного уплотнения и плотности прессовки, подвергнутой ударному прессованию.

*Ключевые слова:* однокомпонентный абразивный инструмент, формирование структуры, электрокорунд белый, карбид бора, прессовка.

The formation of physical-mechanical and structural characteristics of a one-component abrasive tool is performed at the initial stage. The article presents the results of studies to determine the density of the initial molding mixture after vibration compaction, and the density of the compact after impact pressing.

*Keywords:* the unicomponent abrasive tool, structure formation, electrocorundum white, boron carbide, pressing.

При изготовлении стандартного абразивного инструмента на бакелитовой, керамической, вулканитовой и других видах связки одной из главных задач при приготовлении формовочной смеси, содержащей компоненты связки, абразивные материалы и порообразователи, является равномерное распределение всех составляющих по всему объему прессформы. Это достигается тщательным перемешиванием всей формовочной смеси. Это приводит к тому, что после прессования и спекания абразивный инструмент получает равномерное распределение режущих зерен и пор по всему объему. Инструмент с такой структурой обладает повышенной режущей способностью и износостойкостью. Кроме того, использование такого инструмента при изготовлении ответственных деталей изделий, работающих при высоких нагрузках и повышенных температурах, позволяет выдерживать заданные параметры качества поверхностного слоя, в частности шероховатость поверхности, глубину и степень наклепа, остаточные напряжения [1].

При изготовлении однокомпонентных абразивных инструментов (ОКАИ) [2] задача по обеспечению равномерности распределения абразивных зерен и пор также является одной из главных задач при формировании их структуры на этапе приготовления абразивной смеси.

Но если при создании формовочной смеси для изготовления стандартного абразивного инструмента достаточно только тщательного перемешивания всех составляющих, то изготовление ОКАИ имеет ряд особенностей. По-

скольку абразивная смесь в дальнейшем подвергается ударному прессованию на электрогидравлическом прессе Т1226, который является усовершенствованной моделью прессы «Удар-20» [3], то процесс уплотнения происходит за время  $10^{-4}$  с, воздух из формовочной абразивной смеси не успевает полностью выйти из пор, если используется только смесь абразивных материалов свободным насыпом, т. е. такой критерий, как насыпная плотность, не может быть использован, как в создании формовочной смеси стандартного абразивного инструмента. С целью максимального удаления воздуха из пор абразивной смеси необходимо использовать виброуплотнение такой смеси. В этом случае максимально удаленный из пор воздух позволяет получить структуру прессовки, близко приближенной к прогнозируемой, получаемой при дальнейшем спекании для получения определенных физико-механических характеристик ОКАИ.

Были проведены исследования по определению плотности абразивной смеси, состоящей из 90 % порошка окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ) и 10 % карбида бора ( $B_4C$ ), используемой при изготовлении ОКАИ по способу [2]. Плотность формовочной смеси после виброуплотнения определялась обычным способом, а плотность прессовки после ударно-волнового нагружения – методом гидростатического взвешивания [4].

Авторами были проведены исследования по определению плотности абразивной смеси после виброуплотнения, состоящей из 90 % окиси алюминия и 10 % карбида бора в зависимости

от размеров зерен основной фракции, причем размеры зерен карбида бора – дополнительной фракции брали в 2 раза меньше размера зерен окиси алюминия. Результаты исследования представлены на рис. 1.

Обработка экспериментальных данных по методике [5] позволила получить зависимость плотности от размеров зерен (1):

$$\rho_{\text{см}} = 1955 \cdot N^{0,0055}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{см}}$  – плотность абразивной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $N$  – размер зерен основной фракции, мкм.

Полученная зависимость, представленная на рис. 1, позволяет сделать следующий вывод. Даже виброуплотнение не дает возможности войти в пространство между зернами, заполненным воздухом, более крупным зернам, поэтому амплитуда и частота колебаний при виброуплотнении позволяет лишь частично освободить исходную формовочную смесь от воздуха в порах и максимально сблизить абразивные зерна перед последующим ударным прессованием.

Были также проведены авторами исследования по определению плотности прессовки после ударно-волнового нагружения вышеуказанной абразивной смеси.

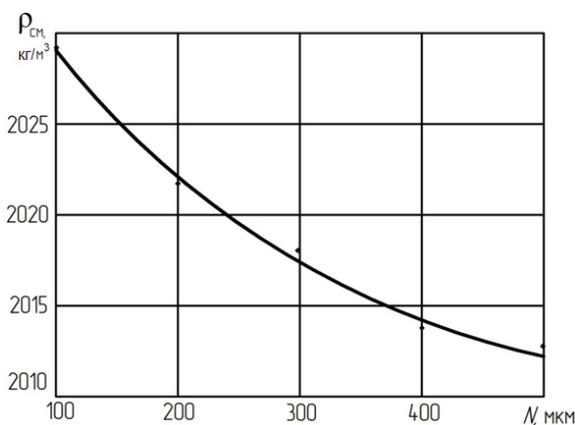


Рис. 1. График зависимости плотности абразивной смеси 90 %  $Al_2O_3$  + 10 %  $B_4C$  после виброуплотнения в зависимости от размеров зерен основной фракции

На рис. 2 представлена зависимость плотности прессовки в зависимости от давления во фронте ударной волны при прессовании абразивной смеси после ее виброуплотнения.

По результатам проведенных исследований также была получена зависимость (2):

$$\rho_{\text{пр}} = 1996 \cdot P_{\text{ув}}^{0,006}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{пр}}$  – плотность прессовки, кг/м<sup>3</sup>;  $P_{\text{ув}}$  – давление во фронте ударной волны, ГПа.

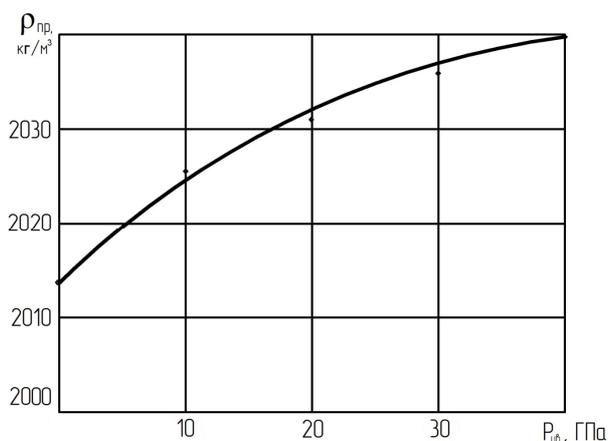


Рис. 2. График зависимости плотности прессовки ( $\rho_{\text{пр}}$ ) абразивной смеси 90 %  $Al_2O_3$  + 10 %  $B_4C$  от давления во фронте ударной волны ( $P_{\text{ув}}$ )

Анализируя зависимость, представленную на рис. 2, можно утверждать, что под действием ударной волны зерна абразивных материалов дробятся, входят в поры между ними, вытесняя воздух (хоть и не до конца, поскольку процесс прессования очень короткий и происходит в закрытой прессформе, имеющей незначительные зазоры между ее деталями). Вследствие этого происходит уплотнение исходной формовочной абразивной смеси.

Результаты проведенных исследований позволяют прогнозировать структурное состояние исследуемой абразивной смеси после высокотемпературного спекания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безъязычный, В. Ф. Проблемы совершенствования технологических процессов механической обработки деталей высокоточных узлов и изделий / В. Ф. Безъязычный // Приложение. Справочник. Инженерный журнал. – № 7. – 2003. – С. 2–11.
2. Патент РФ 2543024 МПК В24Д 18/00 Способ изготовления абразивных изделий / Ю. Н. Полянчиков, М. Ю. Полянчикова; опубл. 27.02.2015 г., Бюлл. № 6.
3. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / под ред. Г. А. Гулого. – М.: Машиностроение. – 1977. – 317 с.
4. Физический энциклопедический словарь / гл. редактор А. М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
5. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.

УДК 621.9.01

Ю. Л. Чигиринский, П. С. Нестеренко

**К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ  
ДЕТАЛЕЙ ТИПА НЕЖЕСТКИЙ ВАЛ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

В статье рассмотрен механизм формирования погрешности обработки, вызываемой деформациями элементов технологической системы при токарной обработке. Предложена математическая зависимость, применимая в системах адаптивного управления в качестве математического аппарата для управления траекторией движения режущего инструмента в процессе обработки с целью обеспечения заданной точности продольного профиля обработанных деталей.

*Ключевые слова:* погрешность обработки, погрешность продольного профиля, нежесткий вал, управление траекторией движения режущего инструмента.

In article the mechanism of formation of processing error, caused by deformations of the elements of the technological system during turning is considered. A mathematical dependence applicable in systems of adaptive control systems as a mathematical apparatus for controlling the trajectory of a cutting tool during processing for the purpose of ensuring the given accuracy of a longitudinal profile of the processed details is offered.

*Keywords:* processing error, the error of the longitudinal profile, non-rigid shaft, control of the trajectory of the cutting tool.

Детали типа нежесткий вал на сегодняшний день наши широкое распространение в машиностроении. При этом для деталей данного класса помимо размерной точности имеет огромное значение и точность их продольного профиля. Детали данного типа работают в тяжелых условиях знакопеременной нагрузки, и даже весьма малая неточность при изготовлении приводит к их разбалансировке, что существенно сказывается на работоспособности всего изделия в целом.

Рассмотрим процесс формирования погрешности продольного профиля на примере токарной обработки с креплением в центрах.

Данный вид крепления широко распространен в машиностроении на операциях точения и шлифования, т. к. обеспечивает наиболее высокую точность при минимальных затратах времени на установку.

Вал, установленный в центрах, представляет собой балку, свободно опирающуюся своими концами. На рис. 1 показана схема в базировании и схема распределения сил, действующих в процессе обработки. Под действием составляющих силы резания в процессе обработки элементы технологической системы смещаются из ненагруженного состояния, вызывая тем самым взаимное смещение инструмента и заготовки.

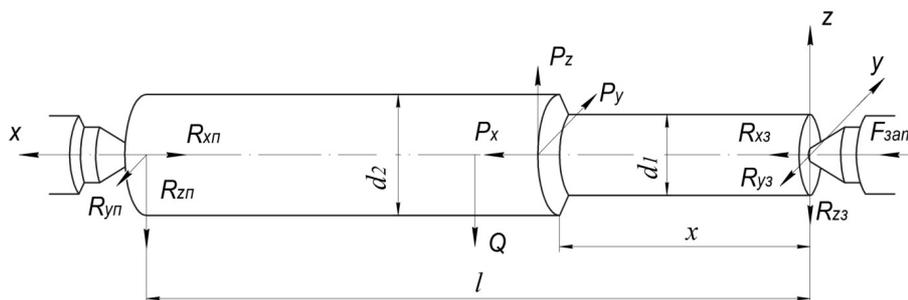


Рис. 1. Схема распределения сил, действующих в процессе обработки

Непосредственное влияние на точность обработки оказывают упругие деформации системы в радиальном направлении, обусловленные, прежде всего, действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и отчасти осевой

составляющей  $P_x$ . Однако, изгиб оси вала, вызываемый действием момента, возникающего под действием силы  $P_x$  приложенной на расстоянии  $r$  от оси детали, может иметь существенное значение лишь при весьма тонких валах

( $d < 20$  мм) и больших величинах отношений длины к диаметру (15–20), поэтому его влиянием на точность обработки можно пренебречь [3]. Влияние тангенсальной составляющей  $P_z$  на точность обработки также незначительно [2]. Таким образом, существенное влияние на горизонтально-радиальное положение оси вала относительно режущей кромки инструмента влияние оказывают: изгиб оси вала, смещение линии центров и отжатие суппорта, вызванные действием силы  $P_y$ .

Определяя деформации системы, вызываемые действием радиальной составляющей силы  $P_y$ , будем считать узлы станка абсолютно жесткими. Тогда на точности обработки будет сказываться лишь изгиб самого вала  $y_{1i}$ , величина которого, согласно принятой в технологии машиностроения формуле, выразится:

$$y_{1i} = \frac{P_y x^5}{3E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{P_y}{EI_2} \left[ \left( \frac{l^3 - x^3}{3} \right) \left( 1 - \frac{x}{l} \right)^2 - 2 \left( \frac{l^2 - x^2}{2} \right) \left( x - \frac{x^2}{l} \right) + x^2 (l - x) \right]. \quad (2)$$

где  $I_1$  – момент инерции поперечного сечения обработанной ступени;  $I_2$  – момент инерции поперечного сечения обрабатываемой ступени.

Разница при определении величины прогиба по формулам (1) и (2) при величине припуска, равной  $0,25d_2$  достигает 50 %, что существенно сказывается на точности расчетов.

Если бы не было других погрешностей или ими можно было бы пренебречь, то формула (2) могла бы быть использована для определения погрешности обработки. Однако кроме это-

$$y_{1i} = P_y \varepsilon_{1i} = P_y \frac{x^2(l-x)^2}{3EI_1}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{1i}$  – податливость заготовки в рассматриваемом сечении;  $I$  – момент инерции поперечного сечения;  $E$  – модуль упругости второго рода;  $x$  – координата поперечного сечения, в котором определяется смещение;  $l$  – длина обрабатываемой заготовки.

Вследствие переменного по мере обработки значения величины податливости, в продольном сечении вал будет иметь бочкообразную форму.

Формула (1) достаточно точно отражает прогиб гладкого вала после обработки. Однако непосредственно в процессе обработки гладкий вал становится двухступенчатым с непрерывно изменяющимся соотношением длин ступеней и величина его прогиба  $y_{1i}$ , согласно [1], может быть определена по следующей зависимости:

го под действием силы  $P_y$  упруго отжимаются центры станков и по снятии нагрузки возвращаются в свое первоначальное положение (рис. 2). В начальном положении резца задний центр под действием силы  $P_y$  перемещается на величину  $y_3$ , при этом передний центр, будет находиться в покое ( $y_{II} = 0$ ). По мере перемещения резца к передней бабке отжатие заднего центра уменьшается до нуля, а отжатие переднего центра возрастает и достигает своего максимума при крайнем левом положении резца.

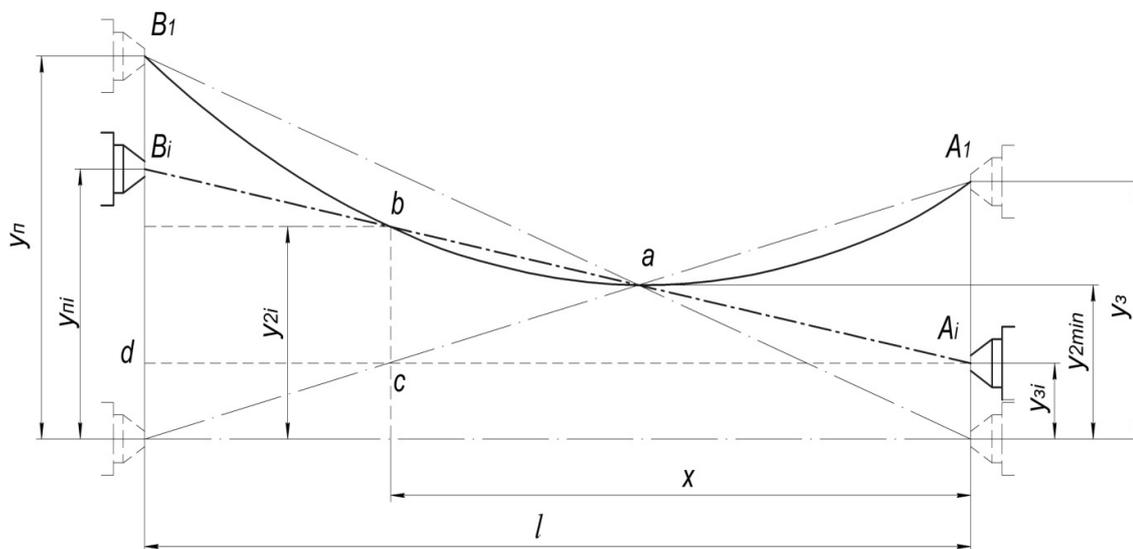


Рис. 2. Графическое определение продольной погрешности станка

Кривая  $A_1aB_1$ , выражает собой искаженный профиль оси вала. Прямая  $A_iB_i$ , соединяющая отложенные отжатия центров при расположении резца на расстоянии  $i$  от заднего центра, является осью смещенного вала. Пересечение линии  $A_iB_i$  с осью резца дает точку  $b$ , ордината которой  $y_{2i}$  выражает собой увеличение радиуса вала в данном поперечном сечении. Из подобия треугольников  $A_iCb$  и  $A_idB_i$  вытекает:

$$\frac{x}{l} = \frac{y_{2i} - y_{3i}}{y_{ni} - y_{3i}} \quad (3)$$

Откуда

$$y_{2i} = \left(1 - \frac{x}{l}\right)y_{3i} + \frac{x}{l}y_{ni} \quad (4)$$

Исходя из уравнений статики с учетом вышесказанного определим усилия, действующие на передний  $R_{пу}$  и задний  $R_{зу}$  центры станка:

$$\begin{aligned} R_{пу} &= P_y \frac{x}{l}; \\ R_{зу} &= P_y \left(1 - \frac{x}{l}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

Так как деформация бабок прямо пропорциональна нагрузкам, то:

$$\begin{aligned} y_{3i} &= R_{уз} \varepsilon_3; \\ y_{ni} &= R_{уп} \varepsilon_{п}. \end{aligned} \quad (6)$$

Откуда

$$\begin{aligned} y_i = y_{1i} + y_{2i} + y_{3i} &= \frac{P_y x^5}{3E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{P_y}{EI_2} \left[ \left( \frac{l^3 - x^3}{3} \right) \left( 1 - \frac{x}{l} \right)^2 - 2 \left( \frac{l^2 - x^2}{2} \right) \left( x - \frac{x^2}{l} \right) + x^2 (l - x) \right] + \\ &+ P_y \left[ \left( 1 - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left( \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{п} \right] + P_y \times \varepsilon_c. \end{aligned} \quad (10)$$

Формула (10) может быть использована в системах адаптивного управления в качестве математического аппарата для управления траекторией движения режущего инструмента в процессе обработки, что позволит обеспечить заданную точность продольного профиля обработанных деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балакшин, Б. С. Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.

$$\begin{aligned} y_{3i} &= P_y \left(1 - \frac{x}{l}\right) \varepsilon_3; \\ y_{ni} &= P_y \frac{x}{l} \varepsilon_{п}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив значения отжатий бабок в выражение (4), мы и получим уравнение линии профиля вала:

$$y_{2i} = P_y \left[ \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \varepsilon_{п} \right]. \quad (8)$$

Таким образом, упругие отжатия бабок вызывают непрерывные изменения положения оси вала, вследствие чего возникнет погрешность обработки в виде корсетности.

Что касается деформации суппорта под действием силы  $P_y$ , так как его податливость  $\varepsilon_c$  постоянна на всей длине обработки, то при условии постоянства силы  $P_y$ , его отжатие также постоянно на всей длине обточки и равно:

$$y_{3i} = P_y \varepsilon_c. \quad (9)$$

Таким образом, деформации суппорта не вызывают появления продольной погрешности формы обтачиваемого вала, однако диаметр его увеличится на величину  $2y_c$ .

Окончательно формула для расчета упругой деформации технологической при токарной обработке нежесткого вала центрах примет вид:

2. Допуск формы как эквивалент величины прогиба детали в подсистеме обеспечения точности токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов // Сб. науч. тр. SWorld. – 2014. – Вып. 4, том 6. – С. 53–58.

3. Подпоркин, В. Г. Обработка нежестких деталей / В. Г. Подпоркин. – М.; Л. : Машгиз, 1959. – 208 с.

4. Чигиринский, Ю. Л. Повышение эффективности токарной обработки нежестких деталей за счет применения системы адаптивного управления / Ю. Л. Чигиринский, П. С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 36–39.

УДК 621.774

*В. А. Санинский, В. Н. Тышкевич, А. А. Александров***КОМПЛЕКТОВАНИЕ МНОГОМЕСТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ  
ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
ДЛИННОМЕРНЫХ ТРУБ****Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**

E-mail: techmash@vstu.ru

В статье изложена методика расчета радиальных зазоров в продольном сечении пакета длинномерных соосно закрепленных трубных заготовок при их гидроабразивной обработке (ГАО). Приведен расчет суммарного прогиба от веса труб, абразивной суспензии, выталкивающей (архимедовой) силы с целью обоснования возможности комплектования многоместного приспособления для одновременной ГАО наружных и внутренних поверхностей. Методика направлена на достижение повышенных показателей по производительности, качеству и экономичности механической обработки длинномерных труб.

*Ключевые слова:* комплектование, многоместное приспособление, гидроабразивная обработка труб, расчет прогиба, осевой момент инерции.

The paper sets out the methodology of calculation of the radial clearance in the longitudinal section of a package of long coaxially fixed tubular billets in their waterjet processing (GAO) .. The calculation of the total deflection of the weight of the pipe, the abrasive slurry, the buoyancy (Archimedes) force to study the possibility of acquisition bench devices for simultaneous GAO exterior and interior surfaces. The technique aims to achieve higher performance for productivity, quality and efficiency of machining of long tubes.

*Keywords:* acquisition, bench tool, waterjet processing pipes, calculation of deflection, axial moment of inertia.

В ВПИ (филиал) ВолгГТУ разработан метод гидроабразивной обработки (ГАО) [1–5] для снятия окалины перед нанесением антикоррозионного покрытия, путем одновременного шлифования наружных и внутренних поверхностей длинномерных труб гидроабразивной средой с получением на их поверхностях параметров шероховатости  $Ra\ 0,16–1,25\ \mu\text{m}$ .

Для достижения поставленной цели по обработке принципиальную схему устройства для обработки труб свободными абразивами необходимо было рассчитать радиальные зазоры между трубами стандартной номенклатуры, имеющих нормированную овальность и криволинейность отверстий и прогиб под собственным весом и весом гидроабразивной среды в рабочих зазорах пакета.

Предлагаемое устройство (рис. 1) включает камеру ГАО, образованную пакетом длинномерных труб и резервуар для гидроабразивной среды [5].

В данном устройстве каждая трубная заготовка меньшего диаметра базируется соосно в отверстии трубной заготовки большего диаметра, прижимается и фиксируется с помощью фланцев. Во фланцах выполнены каналы, при этом полости между трубными заготовками сообщаются, что позволяет гидроабразивной сре-

де заполнить все пространство камеры ГАО. Количество центрирующих выточек на каждом фланце равно количеству обрабатываемых трубных заготовок. Камеру ГАО образуют не менее трех трубных заготовок разного диаметра. Это позволяет осуществлять одновременную обработку наружных и внутренних поверхностей трубных заготовок меньшего диаметра и внутренней поверхности трубной заготовки максимального диаметра (наружной трубной заготовки) одним потоком гидроабразивной среды.

На рис. 1 показано продольное сечение устройства для гидроабразивной обработки внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок.

Устройство работает следующим образом (рис. 1).

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

трубных заготовок. Сухари 9 под действием пружин 10 фиксируют трубные заготовки с образованием камеры гидроабразивной обработки 11. При включении насоса 20 гидроабразивная среда 19 из резервуара 21 под давлением  $P$  подается по напорному трубопроводу 14 через сквозное отверстие 13 в трубную заготовку минимального диаметра (внутренняя труба 6), далее по каналу 15 в следующую по диаметру трубную заготовку (промежуточная труба 7), откуда по каналам 18 поступает в трубную заготовку максимального диаметра (наружная труба 8), через сквозное отверстие 16 в сливной трубопровод 17 и в резервуар 21.

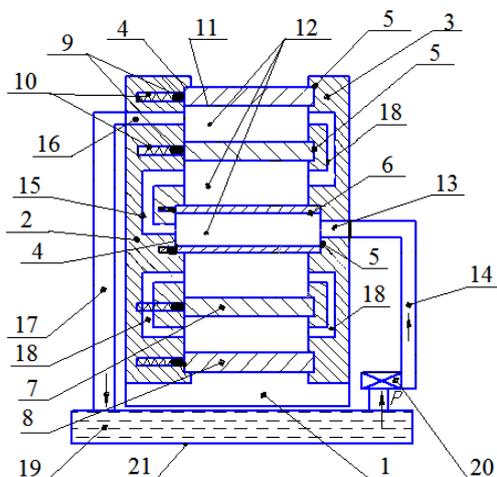


Рис. 1. Устройство для гидроабразивной обработки внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок [5]

При этом заполняются все сообщающиеся полости 12, и происходит гидроабразивная обработка внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок минимального и промежуточных диаметров (внутренняя труба 6 и промежуточная труба 7) и обработка внутренней поверхности трубной заготовки максимального диаметра (наружная труба 8). По окончании гидроабразивной обработки поверхностей, насос 20 отключают и извлекают обработанные трубные заготовки.

Параметры обработки: абразивный материал электрокорунд 24А зернистости М20; М40; М63; 8; 10; К=20 %;  $p_n = 0,1...0,5$  МПа;  $L=50...150$  мм;  $\alpha = 15...90^\circ$ ;  $T = 0...300$  с.

$$A_i = \frac{((D_{i+1} + ESD_{i+1}) - (D_i + EID_i) - 2(S_{\max i+1} + ESS_{i+1}) - 2\Delta\Phi_{i+1})}{2},$$

где  $A_i$  – расстояние между смежными поверхностями соседних трубных заготовок;  $D_{i+1}$  –

Интенсивность формирования микрорельефа поверхности при струйной ГАО зависит от количества абразивных частиц, воздействующих на единицу обрабатываемой площади в единицу времени. При прочих равных условиях увеличение площади будет приводить к увеличению времени, необходимого для достижения заданного значения шероховатости.

Для расчета радиальных зазоров необходимы следующие данные (табл. 1):

- 1) диаметры наружной поверхности каждой трубы и предельные отклонения на них;
- 2) толщины стенок труб и предельные отклонения на них.

Согласно стандартам на трубы [6–7], параметр  $S_{i+1}$  (рис. 2) может принимать определенные значения согласно неравенству:  $S_{\min i+1} \leq S_{i+1} \leq S_{\max i+1}$ , т. е. толщина стенки изменяется от минимальной до максимальной. Следовательно, в конструируемой установке важно найти минимальное значение параметра  $A_i$  (при максимальной ширине стенки –  $S_{\max}$ ), при котором гидроабразивная обработка была бы возможной (рис. 2). Кроме того, необходимо учесть в расчетной схеме овальность отверстий и криволинейность осей, т. е. погрешность их формы.

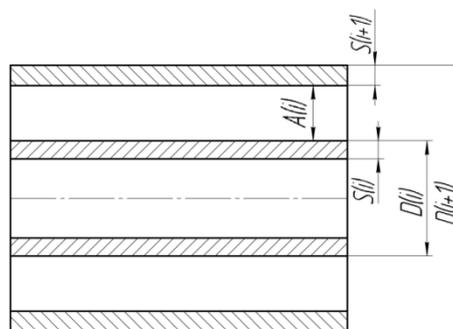


Рис. 2. Расчетная схема зазоров соосно установленных стандартных труб

Обозначив суммарную погрешность формы трубы в продольном направлении  $\Delta\Phi$  (рис. 3), получим следующую формулу для расчета минимальных расстояний между смежными трубами:

$D_{i+1}$  – диаметр трубной заготовки большего диаметра;  $ESD_{i+1}$  – верхнее предельное отклонение на

диаметр  $D_{i+1}$ ;  $D_i$  – диаметр трубной заготовки меньшего диаметра;  $EID_i$  – нижнее предельное отклонение на диаметр  $D_i$ ;  $S_{\max i+1}$  – максимальная толщина стенки трубной заготовки большего диаметра;  $ESS_{i+1}$  – верхнее предельное отклонение на толщину стенки  $S_{\max i+1}$ .

Значения минимальных расстояний между смежными поверхностями соседних пакета при использовании трубных заготовок с номинальными размерами диаметров труб по стандарту [7] приведены в табл. 1 (рис. 2).

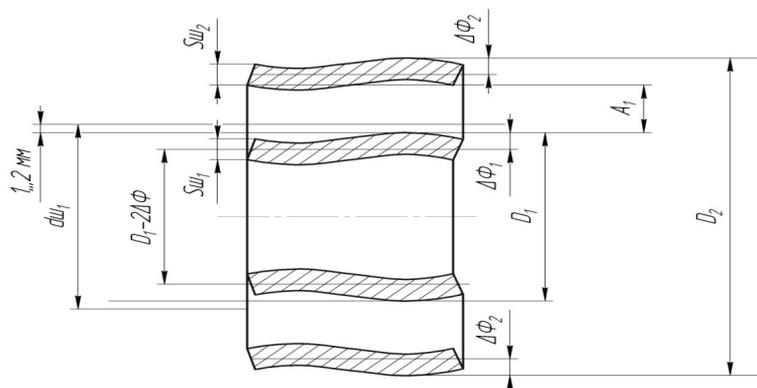


Рис. 3. Расчетная схема для определения расстояния между смежными поверхностями соседних трубных заготовок с учетом погрешности их формы  $\Delta\Phi$

Таблица 1

Расчетные значения радиальных зазоров по размерам диаметров труб

Диаметр $D$ , мм	Предельные отклонения, мм		Толщина стенки $S_{\max}$ , мм	Отклонение на толщину стенки, мм	$A_i$ , мм
	$ESD$	$EID$			
530	+3	-3	12	+1	–
630			40		
720			35		
820			39		
920			40		
1020			36		
1220			87		
1420			86		

Устройство позволяет обрабатывать лишь такой сортament труб, у которого  $D_{i+1} - D_i > S_{i+1}$ , чтобы обеспечить возможность «вкладывания» смежных трубных заготовок друг в друга (рис. 2) [6–8].

Система нормирования отклонений формы поверхностей деталей допускает овальность отверстия труб в пределах допуска на размер, т. е. ( $\pm 0,4 \dots \pm 1,3$ ), по разрешению заказчика (по техническим соглашениям)  $\pm 2$  мм.

Величина радиальных зазоров должна быть достаточной для обеспечения возможности «вкладывания» труб друг в друга для сборки стандартного пакета труб. Для окончательного решения о возможности применения многоме-

стного приспособления для ГАО стандартного пакета труб, необходимо также учесть влияние на величину зазоров прогиба от собственного веса труб и веса абразивной суспензии, проходящей по трубам во время обработки

Для расчета максимального прогиба принята расчетная схема шарнирно опертой балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой от действия собственного веса трубы ( $q_T$ ), веса абразивной суспензии ( $q_C$ ), выталкивающей силы ( $q_B$ ) (рис. 4). Формула для расчета максимального прогиба [9]:

$$f = \frac{5ql^4}{384 \cdot EI},$$

где  $l$  – длина трубы;  $I$  – осевой момент инерции

поперечного сечения трубы;  $E$  – модуль продольной упругости материала трубы.

В расчетах принято: плотность стали  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ , модуль Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , длина труб  $l = 12 \text{ м}$ .

Базовое объемное процентное содержание суспензии принимали по анализу патентной информации [10] – 15 %. Объемное содержание абразивных частиц в суспензии обычно подбирается опытным путем. Рекомендуется объемная концентрация абразивных частиц в суспензии 20–30 % [11].

В нашем случае путь абразива до выхода из контакта с обрабатываемыми поверхностями достаточно длинный и возможен значительный износ абразивных частиц. Поэтому, вводится характеристика – коэффициент запаса на износ частиц абразива  $K_{зич}$ , зависящий от действительного значения длины пути резания (ориентировочно принят равным 1,5). Получаем объемный процент абразива для нашего случая обработки:

$$\% \text{ абр} = \% \text{ баз} \cdot K_{зич} = 15 \cdot 1,5 = 22,5 \%$$

Объем суспензии равен объему пространства между трубами:

$$V_{\text{сус}} = S_{\text{сеч}} \cdot l,$$

где площадь сечения для прохождения суспензии для внутренней трубы:

$$S_{\text{сеч}} = \pi S \cdot (D - S);$$

для промежуточных и наружной труб:

$$S_{\text{сеч}} = \pi A \cdot (D - 2S - A);$$

$D$  – наружный диаметр трубы,  $A$  – зазор между трубами;  $S$  – толщина стенки.

Объем абразива:  $V_{\text{абр}} = V_{\text{сус}} \cdot \% \text{ абр} / 100$ .

Объем воды:  $V_{\text{воды}} = V_{\text{сус}} - V_{\text{абр}}$ .

Плотность абразива  $\rho_{\text{абр}} = 3,2 \text{ г/см}^3$  (соответствует плотности электрокорунда). Плотность воды  $\rho_{\text{воды}} = 1 \text{ г/см}^3$ .

Плотность суспензии  $\rho_c = 1,495 \text{ г/см}^3$ .

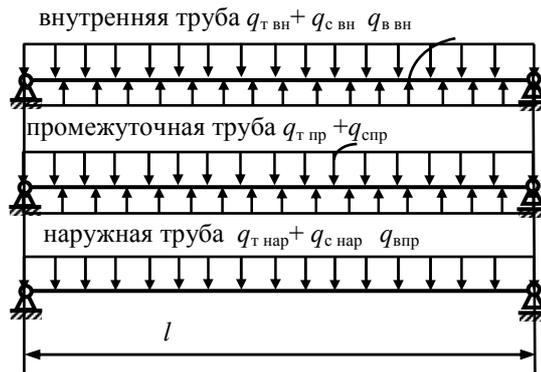


Рис. 4. Расчетные схемы нагрузок на пакет труб в многоступенчатом приспособлении:

$q_{т нар}$ ,  $q_{т пр}$ ,  $q_{т вн}$  – равномерно распределенные нагрузки от действия собственного веса наружной, промежуточной и внутренней труб;  $q_{с нар}$ ,  $q_{спр}$ ,  $q_{с вн}$  – равномерно распределенные нагрузки от действия собственного веса суспензии на наружную, промежуточную и внутреннюю трубы;  $q_{в нар}$ ,  $q_{в вн}$  – равномерно распределенные нагрузки от действия выталкивающей силы на промежуточную и внутреннюю трубы

Интенсивность равномерно распределенных нагрузок вычисляется по формулам:

– от веса труб  $q_t = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot (D-S) \cdot S$ ;

– от веса суспензии  $q_c = \rho_c \cdot g \cdot S_{\text{сеч}}$ ;

– от выталкивающей силы  $q_{\text{выт}} = \rho_c \cdot g \cdot \pi \times (D-S) \cdot S$ ;

Результаты расчета прогиба труб от действия собственного веса труб ( $f_t$ ) и веса абразивной суспензии с учетом выталкивающей силы ( $f_c$ ) приведены в табл. 2.

Полученные ранее величины радиальных зазоров  $A_i$  (см. табл. 1) уменьшаются на разности суммарных прогибов от действия собственного веса труб и суспензии наружной ( $i + 1$ ) и внутренней труб ( $i$ ) по формуле:

$$A_{\text{итог}} = A_i - |f_{\text{сумм}i} - f_{\text{сумм}i+1}|.$$

Аналогично подсчитан окончательный зазор при сборке пакета от действия только собственного веса труб:

$$A_{\text{итог без сусп}} = A_i - |f_{ti} - f_{t i+1}|.$$

Результаты расчета величин окончательных зазоров  $A_{\text{итог}}$  представлены в табл. 3.

Таблица 2

Расчетные значения максимальных прогибов труб

$D$ , см	$S$ , см	$l$ , м	$q_t$ от веса трубы, Н/м	$q_c$ от веса суспензии, Н/м	$q_{\text{выт}}$ от выталкивающей силы, Н/м	Макс. прогиб от веса трубы $f_t$ , мм	Макс. прогиб от веса суспензии и выт. Силы $f_c$ , мм
53	1,2	0,0007	1493	2949	286	3,08	5,14
63	1,2	0,0011	1781	1043	342	2,16	0,86
72	1,2	0,0017	2040	1066	391	1,65	0,536
82	1,3	0,0027	2519	1357	483	1,27	0,437
92	1,2	0,0035	2617	1578	502	1,00	0,415
102	1,6	0,0064	3858	1579	740	0,82	0,177
122	1,5	0,0103	4341	4421	833	0,57	0,115
142	1,6	0,0174	5395	5159	–	0,42	0,4

Таблица 3

## Результаты расчета суммарного прогиба, разности прогибов и скорректированного радиального зазора

$A_i$ , мм	$f_{ii} - f_{i+1}$ , мм	$A_{ИТОГ}$ без сущ., мм	$f_{сумм}$ , мм	$f_{сумми} - f_{сумми+1}$ , мм	$A_{ИТОГ}$ , мм
–	–	–	8,22	–	–
40	0,92	39,08	3,02	5,2	34,8
35	0,51	34,49	2,19	0,83	34,2
39	0,38	38,62	1,71	0,483	38,5
40	0,27	39,73	1,42	0,292	39,7
36	0,18	35,82	0,997	0,418	35,6
87	0,25	86,75	0,685	0,312	86,7
86	0,15	85,85	0,820	-0,135	85,9

Результаты расчетов стандартных труб номенклатуры ОАО ВТЗ показывают, что конструкция многоместного устройства для ГАО трубных заготовок [5] позволяет осуществить комплектование длинномерных труб с нормированными геометрическими отклонениями путем «вкладывания» их друг в друга в пакет с обеспечением достаточного образующегося зазора (полости) для прохождения гидроабразивной среды между обрабатываемыми ею поверхностями

Применение данного устройства позволит повысить производительность за счет одновременной обработки поверхностей труб нескольких типоразмеров и сократить занимаемые производственные площади за счет базирования трубных заготовок в один компактный пакет.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ №11128, МПК В24С3/22, опубл. 16.09.1999.
2. Патент РФ №2274540, МПК В24С3/16, опубл. 20.04.2006.
3. Патент РФ №2108903, МПК В24С5/04, В24С3/16, опубл. 20.04.1998.
4. А.с. СССР №180109, МПК В24С3/12, опубл. 28.11.1966.
5. Пат. Ru 152429, МПК В24С3/02, В24С9/00, Носенко В. А., Санинский В. А. Александров А. А. Устройство для гидроабразивной обработки (опубл. 27.05.2015. Заявка № 2014141216 (066806) от 13.10.2014).
6. ГОСТ 8696–74. Трубы стальные электросварные со спиральным швом общего назначения. Технические условия.
7. ГОСТ Р 52079–2003 Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия.
8. ГОСТ Р 53383–2009 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические условия.
9. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук, думка, 1988. – 736 с.
10. А.с. № 1537683. Состав для гидроабразивной обработки и полирования прецизионных деталей / А. Н. Тарасов, М. И. Шаламов, В. Л. Гончаренко, В. А. Панфилов; Опубл. 23.01.90, Бюл. № 3.
11. [http://gidroabraziv.com/spetsialistam\\_predpriyatij\\_o\\_gidroabrazivnoy\\_tehnologii/nn](http://gidroabraziv.com/spetsialistam_predpriyatij_o_gidroabrazivnoy_tehnologii/nn)

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.165.29

*В. Г. Барабанов, Е. А. Харькова*

### РАЗРАБОТКА СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНЫХ ГАЗОВЫХ КРАНОВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрены проблемы автоматизации контроля герметичности запорных газовых кранов. Приведены схемы автоматизации контроля герметичности запорных кранов по манометрическому методу.

*Ключевые слова:* контроль герметичности, запорный кран, манометрический метод.

Problems of automation of shifting gas valves hermeticity control are considered. Schemes of shifting valves hermeticity control automation by manometric method are given.

*Keywords:* hermeticity control, shifting valve, manometric method.

Для обеспечения надежности функционирования бытовой газовой техники необходим контроль параметров ее основных узлов на всех стадиях производства. В крупносерийном и массовом производстве это обеспечивается выбором точных, надежных, легко автоматизируемых методов и средств контроля и рациональной схемой автоматизации контрольно-испытательных операций, которые должны обеспечить необходимое повышение производительности. В реальных, производственных условиях решение этой проблемы часто осложняется применением методов контроля, которые трудно поддаются автоматизации из-за сложности или специфики аппаратуры. Так при контроле герметичности запорного крана, одного из узлов газовой плиты применяется метод «аквариума», по которому индикация утечек осуществляется по частоте появления и диаметру пузырьков газа, возникающих при негерметичности изделия, погруженного в ванну с водой и находящегося под давлением сжатого воздуха. Промышленное применение, метода объясняется простотой и удовлетворительной чувствительностью. Однако достоверность и надежность метода во многом зависит от субъективных способностей и добросовестности контроллера-оператора. Применение ав-

томатического счета пузырьков [1] повышает надежность контроля, но не решает задачу повышения производительности операции при значительном удорожании испытательного оборудования.

Кроме рассмотренных проблем с применением метода «аквариума» серьезные ограничения на выбор методов и построение схем автоматизации контроля герметичности накладывают особенности конструкции запорного крана: наличие двух смежных рабочих полостей и подвижных элементов; применение вязкого уплотнения, что требует низкого испытательного давления (не более 15 кПа); невозможность использования в качестве индикаторной среды рабочего газа; а также требование по продолжительности испытания не более 120 с.

Анализ особенностей и основных характеристик известных методов контроля герметичности позволяет принять для испытания запорных кранов манометрический метод, заключающийся в измерении падения давления в испытуемом объекте, пропорционально утечке индикаторной среды в течение данного времени [2, 4, 9, 12]. Для разработки схем автоматизации контроля герметичности запорных газовых кранов по манометрическому методу введем следующие определения и понятия [1].

1. Автоматический контроль герметичности запорного крана – это и неразрушающее испытание его конструкции, осуществляемое в автоматическом режиме и включающее вспомогательную операцию фиксирующего уплотнения изделия, а также – основную операцию, состоящую в косвенной оценке утечки индикаторной среды через неплотность конструкции по падению давлению полости крана и последующего сравнения с допустимой утечкой, учитывающей параметры рабочего газа, с целью использования результата испытаний для сортировки изделий по параметру «герметичность» на годные и брак.

2. Под утечкой при контроле герметичности запорного крана понимается количество индикаторного газа в объемных единицах, проходящего через дефекты уплотнения подвижного соединения рабочих полостей изделия в единицу времени при определенном перепаде давления. Утечка определяется по формуле

$$Y = \frac{V \cdot \Delta p}{t}, \quad (1)$$

где  $V$  – контролируемый объем, включающий свободный объем средств и соединительных каналов;  $\Delta p$  – изменение величины испытательного давления;  $t$  – время контроля; принятая размерность  $Y$  – мм<sup>3</sup> МПа/с [1].

На основе анализа материалов научно-технических исследований в области испытаний изделий на герметичность позволили разработать три возможных схемы автоматизации контроля герметичности запорных кранов по манометрическому методу, которые представлены на рисунке. На схемах условно изображены аппаратура для выполнения контрольно-измерительных операций и оборудование для осуществления вспомогательных операций в автоматическом режиме, а также показаны основные функциональные связи. Одинаковые по функциональному назначению устройства на всех схемах имеют общее порядковое обозначение.

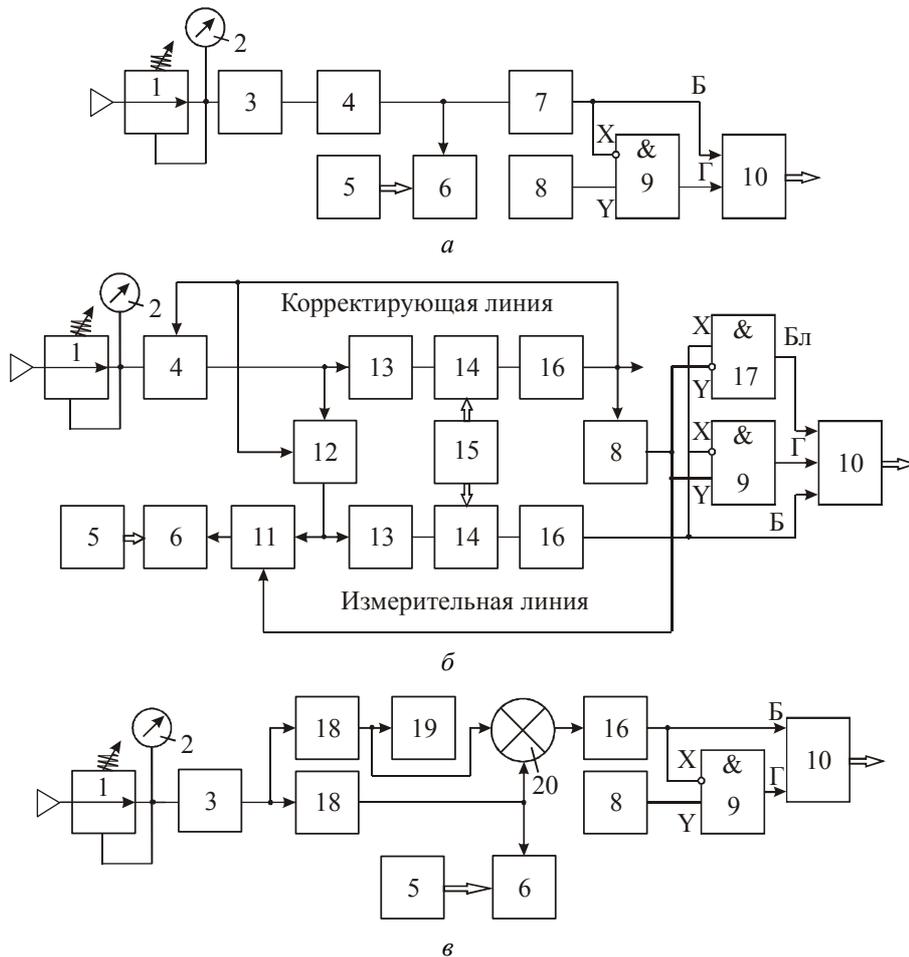
На рисунке *a* представлена схема, в которой предусмотрено применение различных типов датчиков герметичности. Контроль герметичности по данной схеме осуществляется следующим образом. После установки на рабочей позиции и уплотнения испытуемого изделия посредством механизма фиксации в линию контроля подается индикаторный газ, давление которого предварительно задается стабилизатором 1 по манометру 2. Более точно испытательное давление устанавливается задатчиком 3

и при его достижении проводится отсечка посредством клапана 4, датчика 7 и объекта контроля 6 от источника сжатого воздуха и одновременно – запуск реле времени 8, настроенного на требуемую длительность испытания. В случае обнаружения падения давления индикаторного газа датчик выдаст сигнал о негерметичности изделия на сортировочное устройство 10. Одновременно этот сигнал поступит на инверсный вход элемента 9, реализующего логическую функцию  $F = \bar{X} \cdot Y$  – «запрет по X», на выходе которого сигнал будет отсутствовать. Если падение давления, т. е. утечка, отсутствует по завершении испытания, то на логический элемент поступит сигнал только от реле времени, и он выдаст на сортировочное устройство сигнал о годности изделия. Для повышения чувствительности данной схемы требуется малый объем всех емкостей линии контроля, поэтому клапан отсечки и датчик герметичности следует устанавливать как можно ближе к объекту контроля. Это не всегда возможно из-за конструктивных особенностей самого датчика, так как уменьшение рабочих емкостей в некоторых типах датчиков уменьшают их чувствительность. Однако данная схема обеспечивает как требования контроля герметичности газовых кранов, так и достаточно высокий уровень автоматизации. Датчики соответствующей конструкции позволяют получать как аналоговый сигнал, т.е. вести измерения величины утечки, так и дискретный сигнал для контрольно-сортировочной операции, а некоторые датчики допускают колебание испытательного давления. При необходимости схема позволяет вести постоянный автоматический контроль за состоянием герметичности объекта в процессе его эксплуатации.

На рисунке *б* представлена схема, в которой кроме измерительной линии предусмотрена корректирующая линия, выполненная аналогично. Каждая из них содержит чувствительный элемент 13 (сильфонный или мембранный) преобразователь перемещения 14 чувствительного элемента в изменение давления или расхода и пневмоэлектропреобразователь 16. При этом вход измерительной линии сопряжен с объектом контроля, а выход – с сортировочным устройством, выход корректирующей линии подключен к управляющим входам клапана 4 общей отсечки, клапану 12 отсечки корректирующей линии реле времени 8. Измерительную и корректирующие линии настраива-

ют одновременно под испытательным давлением по эталонному изделию, посредством настроечных элементов 15. При рабочем цикле уста-

новка и уплотнение изделия происходит, как в предыдущей схеме, но индикаторным газом заполняют обе линии.



Схемы автоматизации контроля герметичности:

*a* – компрессионный способ с отсечкой; *б* – с корректирующей линией; *в* – по способу сравнения; 1 – стабилизатор давления; 2 – манометр; 3 – задатчик давления; 4 – клапан отсечки источника сжатого воздуха; 5 – механизм фиксации; 6 – объект контроля; 7 – датчик герметичности; 8 – реле времени; 9 – логический элемент «запрет по X»; 10 – сортировочное устройство; 11 – клапан отсечки объекта контроля; 12 – клапан отсечки корректирующей линии; 13 – чувствительный элемент; 14 – преобразователь перемещения; 15 – настроечный элемент; 16 – пневмоэлектропреобразователь; 17 – логический элемент «запрет по Y»; 18 – дроссельный элемент; 19 – датчик утечки; 20 – элемент сравнения; Г, Б, Бл – сигналы «Годен», «Брак», «Блокировка» соответственно

После достижения требуемого уровня испытательного давления сигнал от пневмоэлектропреобразователя корректирующей линии производит отсечку от источника сжатого воздуха посредством клапана 4 и отсечку измерительной линии от корректирующей посредством клапана 12, а также включает реле времени 8, запуск которого производит отсечку объекта контроля 6 от линии контроля посредством клапана 11. По истечении заданного времени контроля реле открывает клапан 11, соединяя изделие и линию контроля. Если объект окажется герметичным, то на логический элемент

9 поступит сигнал только от реле времени, и он выдаст на сортировочное устройство 10 сигнал о годности. В случае негерметичности изделия давление в линии контроля снизится и с ее пневмоэлектропреобразователя 16 на сортировщик поступит сигнал о браке. Наличие в линии контроля клапана 11 и логического элемента 17, реализующего функцию  $F = X \cdot \bar{Y}$  – «запрет по Y» позволяет заблокировать сортировочное устройство в случае разгерметизации линии контроля, т. е. утечки индикаторного газа в каком-либо устройстве или канале линии контроля, а не в объекте контроля во время ис-

пытания. Реализация схемы в соответствии с логическими состояниями, приведенными в таблице, позволяет предотвратить ложный сигнал о браке и выдать на сортировщик сигнал о годности или браке только по завершении времени контроля.

Логические состояния схемы контроля

X	Y	Г (годные)	Б брак)	Бл (блокировка)
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
0	1	1	0	0
1	1	0	1	0

Наличие корректирующей линии позволяет исключить влияние на точность контроля изменения атмосферного или сетевого давления за счет автоматического введения поправки при настройке. Кроме того клапан 11 позволяет вести настройку схемы без эталонного изделия.

Данная схема в большей степени соответствует требованиям контроля герметичности изделий, в которых не допускается утечка индикаторной среды [1]. Ее применение для контроля герметичности газовых кранов возможно, но менее целесообразно по сравнению с предыдущей схемой из-за значительно большей сложности.

На рисунке 6 приведена схема автоматизации герметичности с измерительной и эталонной линиями. Измерительная линия содержит дроссельный элемент 18, камеру элемента сравнения 20, подключенные к объекту контроля 6 и датчику 3 испытательного давления  $p_k$ . Эталонная линия содержит дроссельный элемент 18, датчик утечки 19 и вторую камеру элемента сравнения 20, в которой задается эталонное давление  $p_3$  меньше  $p_k$  на величину, пропорциональную предельно допустимой утечке  $[Y]$ , т. е. с учетом зависимости (1)

$$p_3 = p_k - \frac{t \cdot [Y]}{V}.$$

Условие работы элемента сравнения и данной схемы в целом описывается неравенством

$$p_k - \frac{t \cdot Y_p}{V} > p_3.$$

Если реальная утечка больше допустимой  $[Y] < Y_p$  то  $p_3 > p_k$ . Тогда на выходе элемента сравнения появится сигнал  $p_p$ , который через пневмоэлектропреобразователь 16 поступит на

логический элемент 9 и на сортировочное устройство 10, как сигнал о браке. Если же реальная утечка меньше допустимой  $[Y] > Y_p$ , то  $p_3 < p_k$  и, следовательно, сигнал  $p_p$  будет отсутствовать. Причем отсутствие на протяжении заданного времени контроля будет соответствовать годному изделию, т. е. после поступления сигнала от реле времени 8 логический элемент 9 выдаст на сортировщик 10 сигнал «Годен».

Достоинством схемы является ее простота и легкость реализации на типовых элементах пневмоавтоматики. Кроме того, нет необходимости производить отсечку источника сжатого воздуха от линии контроля при каждом испытании. Однако схема имеет меньшую чувствительность по сравнению предыдущими схемами из-за невысоких рабочих характеристик типа элемента сравнения. Для решения этой проблемы требуются дополнительные исследования по созданию высокочувствительного элемента сравнения пневматических сигналов. Данная схема в целом соответствует требованиям к контролю герметических запорных кранов и обеспечивает высокий уровень автоматизации.

Наиболее перспективным для автоматизации является манометрический метод контроля герметичности запорных кранов с применением датчиков герметичности и схем сравнения сигналов [3, 5, 6, 7, 8, 10, 11]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку формализованной модели автоматического контроля герметичности и создание на этой основе ряда унифицированных элементов и устройств непосредственно для автоматических систем контроля герметичности, что позволит строить данные системы по модульному принципу для широкой номенклатуры изделий, которым необходимы испытания на герметичность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. Кн. 1: Контроль герметичности / А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, Л. Д. Муравьева С. А. Добротин, А. В. Половинкин, Ю. А. Кондратьев; Кн 2: Вихревой контроль / Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.: ил.
2. Барабанов, В. Г. К вопросу об исследовании манометрического метода испытаний на герметичность / В. Г. Барабанов // Автоматизация технологических производств в машиностроении: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 1999. – С. 67–73.
3. Барабанов, В. Г. Производительность автоматизированных стендов для контроля герметичности дискретно-непрерывного действия / В. Г. Барабанов // Автомати-

зация технологических процессов в машиностроении : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – С. 47–51.

4. Барabanов, В. Г. Исследование временных зависимостей схемы контроля герметичности по способу сравнения / В. Г. Барabanов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Автоматизация технологических процессов в машиностроении»; вып. 1 (посвящается 40-летию кафедры «Автоматизация производственных процессов»)). – С. 17–19.

5. Барabanов, В. Г. Экспериментальное исследование устройства для контроля герметичности / В. Г. Барabanов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – (Серия «Автоматизация технологических процессов в машиностроении»; вып. 2). – С. 40–43.

6. Барabanов, В. Г. Исследование чувствительности контроля герметичности по способу сравнения с непрерывной подачей испытательного давления / В. Г. Барabanов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – (Серия «Автоматизация технологических процессов в машиностроении»; вып. 3). – С. 51–53.

7. Барabanов, В. Г. Разработка алгоритма для расчета параметров схемы контроля герметичности / В. Г. Барabanов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 3). – С. 10–12.

8. Барabanов, Г. П. Автоматизация приемосдаточных испытаний на герметичность в производстве газовой аппаратуры / Г. П. Барabanов, В. Г. Барabanов // Известия

ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 5). – С. 62–65.

9. Барabanов, Г. П. Моделирование метода и средств автоматического контроля герметичности газовой запорной арматуры / Г. П. Барabanов, В. Г. Барabanов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 6). – С. 71–73.

10. Барabanов, Г. П. Автоматизация контроля герметичности газовой трубопроводной арматуры / Г. П. Барabanов, В. Г. Барabanов, И. И. Лупушор // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 7). – С. 65–68.

11. Барabanов, Г. П. Рекомендации по созданию автоматизированного оборудования для контроля герметичности газовой аппаратуры на этапе проектирования / Г. П. Барabanов, В. Г. Барabanов, В. А. Бессалов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 100–103.

12. Барabanов, Г. П. Автоматизация контроля герметичности по манометрическому методу способом сравнения с непрерывной подачей давления / Г. П. Барabanов, В. Г. Барabanов, А. К. Иванюк // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 93–96.

УДК 681.523.2

А. С. Букатин<sup>1</sup>, Д. А. Дудников<sup>2</sup>, В. А. Горюнов<sup>3</sup>, В. В. Корзин<sup>4</sup>, Ю. Г. Бурков<sup>4</sup>

### ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СТРУЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФОТОРЕЗИСТА SU-8 И ПДМС

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Академический университет РАН,

<sup>2</sup> Институт проблем управления РАН

<sup>3</sup> Волгоградский государственный технический университет

<sup>4</sup> Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: antbuk.fiztek@gmail.com

При создании элементов управляющих систем широко применяются технологии и методы прототипирования микрофлюидных устройств. В данной работе рассматриваются особенности формирования микроструктур и создания реплик элементов струйных систем управления с использованием фоторезиста SU-8 и ПДМС.

*Ключевые слова:* струйная система управления, микрофлюидный чип, мягкая литография, фотолитография.

When you create elements of control systems are widely used technology and methods of prototyping of microfluidic devices. This paper discusses the features of the formation of microstructures and replicas of elements of jet control systems with the use of the photoresist SU-8 and PDMS.

*Keywords:* fluid control system, microfluidic chip, soft lithography, photolithography.

#### Введение

На устойчивость работы электронных систем управления, могут оказывать влияние естественные и искусственные дестабилизирующие факторы, поэтому в ряде случаев к электронным системам управления предъявляются очень высокие требования по надежности и работоспособности. При проектировании электрон-

ных систем управления, которые должны работать в тяжелых условиях эксплуатации (например, при воздействии сильных электромагнитных и радиационных полей), необходимо предусматривать специальные меры защиты, что увеличивает стоимость электронной системы управления. Поэтому необходимость альтернативных электронике технических средств с дру-

гим носителем информационных сигналов, способных сохранять работоспособность в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов, вполне актуальна.

Резервным каналом повышения надежности электронных систем управления может быть система управления, построенная на базе цифровых и аналоговых элементов струйной техники, в которой в качестве энергоносителя используется сжатый газ, а функциональные элементы строятся на аэродинамических эффектах. Струйные элементы и системы обладают рядом достоинств, обуславливающих целесообразность их использования в различных системах управления. К числу достоинств относятся: нечувствительность к электромагнитному излучению, интенсивной радиации, ударным нагрузкам и вибрациям; работоспособность в широком диапазоне температур; высокая надежность, обусловленная отсутствием подвижных частей; низкая стоимость изготовления и эксплуатации.

Ранее, на основе теоретических и экспериментальных исследований, были созданы базовые струйные элементы, модули и преобразователи информации, реализованные в системе струйных элементов **ВОЛГА** и **СМСТ-2** для общепромышленного применения и в агрегатно-интегральной струйной технике (**АИСТ**) для построения устройств управления параметрами авиационных газотурбинных двигателей.

Струйные регуляторы успешно используются для управления параметрами газотурбинных двигателей Д-27, Д-36, Д-136, Д-436, Д-18 на самолетах ЯК-42, РУСЛАН, МРИЯ, Ту-334, Ту-204, Ил-86, Ил-96, Ан-3, Ан-70, Ан-148, вертолете Ми-26 и др. (наработка на отказ более 20 млн. летных часов). Среди них струйные регуляторы положением створок входного аппарата, температуры, отношения давлений в ступенях компрессора газотурбинных двигателей [1].

Резервный канал на базе струйных элементов должен обеспечивать устойчивость, заданные статические и динамические характеристики управляемости на всех режимах работы при действии внешних дестабилизирующих факторов и при отказе элементов основного канала в результате собственных неисправностей. При этом вполне правомерно возникает вопрос о возможности выполнения резервным каналом заданных требований по форме сигналов и быстродействию.

Сдерживающим фактором использования струйной техники для вычислительных опера-

ций в системах управления, является ее весьма низкое быстродействие по сравнению с электронными. Для применения струйной техники в различных управляющих системах требуется существенно повысить ее быстродействие, минимизировать массогабаритные показатели и разработать быстродействующие средства сопряжения струйных и электронных каналов.

Существует возможность изготовления струйных элементов с использованием фоторезиста SU-8 и полидиметилсилоксана (ПДМС).

#### **Материалы и методы изготовления микроструктур в резисте SU-8 и ПДМС**

Процесс изготовления микрофлюидных чипов из ПДМС с применением резиста SU-8 («мягкая литография») состоит из трех этапов: изготовление фотошаблона (рис. 1, а), изготовление мастер-формы из фоторезиста, нанесенного на кремниевую пластину (рис. 1, б) и изготовление микрофлюидных чипов (рис. 1, в).

Изготовление фотошаблона осуществлялось на установке лазерной литографии DWL 66FS (Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH, Германия) с характерным разрешением  $\sim 1 \mu\text{m}$ . Заготовки для фотошаблонов представляли собой стеклянные пластинки толщиной 1 mm с нанесенным слоем хрома толщиной  $\sim 100 \text{ nm}$  и слоем фоторезиста AZ 1505 (Microchemicals GmbH, Германия) толщиной  $\sim 800 \text{ nm}$ .

Для формирования микроструктур на поверхности кремниевой подложки использовались резисты SU-8 2025 и SU-8 2075 (Micro-Chem Corp., США), которые позволяют получить пленки толщиной 10 – 250  $\mu\text{m}$  на центрифуге Delta 6 RC (SUSS MicroTec, Германия). После нанесения резиста осуществлялось его удаление с края образца механическим способом и отжиг при температуре 95 °C в течение 7–60 мин в зависимости от толщины слоя. Для повышения силы адгезии SU-8 к кремниевой подложке последняя предварительно обрабатывалась в 50 % растворе плавиковой кислоты (HF) в течение 40 с.

Экспонирование нанесенной на кремниевую подложку пленки резиста SU-8 осуществлялось методом контактной фотолитографии в режиме «мягкого контакта» на установке MJB4 (SUSS MicroTec, Германия) при воздействии i-линии излучения ртутной лампы (365 nm). При оптимальных условиях экспонирования и проявления размеры получаемых микроструктур максимально близко соответствуют размерам элементов на фотошаблоне, а угол наклона стенок близок к 90 °C [2].

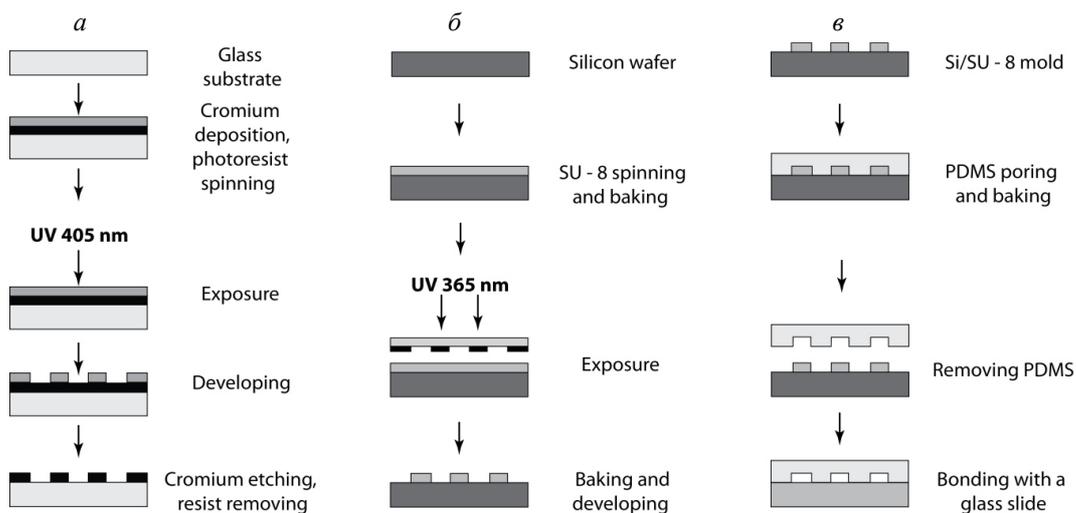


Рис. 1. Последовательность основных операций и этапы изготовления ПДМС-микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии:  
*а* – изготовление фотошаблона; *б* – изготовление мастер-формы; *в* – изготовление ПДМС микрофлюидных чипов

После экспонирования осуществлялся отжиг подложки при температуре 95 °С в течение 7–20 мин в зависимости от толщины слоя. Проявление резиста проводилось в проявителе SU-8 Developer (MicroChem, США) в течение 1–20 мин, с последующей промывкой подложки в изопропиловом спирте. Придание механической прочности пленке фоторезиста SU-8, увеличение ее адгезии к подложке и удаление микротрещин на ее поверхности осуществлялось путем термического отжига при температуре 170 °С в течение 5 мин.

Для отливки ПДМС реплик струйных элементов по изготовленным мастер-формам использовался набор Sylgard 184 (Dow Corning, США), состоящий из основы и отвердителя,

смешиваемых в пропорции 10:1. После дегазации и заливки смеси в форму производилось ее отверждение при температуре 65 °С в течение 4 ч. По окончании процесса отверждения ПДМС реплики микрофлюидных чипов отделялись от формы и в них проделывались отверстия с помощью пробойника. После этого осуществлялась обработка поверхности реплики и защитной стеклянной пластины в кислородной плазме на установке V15-G (PINK GmbH Thermo-systeme) и последующее их соединение.

Изображения тестовых микроструктур в SU-8 и ПДМС приведены на рис. 2 и 3. Все изображения получены с помощью СЭМ Supra 25 (Carl Zeiss, Германия).

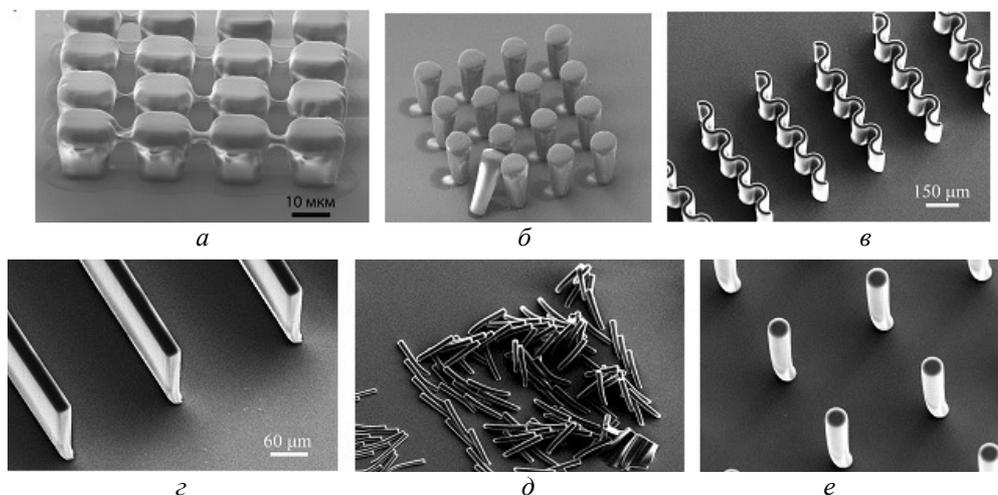


Рис. 2. Примеры тестовых микроструктур в резисте SU-8:  
*а* – без применения оптического фильтра; *б* – с применением фильтра 360-PL, Omega Optical, США;  
*в, г* – полоски из SU-8 шириной 25 μm и высотой 250 μm; *д* – цилиндрические столбики высотой 250 мкм и диаметром 30 мкм; *е* – цилиндрические столбики высотой 250 мкм и диаметром 40 мкм

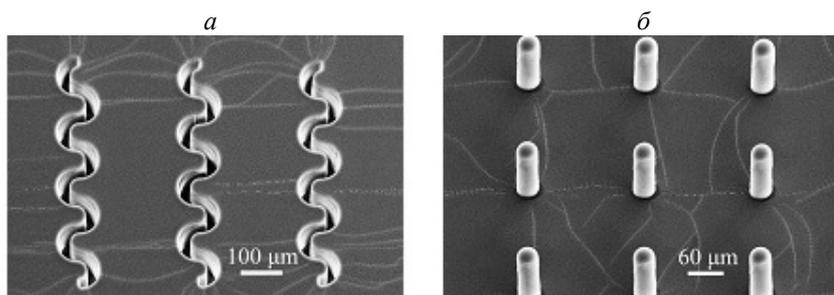


Рис. 3. Примеры изображений тестовых реплик в ПДМС:  
*a* – углубления шириной 25  $\mu\text{m}$  и глубиной 100  $\mu\text{m}$ ; *б* – цилиндрические столбики диаметром 40  $\mu\text{m}$  и высотой 100  $\mu\text{m}$

Результаты проведенного исследования зависимости аспектного соотношения получаемых микроструктур от их размеров и формы приведены в [3].

#### Сравнение технологии «мягкая литография» с методами 3d-печати и лазерной резки

При изготовлении прототипа элемента струйной системы резервирования методом «мягкой литографии» учитывались ранее

выявленные особенности. Изображение мастер формы и прототипа готового устройства, выполненного из ПДМС, соединенного со стеклянной подложкой, приведены на рис. 4, *a*, *б*, *в*. Для сравнения на рис. 4, *г*, *д* приведены изображения элемента струйной системы резервирования, выполненного в пластике методом 3d-печати и в металле методом лазерной резки.

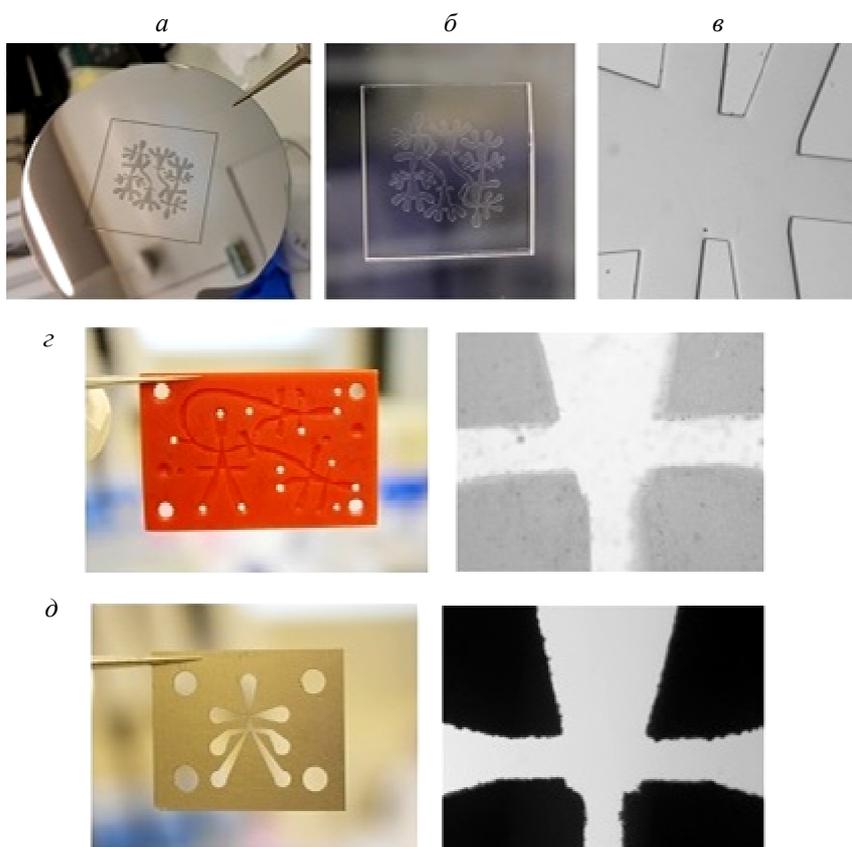


Рис. 4. Изображения элементов струйной системы управления:  
*a* – мастер форма для элемента струйной системы резервирования; *б* – прототип готового устройства из ПДМС; *в* – изображение микроканалов прототипа; *г* – элементы, выполненные из пластика методом 3d-печати; *д* – элементы, выполненные из металла методом лазерной резки

При изготовлении микроканалов методом 3d-печати (см. рис. 4, *з*), в соответствии с технологическими особенностями этого метода, не могут быть получены острые кромки элементов рабочей камеры. Кроме того, при использовании этой технологии сложно получить вертикальные стенки микроканалов. Изготовление микроканалов методом лазерной резки (рис. 4, *д*) также не позволяет получить малые радиусы закругления каналов, и, кроме того, стенки микроканалов имеют большую шероховатость, что связано с неоднородностью нагрева и пересаживанием материала в процессе лазерной резки. Технология «мягкой литографии» (рис. 4, *а, б, в*) не имеет таких недостатков, позволяет формировать микроструктуры с вертикальными стенками, обладающими шероховатостью  $\sim 0,2$  мкм и аспектным соотношением  $> 10$ .

#### Заключение

Струйные элементы систем управления, изготовленные методом «мягкой литографии» имеют более высокую точность микроканалов по сравнению с элементами, изготовленными

по другим технологиям. Полученные таким методом струйные элементы имеют практически идеальный и симметричный профиль рабочей камеры, полностью совпадающий с рабочим чертежом, что исключает различные возможности для возникновения нежелательных аэродинамических эффектов на кромках и стенках рабочей камеры и в каналах струйной системы управления. В результате, устранив помехи в рабочей камере и каналах, мы увеличиваем быстродействие как отдельных элементов, так и всей системы управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касимов, А. М. Пневмоавтоматика сегодня / А. М. Касимов // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 5–9.
2. Zhang J., Chan-Park M.B., Conner S.R. // LabChip. 2004. Vol. 4. P. 646 – 653.
3. Букатин, А. С. Увеличение быстродействия струйных систем управления путем прототипирования их элементов методом «мягкой литографии» / А. С. Букатин, Ю. Г. Бурков, В. А. Горюнов, Д. А. Дудников, В. В. Корзин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 14 (193) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 49–52.

УДК 658.52.011.56:519.17

*Д. П. Гаврилов, В. Г. Барabanov*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫМ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

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

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

The analysis of the working principle of cryogenic pumping units and their control systems are given. The algorithm of the management of the cryogenic pump unit with the use of the frequency converter (FC) are designed. On the basis of this algorithm created software for the designed microprocessor system.

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

Высокими темпами развивается применение сжатого природного газа в качестве моторного топлива на автотранспорте. Задача наполнения баллонов газами высокого давления в настоящее время решается оптимальным образом с использованием криогенной технологии, а именно с использованием криогенных поршневых насосных агрегатов средней и малой производительности [6]. Криогенная техноло-

гия обеспечивает целый ряд технико-экономических преимуществ на всех стадиях производства и доставки сжатых газов конечному потребителю. На первом этапе – это снижение транспортных издержек при доставке криогенных жидкостей (сжиженных продуктов разделения воздуха или сжиженного природного газа) на региональные наполнительные станции. На втором этапе криогенная технология обеспе-

чивает дополнительный выигрыш при переводе жидкости в другое агрегатное состояние - газ, сжатый под давлением [1, 7].

Регулирование производительности в широком диапазоне и обеспечение защиты двигателя является актуальной задачей для производителей современных криогенных насосных агрегатов. Применение преобразователя частоты обеспечивает как управление насосом (плавный пуск двигателя, контроль параметров напряжения входного и выходного электропитания, мощности, частоты, силы тока и т. д.), так и защиту двигателя насоса от перегрузки по току [2, 5].

Также, при эксплуатации криогенного насоса необходимо контролировать большое количество параметров технологического процесса:

- 1) температура на линиях всасывания и нагнетания;
- 2) контроль готовности насоса к запуску;
- 3) контроль кавитационного срыва насоса и «сухого пуска»;
- 4) контроль утечек криогенной жидкости;
- 5) контроль температуры обмоток электродвигателя насоса.

Контроль готовности насоса к запуску обеспечивают датчики температуры, установленные в линиях всасывания и нагнетания; исключение возможности «сухого пуска» повышает ресурс работы насоса и увеличивает продолжительность периода работы насоса между необходимым техническим обслуживанием [9]. В случае прекращения подачи жидкости в работающий насос или в случае прогрева этой жидкости и, соответственно кавитационного срыва насоса, автоматика останавливает электродвигатель насоса, используя сигнал от электроконтактного манометра. Контроль утечек реализуется с помощью датчика температуры в зоне нагнетающего трубопровода. Его задача предупредить оператора о наличии тенденции к появлению течи, т. е. о возможном износе элементов уплотнения штока. В случае превышения температуры в этой зоне насос автоматически останавливается и, далее, выполняется его техническое обслуживание, связанное с заменой уплотнения штока [4]. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

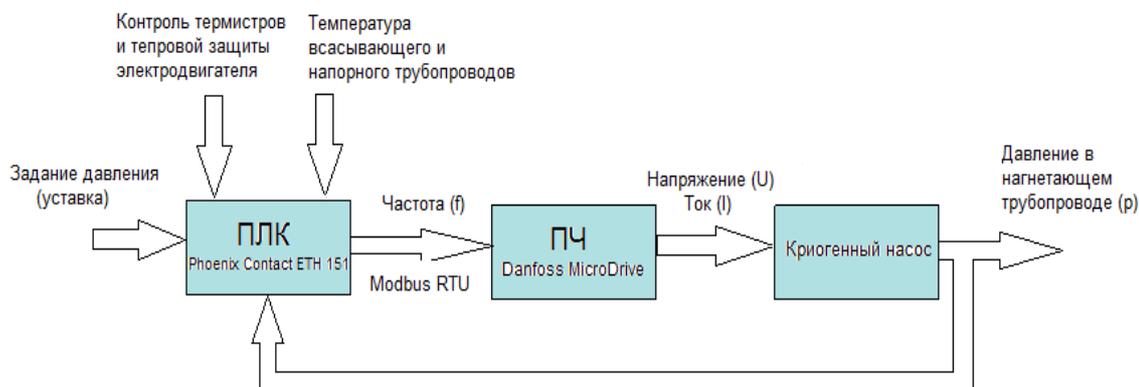


Рис. 1. Структурная схема системы

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

Используя средства визуализации, разработанную программу можно представить на панели оператора. Главный экран программы изображен на рис. 2.

Главный экран является стартовым меню

программы.

Из главного меню можно осуществить следующие действие:

- Пуск/останов системы.
- Изменение режима работы.

Данные действие осуществляется нажатием на соответствующую пиктограмму на панели оператора.

На главном экране отображается следующая информация:

- температура во всасывающем и нагнетающем трубопроводах;
- состояние насоса;
- аварийная сигнализация при сухом ходе и перегреве обмоток двигателя.

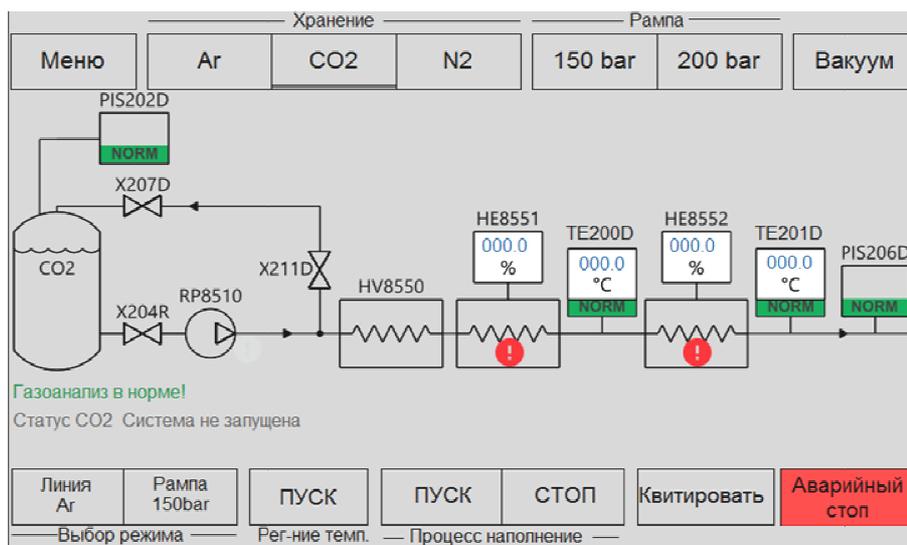


Рис. 2. Главный экран программы

Применение ПЛК и разработанной программы значительно расширяют возможности рассматриваемой установки. Панель оператора позволяет упростить управление и повысить его качество, благодаря отображению архивов аварий и графиков основных параметров криогенного насосного агрегата.

Необходимо отметить еще один принципиальный момент, обусловленный общей тенденцией в развитии оборудования. Это желание получить полностью автоматизированную установку, что, во-первых, снижает затраты и, во-вторых, сводит к минимуму риски, связанные с человеческим фактором. Такие агрегаты могут работать в полностью автоматизированном режиме без присутствия оператора [8].

Таким образом, криогенная технология заполнения баллонов с помощью современных криогенных поршневых насосных агрегатов с активным применением экранно-вакуумной изоляции и современных средств автоматизации является на сегодня наиболее эффективной, надежной, безопасной и рентабельной.

В дальнейшем планируется усовершенствовать данную систему управления введением новых контролируемых параметров (уровень криогенной жидкости в емкости, температура газа перед подачей потребителю) и внедрить ее на реальном производстве.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баринов, А. В.* Компания «CRYOSTAR» укрепляет лидирующие позиции в мировом криогенном машиностроении / А. В. Баринов, Г. К. Лавренченко // *Технические газы*. – 2015. – № 3. – С. 64–72.
2. *Архипов, В. Т.* Разработка малогабаритного криогенного насоса для перекачки жидкого азота / В. Т. Архипов, С. И. Бондаренко, И. Н. Кудрявцев // *Инженерная физика*. – 2005. – № 2. – С. 21–25.
3. *Петров, Д. Н.* Регулируемый привод в насосных установках / Д. Н. Петров, Ю. В. Сербин // *Силовая электроника*. – 2005. – № 4. – С. 27–30.
4. *Петров, Д. Н.* Применение современных преобразователей частоты / Д. Н. Петров, Ю. В. Сербин // *Силовая электроника*. – 2005. – № 1. – С. 8–11.
5. *Левин, И. В.* Применение насосов компании «CRYOSTAR» в эффективных газовых технологиях и криогенном оборудовании / И. В. Левин, Б. М. Машункин, В. Н. Уткин // *Технические газы*. – 2010. – № 1. – С. 69–72.
6. *Цапкова, А. Б.* Криогенный насос-газификатор для комплексов сжиженного природного газа / А. Б. Цапкова, А. А. Шиманов, М. А. Афанасьева // *Проблемы и перспективы развития двигателестроения*. – 2016. – № 5. – С. 147–148.
7. *Ляпин, В. И.* Автономные вакуумные криогенные насосы / В. И. Ляпин, А. В. Громов, Н. В. Нейфельд // *Вакуумная техника и технология*. – 2006. – Т. 16. – № 3. – С. 231–236.
8. *Уткин, В. Н.* Высокоэффективные криогенные насосы для технологий производства и использования технических газов / В. Н. Уткин // *Технические газы*. – 2007. – № 4. – С. 65–69.
9. *Барбанов, В. Г.* Использование программного комплекса CoDeSys для разработки системы автоматического управления насосной установкой с применением преобразователя частоты / В. Г. Барбанов, Д. П. Гаврилов // *Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 8 (187) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 103–105.

УДК 62-529

*Д. Д. Ермишов, А. М. Макаров, Е. Г. Крылов, М. П. Кухтик*  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БИОРЕАКТОРЕ**

**Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

Проанализировано влияние распределения влажности и температуры на качество готовой продукции и скорость протекания реакции в биореакторе. Проведено компьютерное моделирование этих процессов, в ходе которых выявлены оптимальные значения подачи сжатого воздуха, его температура и влажность. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автоматической системы регулирования температуры и влажности внутри биореактора.

*Ключевые слова:* ферментерное устройство, биореактор, температура, влажность, роботизированная система, автоматическое управление.

Analyzed the impact of distribution of humidity and temperature processes on the quality of the original product and the speed of the reactions in the bioreactor. The computer simulation of these process was performed, which revealed the optimal values of the compressed air supply, temperature and humidity. The obtained results can be used in the design of an automatic system for regulating the temperature and humidity inside the bioreactor.

*Keywords:* fermenter device, bioreactor, temperature, humidity, robotic system, automatic control.

Проблема переработки органических отходов в настоящее время становится все более актуальной. Часто для этой цели используется биореактор. В качестве основного материала обычно используется вермикультура [3, 6].

Для успешного культивирования вермикультуры необходимо соблюдать следующие условия:

1. Создать оптимальную среду обитания для компостных червей, обычно называемую базовым субстратом или поддерживающим субстратом, который должен отличаться высоким уровнем поглотительной способности, хорошей рыхлостью и необходимым соотношением углерода к азоту.

2. Иметь источник пищи или корма, называемый кормовым субстратом, которым могут быть отходы жизнедеятельности животных и птиц, пищевые отходы, отходы пивоварения, отработанный грибной субстрат, муниципальные растительные отходы, осадки сточных вод и т. д.

3. Поддерживать оптимальную влажность субстрата обитания.

4. Поддерживать оптимальную температуру внутри биореактора.

5. Создать оптимальное аэрирование в зоне переработки.

Главными параметрами контроля в данном случае являются влажность и температура в биореакторе.

Влажность играет большую роль в процессе переработки органических отходов. Она влияет на скорость переработки, качество и, что не менее важно, жизнеспособность компостных чер-

вей. Поддержание влажности в оптимальных границах – основа переработки биогазуса.

Вода в почве может передвигаться, в основном, в двух состояниях: в виде жидкости и в виде пара. В разработанных конструкциях биореактора [1, 3, 4] по специальным каналам подается увлажненный сжатый воздух.

Температура также является важным параметром для поддержания процесса переработки. Ее показатели колеблются в пределах от 32 до 40 °С. Контроль температуры положительно сказывается на скорости переработки и жизнеобеспечении вермикультуры. Это необходимо для предотвращения слеживания слоев биогазуса, уменьшения доли брака и поддержания популяции червя. Последнее является ключевым фактором эффективности и скорости переработки отходов [2, 5].

При проектировании и изготовлении сложных систем (биореактор является одной из них) высока роль математического и компьютерного моделирования, позволяющего подобрать рациональные параметры как самого биореактора, так и процессов, протекающих внутри него без непосредственного натурального эксперимента. Рассмотрев особенности конструкции и основные принципы работы, принято решение смоделировать установку в одной из систем САПР с целью более детального изучения внутренних физических процессов. В качестве такой системы был выбран комплекс программ *SolidWork* с подключаемой библиотекой *FlowSimulation*.

В начале создается твердотельная компьютерная модель исследуемой системы (рис. 1).

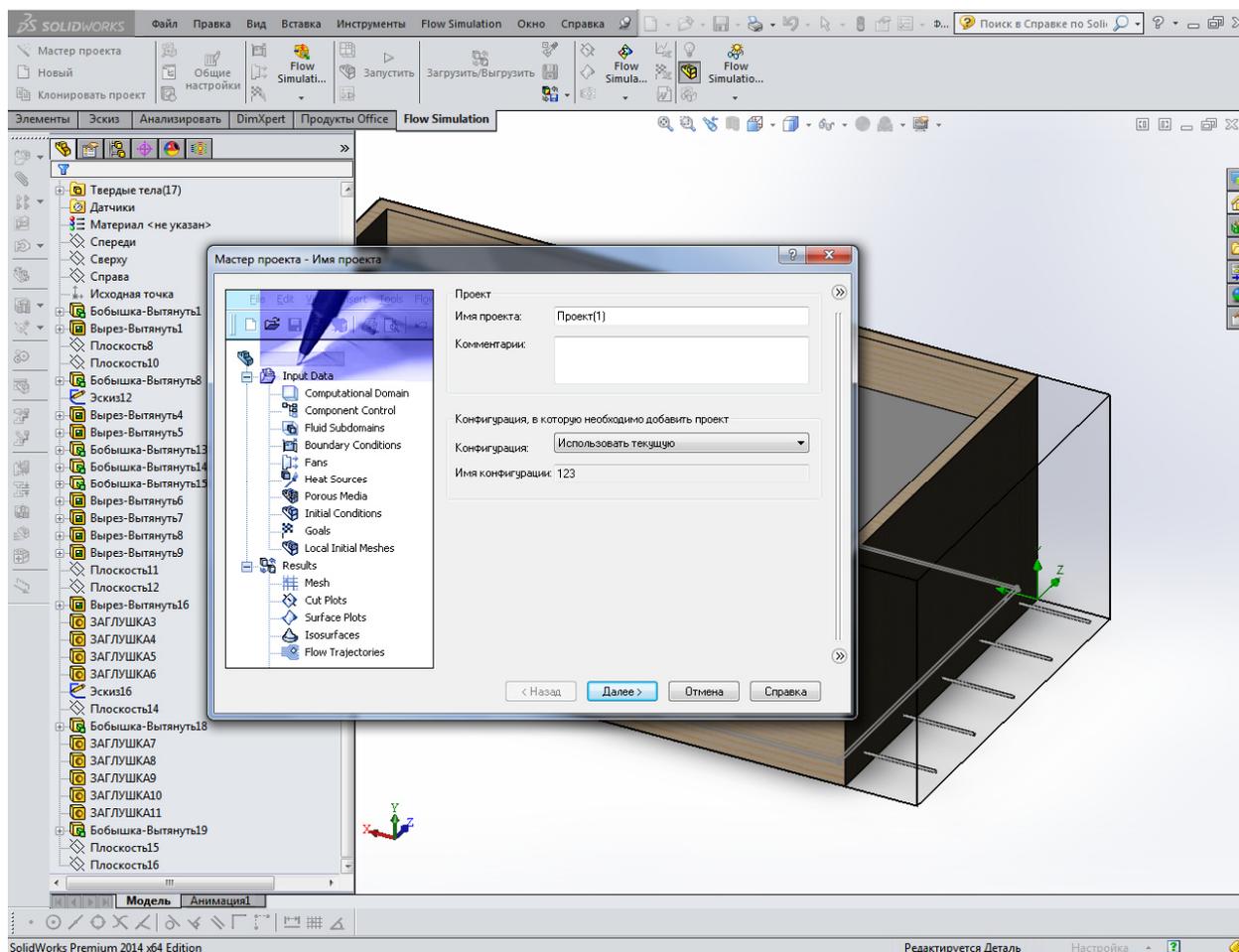


Рис. 1. Создание расчетного проекта биореактора

Задаем свойства материалов и граничные условия. Такими условиями являются массовый расход воздуха на входе в трубопровод, а также давление окружающей среды. Обязательно указываем подобласть течения (наполнение биореактора).

После этого создается расчетный проект в подключенном пакете *SolidWorks Flow Simulation*. Выбираем имя проекта, системы измерения, тип задачи. Далее задаем среду по умолчанию. В нашем случае это воздух. Материалом по умолчанию является вермикулит.

Одним из главных моментов является настройка начальных условий. В случае с фер-

ментерным устройством зададим стандартные параметры температуры, давления и влажности. После задания всех параметров производится расчет.

Первым проведенным экспериментом была проверка распределения температуры во всем объеме биогумуса (рис. 2). Оптимальная температура в 36–37 °С достигается при подаче сжатого воздуха, разогретого до температуры в 55 °С и подающегося под давлением в 152 кПа.

Построен график зависимости температуры от времени нагрева биогумуса до оптимальной температуры (рис. 3).

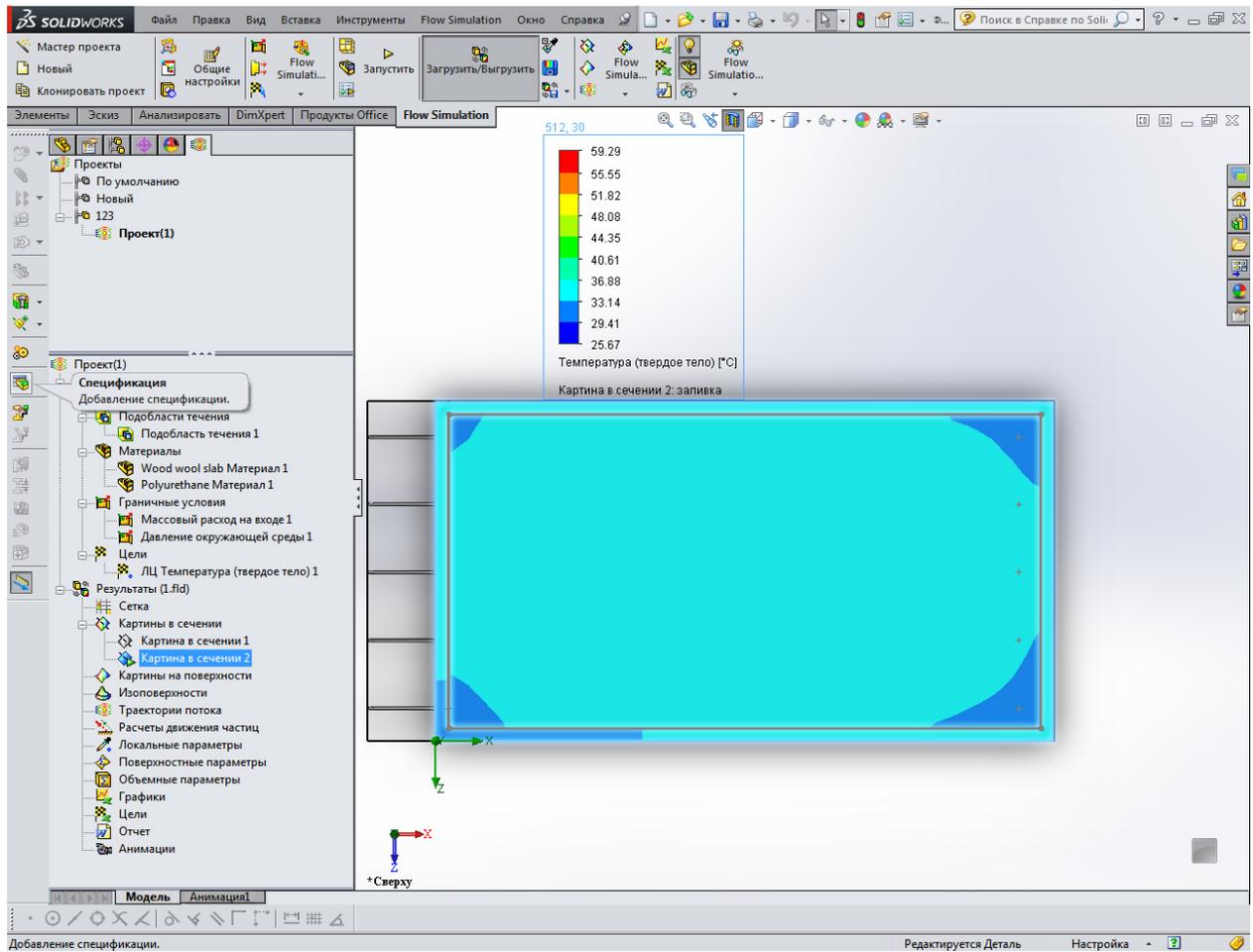


Рис. 2. Распределение температуры в биореакторе

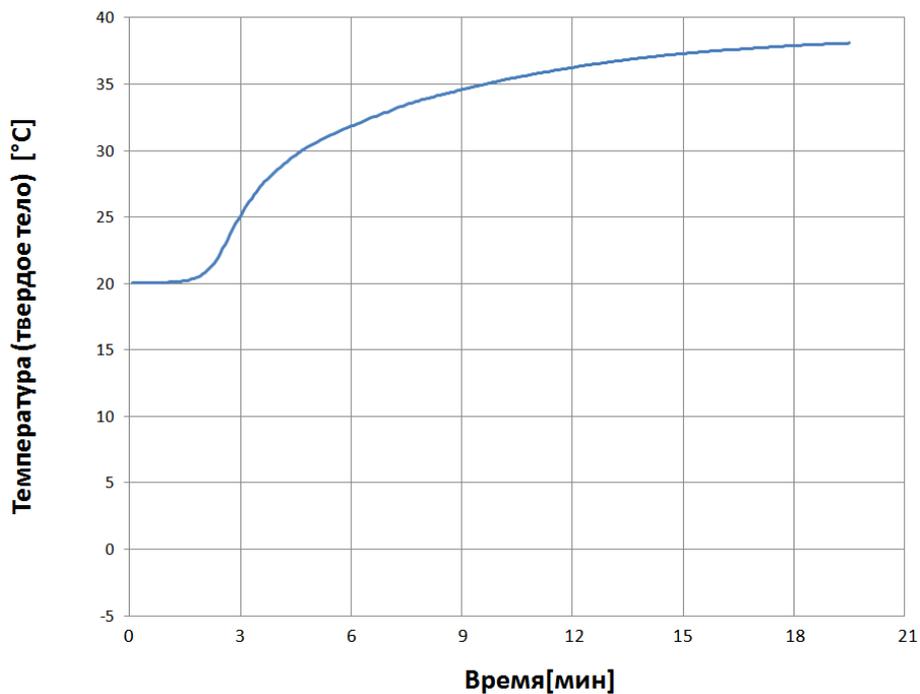


Рис. 3. График зависимости температуры от времени нагрева биогумуса

Из графика видно, что время, затраченное на нагрев биогумуса от начальных условий до оптимальных значений, составляет около 15 мин. При этом данный результат достигается по всей толщине биогумуса.

Следующим объектом анализа является распределение влажности в биореакторе. Полученные результаты представлены на рис. 4. Практически по всему объему поддерживается одинаковая влажность в диапазоне 30–40 %.

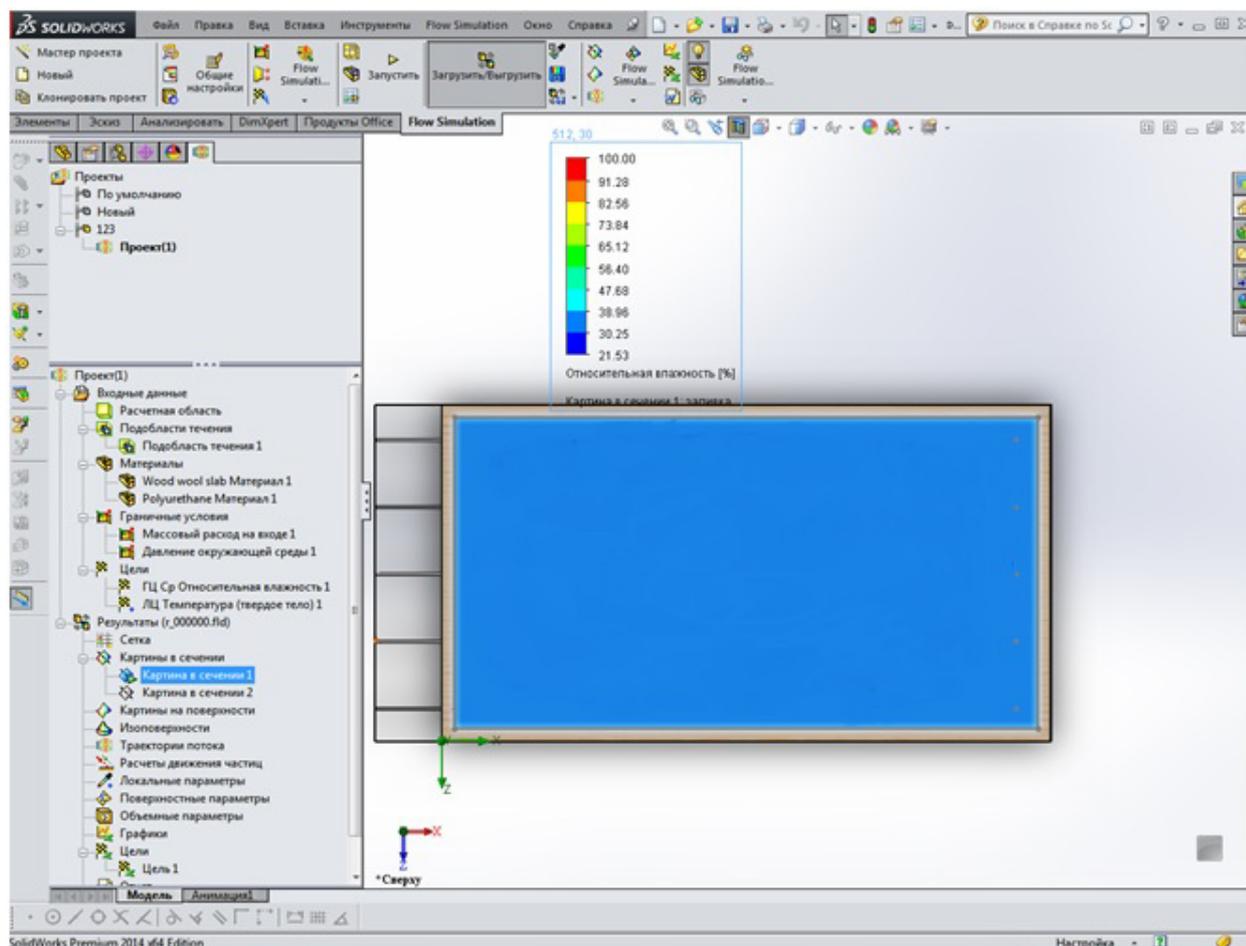


Рис. 4. Распределение влажности в биореакторе

В ходе моделирования были выявлены оптимальные параметры для эффективного, быстрого и качественного протекания процесса переработки органических отходов внутри биореактора. Это позволяет создать современную, функциональную и автономную систему, которая будет отвечать всем требованиям экологической безопасности. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании автоматической системы регулирования температуры и влажности внутри биореактора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермишов, Д. Д. Разработка автоматической системы регулирования температуры и влажности внутри биореактора / Д. Д. Ермишов // XXI Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 8–11 ноября 2016 г.): тез. докл. / редкол.: А.В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.] ; Комитет молодежной политики Волгогр. обл., Совет ректоров вузов Волгогр. обл., Волгоградский гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2016. – С. 182.
2. Обоснование использования отходов в качестве вторичного материального ресурса в сельскохозяйственном производстве / В. И. Титова, М. В. Дабахов, Е. В. Дабахова / Нижегородская гос. с.-х. академия. – Н. Новгород, Изд-во ВВАГС, 2009. – 178 с.
3. П. м. 154518 РФ, МПК С05F3/06. Ферментерное устройство / И. В. Волков, А. М. Макаров, Д. Д. Ермишов; ВолгГТУ. – 2015.
4. Роботизированное устройство для переработки органических отходов с автоматическим регулированием температуры и влажности / Я. А. Сабо, А. М. Макаров, И. В. Волков, Д. Д. Ермишов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 68–70.

5. Экология (Серия «Учебный курс») / А. И. Ажгиревич, В. А. Грачев, В. А. Гутенев [и др.] ; под ред. проф. В. В. Денисова. – М.: ИКЦ «МарТ»; Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2006. – 768 с.

6. Сабо, Я. А. Устройство для автоматизированной переработки органических отходов / Я. А. Сабо, Д. Д. Ер-

мишов // XX региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 8–11 дек. 2015 г.) : тез. докл. / редкол.: А. В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.] ; Комитет молодежной политики Волгогр. обл., Совет ректоров вузов Волгогр. обл., ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – С. 256–257.

УДК 681.523

**В. В. Корзин<sup>1</sup>, О. С. Голубин<sup>1</sup>, В. А. Горюнов<sup>2</sup>, А. Н. Рязанов<sup>3</sup>**

**ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ  
В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ МЕМБРАННЫМ РЕГУЛЯТОРАМ**

<sup>1</sup> Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет

<sup>3</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий

E-mail: korzinv@mail.ru

При решении задач автоматизации наряду с электрическими и электронными устройствами широко применяется пневмоавтоматика. В данной работе рассматриваются пневматические струйные малогабаритные регуляторы технологических параметров. Проводится их сравнение с выпускаемыми промышленностью мембранными пневматическими регуляторами.

*Ключевые слова:* струйная система управления, пневматический регулятор, струйная техника.

When automation solution along with electrical and electronic devices commonly used pneumatic devices. In this paper pneumatic fluidic compact controllers of technological parameters. Compares them with the commercially available membrane pneumatic regulators.

*Keywords:* fluidic control system, pneumatic regulator, fluidic technology.

В таких отраслях промышленности как химическая, нефтеперерабатывающая, газовая, пищевая, деревообрабатывающая и др., пневмоавтоматика является основным средством автоматизации. Это связано с высокой степенью надежности пневматической аппаратуры, с простотой ее обслуживания, неприхотливостью и сравнительной дешевизной. Важное значение имеет также и то, что пневматическая аппаратура по своей природе пожаро- и взрывобезопасна. Свойственное мембранной пневмоавтоматике невысокое быстродействие, конечно, ограничивает область ее целесообразного применения, однако во многих случаях это ограничение не проявляется. В частности, в отраслях промышленности, в которых пневмоавтоматика является основным средством, не требуется обеспечивать очень высокого быстродействия, так как, технологические процессы управляемые этими системами, сами относятся к медленно протекающим.

В настоящее время для регулирования параметров технологических процессов применяются пневматические регуляторы системы СТАРТ, построенные на основе мембранных элементов УСЭПА. Все элементы, состав-

ляющие эту систему, имеют унифицированное расположение входов и выходов, а монтаж приборов осуществляется посредством набора монтажных плат, на которых печатным способом наносятся коммуникационные каналы. Элементный принцип построения приборов позволяет строить любые одноконтурные и многоконтурные релейные схемы, устройства пневматической телемеханики с кодированием и декодированием сигналов, непрерывные и дискретные регулирующие устройства со сложными законами регулирования, системы автоматической оптимизации и различные схемы комплексной автоматизации, содержащие сотни и тысячи элементов.

Пневматические регуляторы, построенные на мембранных элементах, содержат упругие и подвижные детали. В некотором смысле они аналогичны электромеханическим приборам. Существуют, так называемые, струйные пневматические элементы и устройства, способ построения которых основан на эффектах взаимодействия между собой газовых или жидкостных потоков. Используя взаимодействие потоков между собой или с твердыми стенками, удается при очень малых габаритах и без каких-

либо подвижных и упругих деталей строить усилительные элементы пропорционального и релейного типов с различными характеристиками, генераторы, триггеры, элементы памяти и т. д., а также создавать разнообразные приборы непрерывной и дискретной техники, аналоговые и цифровые вычислительные и управляющие машины. Отсутствие подвижных частей определяет простоту конструкции, быстродействие, надежность и долговечность струйных элементов. Скорость выполнения операций, которую могут обеспечить струйные устройства, в настоящее время достигает 2–3 кГц, что значительно превышает скорость функционирования мембранных устройств. В некотором смысле струйные приборы аналогичны электронным приборам, выполняющим подобные функции [1].

Важной особенностью струйных устройств является возможность их реализации в виде печатных плат, выполненных методами штамповки, литья, травления на пластмассах, металле, керамике и стекле. В настоящее время также возможно изготовление струйных элементов методами 3D-печати, лазерной резки и методом «мягкой литографии» [2].

Поскольку давления питания струйных элементов составляет 4 кПа, что в 35 раз меньше, чем давление питания мембранных устройств составляющее 140 кПа, следовательно и экономичность струйных устройств намного выше.

Выпускаемые, в настоящее время, ООО «Завод «Тизприбор» пневматические регуляторы имеют довольно значительные габариты и массу. Авторами разработаны пропорциональный и пропорционально-интегральный регуляторы имеют габаритные размеры в 4 раза меньше и массу – в 8 раз меньше, по сравнению с существующими П- и Пи-регуляторами, построенными на мембранных элементах УСЭППА.

Малогабаритные струйные пневматические устройства отличаются более низкой потребляемой мощностью, повышенным быстродействием и большей чувствительностью по сравнению с мембранными пневматическими устройствами. Данные малогабаритные регуляторы обладают малым временем отклика, что положительно влияет на оперативность обработки сигнала.

Экспериментальные образцы регуляторов были созданы методом 3D-печати. Проведен-

ные экспериментальные исследования показали близость характеристик мембранного и струйного регуляторов. Было выявлено, что наиболее сходные значения по времени ( $T_1=0,86$  с и  $T_2=0,87$  с) у струйного регулятора и выпускаемого регулятора ПР3.32-М1 наблюдаются при коэффициенте времени интегрирования  $T_{и} = 1$  мин, и заданном значении предела пропорциональности  $\delta = 2\%$  и  $\delta = 10\%$  соответственно.

Передаточная функция струйного ПИ-регулятора при  $\delta = 2\%$  и  $T_{и} = 60$  с имеет следующий вид:  $W_p(p) = k + \frac{k}{T_{и}p} = 0,5 + \frac{0,5}{60p}$ .

При математическом моделировании системы управления подачей газа в печь обжига электродов использовалась математическая модель второго порядка с самовывравниванием:

$$W_o(p) = \frac{1,867}{19,21p^2 + 7,89p + 1}$$

лучена путем обработки экспериментальных данных снятых на печи обжига электродов. Входным сигналом является расход природного газа, а выходным – температура газовой фазы в камере обжиговой печи [3].

Полученная передаточная функция системы управления имеет следующий вид:

$$W_c(p) = \frac{1}{10,29p^2 + 4,23p + 0,54}$$

Применение малогабаритных струйных регуляторов в системах управления технологическими процессами позволит уменьшить габариты и снизить массу системы управления, а также увеличить быстродействие и повысить ее надежность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касимов, А. М. Пневмоавтоматика сегодня / А. М. Касимов // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 5–9.
2. Букатин, А. С. Увеличение быстродействия струйных систем управления путем прототипирования их элементов методом «мягкой литографии» / А. С. Букатин, Ю. Г. Бурков, В. А. Горюнов, Д. А. Дудников, В. В. Корзин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 14 (193) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 49–52.
3. Сошкин, Г. С. Применение средств моделирования среды SIMULINK в задачах анализа качества систем регулирования / Г. С. Сошкин, С. В. Сошкин, А. Л. Рутковский, Г. Г. Арунянц // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – Калининград, 2013. – Вып. 4. – С. 24–33.

УДК 621.91.02

Е. Г. Крылов<sup>1</sup>, А. М. Макаров<sup>1</sup>, Н. В. Козловцева<sup>2</sup>, А. В. Капитанов<sup>2</sup>

### ВЫЯВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТАБЛИЦ РЕШЕНИЙ

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет<sup>2</sup>Московский государственный технологический университет «Станкин»E-mail: <sup>1</sup>app@vstu.ru; <sup>2</sup>a.kapitanov@stankin.ru

Представление работы многоцелевого станочного оборудования в виде таблицы решений позволяет упростить выявление критических состояний при функционировании инструментальных систем.

*Ключевые слова:* таблицы решений, производственная модель, формализация, контроль состояния.

CNC production center work can be described in terms of decision tables what provides an opportunity to simplify the criticality identification in instrumental systems.

*Keywords:* decision tables, production model, formalization, condition control.

Многоцелевое станочное оборудование (МСО) представляет собой сложную технологическую систему, оперативное управление которой является нетривиальной задачей [1].

Обобщенная структура инструментальной системы (ИС) МСО содержит следующие модели:  $M_1$  – функционирования инструментальной системы;  $M_2$  – внешней среды;  $M_3$  – взаимодействия и настройки моделей  $M_1$  и  $M_2$  (рис. 1).

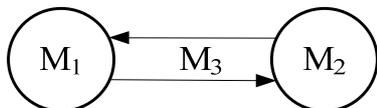


Рис. 1. Взаимодействие моделей ИС МСО

Знания, содержащиеся в модели  $M_1$ , позволяют описывать идеальное функционирование ИС МСО без учета воздействия со стороны внешней среды. Внешняя среда и факторы ее воздействия на ИС МСО описываются в модели  $M_2$ . Модель  $M_1$  в свою очередь также может воздействовать на модель  $M_2$ . Например, аварийная ситуация побуждает внешнюю среду к применению мер по устранению такой ситуации. Взаимодействие моделей  $M_1$  и  $M_2$  осуществляется с помощью модели  $M_3$ .

Рассмотрим задачу обеспечения нормального функционирования сложной системы для достижения поставленных перед ней целей и обеспечения заданных критериев и ограничений. Важной частью поставленной задачи является выявление критических предаварийных состояний системы, под которыми понимаются состояния, относимые в текущий момент времени к допустимым, но в которых уже в следующий момент времени система может перейти

в состояние, выходящее за рамки заданных требований. В частности, если состояние ИС МСО описывается набором значений некоторых признаков, то в критических состояниях один или более признаков имеют значения на границе допустимой области. При выявлении критических состояний необходимо скорректировать функционирование ИС МСО, т. е. изменить в модели  $M_1$  ряд правил с помощью модели  $M_3$ .

Для представления знаний, хранящихся в моделях  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$ , предлагается использовать системы продукции (производственные модели представления знаний). Продукция представляет собой правило вида (состояние → приемлимое решение), где левая часть является условием применимости правила, а правая определяет действие, производимое при выполнении условия применимости. В зависимости от предметной области и назначения автоматизированной системы продукции могут интерпретироваться так же как (посылка → заключение) или (ситуация → действие). Использование продукции типа (состояние → приемлимое решение) характерно для автоматизации процессов принятия решений. Например, модуль контроля состояния режущего инструмента может содержать следующие продукции:

1) размер обрабатываемой поверхности находится в поле допуска ( $C_2$ ) и высота микронеровностей обрабатываемой поверхности не больше заданного значения ( $C_3$ ) → продолжение обработки без изменений ( $A_1$ );

2) размер обрабатываемой поверхности находится в поле допуска ( $C_2$ ) и высота микронеровностей обрабатываемой поверхности не больше заданного значения ( $C_3$ ) и сигнал с датчика

крутящего момента свидетельствует о достижении области пороговых значений износа инструмента ( $C_4$ ) → коррекция режимов обработки ( $A_2$ ) [4];

3) сигнал с датчика термоЭДС свидетельствует о возникновении критического состояния инструмента (наличие скола режущей пластины) ( $C_1$ ) и размер обрабатываемой поверхности находится в поле допуска ( $C_2$ ) → замена инструмента ( $A_3$ ).

Знания о функционировании сложной системы, управлении ею и другая существенная для принятия решений информация поступают от специалистов-экспертов [2,3]. Непосредственная запись информации в виде приведенных ранее продукций неудобна, так как затруднительна ее проверка на корректность – полноту и непротиворечивость. Полнота информации в данном случае – это наличие принимаемого решения для любого возможного состояния системы. Непротиворечивость – однозначность принимаемого решения при любом состоянии. Кроме того, при записи информации в виде набора продукций не определен алгоритм поиска выполнимой продукции для текущего состояния.

Во избежание отмеченных недостатков предлагается реализация продукционной модели на языке таблиц решения (ТР), относящегося к классу формальных неалгоритмических языков и позволяющего в простой и наглядной форме описывать логику многих задач, связанных с принятием решений. К преимуществам языка ТР относится также возможность автома-

тизации процессов проверки корректности описания, оптимизации и трансляции его в программное обеспечение. Описание процесса принятия решений осуществляется с помощью одной или совокупности взаимосвязанных ТР, каждая из которых представляет фрагмент знаний в виде набора продукций [5,6].

Рассмотрим приведенный ранее набор продукций по контролю состояния режущего инструмента. Соответствующая ему ТР приведена на рисунке 2(a).  $C_1$ – $C_4$  обозначают условия, выполнимость или невыполнимость которых отмечается символами «Д» или «Н» соответственно.  $A_1$ – $A_3$  обозначают действия (принимаемые решения), осуществляемые при выполнении (или невыполнении) указанных условий и их сочетаний. Для данной ТР условия действия имеют следующую интерпретацию:  $C_i =$  (технологическая информация),  $i = 1,2,3,4$ ;  $A_j =$  (управляющее действие),  $j = 1,2,3$ .  $P_1$ – $P_3$  описывают правила решений, представляющие продукции. Так, правило  $P_1$  означает «если выполнены условия  $C_1$  и  $C_2$ , то осуществить действие  $A_1$ ». Выполнение действий отмечается единицей. Условия полноты и непротиворечивости описания применительно к ТР определяются формулами

$$(\forall s \exists P_j)(s \rightarrow P_j) \text{ и}$$

$$(\forall s, P_j, P_k)((s \rightarrow P_j) \wedge (s \rightarrow P_k) \Rightarrow (A_j = A_k)),$$

где  $s$  – состояние управляемой системы,  $s \in S$  – множество допустимых состояний;  $P_j, P_k$  – правила решений;  $A_j, A_k$  – решения принимаемые при выполнении правил  $P_j$  и  $P_k$ .

	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$C_1$			Д
$C_2$	Д	Д	Д
$C_3$	Д	Д	
$C_4$	Д		
$A_1$	1		
$A_2$		1	
$A_3$			1

а

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	Е
$C_1$	Н	Н	Д	
$C_2$	Д	Д	Д	
$C_3$	Д	Д	Н	
$C_4$	Д	Н	Н	
$A_1$	1			
$A_2$		1		
$A_3$			1	
$A_4$				1

б

Рис. 2. Таблицы решений для ИС МСО:  
а – исходная; б – скорректированная

Исходное описание противоречиво, если возможно одновременное выполнение всех ус-

ловий, и неполно, так как, например, в случае отсутствия сигналов датчиков или наличия

сигнала только с одного датчика действия не определены. Табличную модель, следовательно, необходимо скорректировать. Скорректированная ТР приведена на рис. 2, б. Действие  $A_4$  интерпретируется как аварийная ситуация, а правило Е означает, что для всех состояний, не удовлетворяющим правилам  $P_1$ ,  $P_2$  или  $P_3$ , выполняется действие  $A_4$ . Скорректированная ТР может быть построена автоматически, если задать логические отношения между условиями исходной ТР. Например, для ТР на рис. 2, б логические отношения между условиями  $C_1$ – $C_4$  описываются следующими формулами исчисления предикатов для правил  $P_1$ – $P_3$ :

$$C_1 \wedge C_2 \Rightarrow \neg C_3; \quad C_1 \wedge C_2 \Rightarrow \neg C_4;$$

$$C_2 \wedge C_3 \wedge C_4 \Rightarrow \neg C_1; \quad C_1 \wedge C_3 \wedge C_4 \Rightarrow \neg C_2.$$

Обнаружение противоречивости и неполноты непосредственно в наборе продукций намного труднее.

При функционировании МСО в переменных производственных условия система может оказаться в состоянии, когда неприменима ни одна из продукций. В таких ситуациях необходимо распространить имеющиеся в модели знания на новые состояния, например, заменяя

константы в левой части продукции на предметные переменные.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крылов, Е. Г. Повышение эффективности функционирования инструментальных систем автоматизированного станочного оборудования: монография / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев; ВолгГТУ. – Волгоград; Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии (ТНТ), 2016. – 316 с.
2. Автоматизированная система выбора технологических решений для оборудования с ЧПУ / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, А. Б. Мишкевич, В. В. Литвинцева // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 67–69.
3. Крылов, Е. Г. Формализация процедуры многокритериального выбора режущего инструмента в АСПП / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев // СТИН. – 2015. – № 3. – С. 5–9.
4. 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.
5. Капитанов, А. В. Особенности исследования самоорганизующихся адаптивных систем / А. В. Капитанов // Вестник МГТУ Станкин. – 2016. – № 4 (39). – С. 109–112.
6. Капитанов, А. В. Представление знаний в информационной системе технологической подготовки машиностроительного предприятия / А. В. Капитанов // Вестник МГТУ Станкин. – 2013. – № 3 (26). – С. 83–87.

УДК 621.783.223:681.515.4

*М. П. Кухтик, А. М. Макаров, И. А. Харитонов, С. П. Генералов*

#### РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ ПИ-РЕГУЛЯТОРА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрена методика расчета оптимальных параметров настройки ПИ-регуляторов по частотному показателю колебательности, а также с помощью вспомогательной функции. По данной методике рассчитаны оптимальные значения коэффициентов настройки ПИ-регуляторов зон методической нагревательной печи.

*Ключевые слова:* методическая печь, ПИ-регулятор, параметр настройки, частотный показатель колебательности.

Estimation technique of PI-controllers' optimal tuning parameters by frequency oscillation index and with the help of auxiliary function as well has been considered. Optimal values of tuning coefficients for proportional-integral controllers of continuous reheating furnace zones have been calculated by means of this technique.

*Keywords:* continuous furnace, PI-controller, tuning parameter, frequency oscillation index.

К системам автоматического управления в промышленности предъявляются особые требования по работоспособности. Прежде всего они должны обладать определенным запасом устойчивости, т. е. переходные процессы, возникающие в них, должны затухать достаточно интенсивно. Методические печи, предназна-

ченные для нагрева заготовок перед обработкой давлением, работают в переходных режимах большую часть времени [1, 2]. Поэтому определение оптимальных параметров настройки регуляторов зон печей должно производиться с оценкой запаса устойчивости системы. Мерой запаса устойчивости прием частотный показа-

тель колебательности контура, т. е. относительное значение резонансного пика комплексной частотной характеристики (КЧХ) [3].

В качестве объекта управления выбрана методическая печь стана 2000 АО «ВМК «Красный Октябрь» [4]. Определим оптимальные значения коэффициентов настройки пропорционально-интегральных регуляторов для отапливаемых зон печи – первой сварочной, второй сварочной и томильной.

Параметры первой сварочной зоны, аппроксимированной характеристикой апериодического звена второго порядка с последовательно включенным звеном запаздывания, были определены ранее [5, 6]: постоянная времени  $T_{\text{мод}} = 2,2$  мин, запаздывание  $\tau_{\text{мод}} = 1,486$  мин и коэффициент передачи  $k_{\text{мод}} = 0,872$ .

Оптимальные значения параметров настройки интегральных регуляторов методической печи были рассчитаны в работах [5, 6]. Отличие рассматриваемой методики состоит в том, что ПИ-регулятор имеет два параметра настройки – постоянную времени интегрирования  $T_{\text{и}}$  и коэффициент передачи  $k_{\text{п}}$ . Построение границы области требуемого запаса устойчивости начинается с того, что следует задать некоторое значение  $T_{\text{и}}$ . Далее на одной и той же плоскости строится КЧХ разомкнутого контура для единичного значения  $k_{\text{п}} = 1$  и окружность с центром на отрицательной вещественной полуоси на расстоянии  $u$  от начала координат с радиусом, определяемым формулой [3]:

$$r = u / M. \tag{1}$$

Координата центра  $u$  подбирается таким образом, чтобы  $M$ -окружность касалась КЧХ разомкнутого контура. При значениях частотного показателя колебательности  $M = 1,8$ , что соответствует степени затухания колебаний  $\psi = 0,85$  в колебательном звене, и постоянной времени интегрирования  $T_{\text{и}} = 1,12$  в среде MathCAD рассчитан предельный коэффициент передачи ПИ-регулятора для первой сварочной зоны.

На рис. 1 построена КЧХ разомкнутого контура при единичном  $k_{\text{п}}$  (кривая 1) и касающаяся ее  $M$ -окружность (кривая 2). На этом рисунке  $q(\omega)$  и  $q_m(\omega, u)$  – мнимые составляющие КЧХ и  $M$ -окружности соответственно, а  $p(\omega)$  и  $p_m(\omega, u)$  – их вещественные составляющие. В результате подбора положения центра окружности получено значение  $u = 4,38$ .

Затем рассчитывается значение коэффициента передачи регулятора по формуле [3]:

$$k_{\text{п}} = \frac{M^2}{(M^2 - 1) \cdot u}. \tag{2}$$

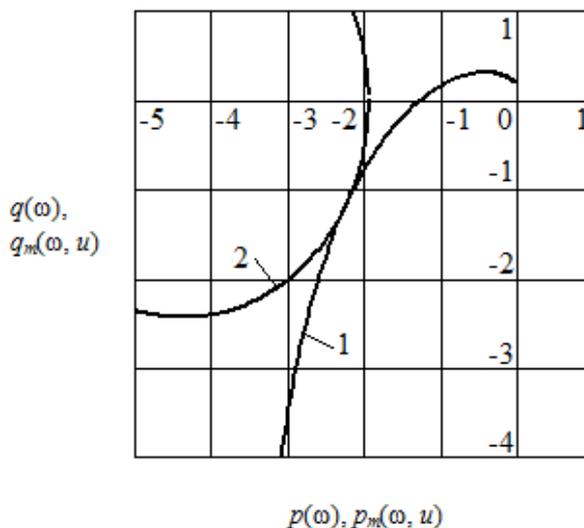


Рис. 1. КЧХ разомкнутого контура и  $M$ -окружность

Из выражения (2) получено значение  $k_{\text{п}} = 0,33$ . В результате расчетов по данной методике для регуляторов второй сварочной и томильной зон получены значения коэффициентов передачи 0,325 и 0,26 соответственно.

Найти предельное значение  $k_{\text{п}}$  при заданном  $T_{\text{и}}$  можно, ориентируясь непосредственно на график амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутого контура, резонансный пик которого должен принять заданное значение [3, 7]. На рис. 2 построена АЧХ замкнутого контура (кривая) и заданное значение показателя колебательности (прямая). Резонансный пик АЧХ достиг заданного значения, следовательно, предельные значения параметров настройки ПИ-регулятора найдены.

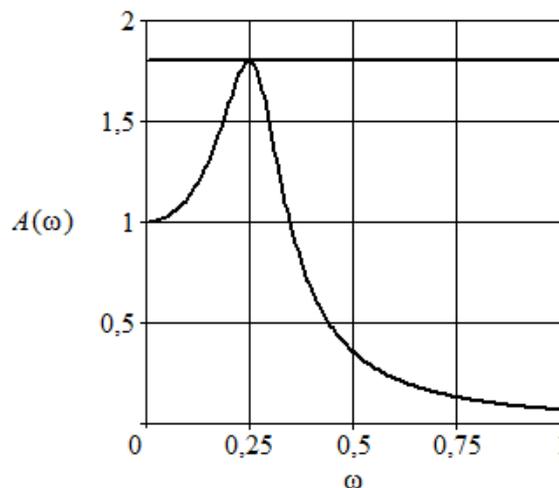


Рис. 2. АЧХ замкнутого контура

Если критерием оптимальности принят линейный интегральный показатель, расчет мо-

жет быть выполнен без построения границы области заданного запаса устойчивости. Вместо этого следует построить график вспомогательной функции по формуле [3]:

$$F(\omega) = -\frac{\omega M [M \sin \phi_{\mu}(\omega) + 1]}{(M^2 - 1) \cdot A_{\mu}(\omega)}. \quad (3)$$

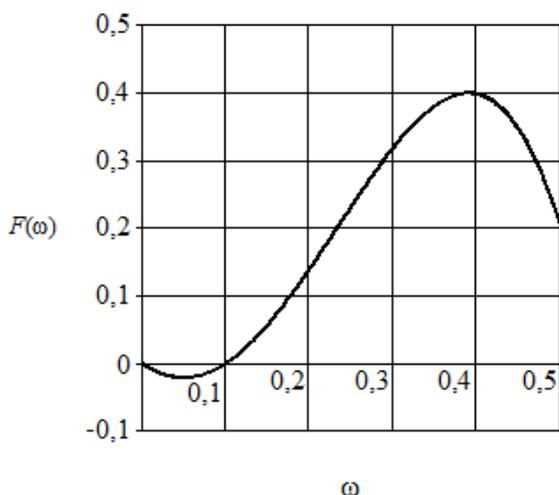


Рис. 3. Вспомогательная функция

Первый положительный максимум функции  $F(\omega)$  определяет максимум отношения  $k_{п}/t_{и}$ , а частота, при которой он имеет место, – резонансную частоту контура. По графику на рис. 3 определяется положение максимума вспомогательной функции:  $\omega_{рез} = 0,252$  при  $F(\omega) = 0,224$ . Оптимальные значения  $k_{п}$  и  $t_{и}$  рассчитываются по формулам [3]:

$$k_{п.опт} = -\frac{M^2 \cos \phi_{\mu}(\omega_{рез})}{(M^2 - 1) \cdot A_{\mu}(\omega_{рез})};$$

$$T_{и.опт} = \frac{k_{п.опт}}{F(\omega_{рез})}, \quad (4)$$

где  $\omega_{рез}$  – частота максимума функции  $F(\omega)$ , совпадающая с частотой резонанса системы при оптимальной ее настройке;  $A_{\mu}(\omega)$ ,  $\phi_{\mu}(\omega)$ ,  $A_{\mu}(\omega_{рез})$ ,  $\phi_{\mu}(\omega_{рез})$  – АЧХ и ФЧХ объекта и их значения при частоте максимума вспомогательной функции.

Из выражений (4) получены значения  $k_{п} = 1,202$  и  $t_{и} = 3,017$ . Заметим, что если искать значение  $k_{п}$  при заданном  $t_{и} = 3,107$  по методи-

ке без вспомогательной функции, то оно будет равным 1,202. Это означает, что проверка работоспособности обеих методик осуществлена успешно.

Для этих значений параметров настройки также была построена АЧХ замкнутого контура, резонансный пик которой принял заданное значение показателя колебательности, следовательно, данные значения являются предельными.

В результате расчетов  $k_{п}$  и  $t_{и}$  по данной методике для регулятора второй сварочной зоны получены значения 1,114 и 2,878 соответственно, а для регулятора томильной зоны – 0,947 и 3,018 соответственно.

Проведенный расчет оптимальных параметров настройки ПИ-регуляторов зон позволит устойчиво и без статической ошибки регулировать процесс нагрева заготовок в методических печах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердобинцев, Ю. П. Efficient Batching Algorithm for Charging Slabs into a Continuous Furnace / Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик, А. М. Макаров // Metallurgist. – 2014. – Vol. 58, No. 1–2 (May). – С. 125–129.
2. Serdobintsev, Y. P. Algorithm of optimal modes calculation for slab heating in a continuous furnace / Y. P. Serdobintsev, M. P. Kukhtik // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2014. – No. 2. – Mode of access : <http://www.science-sd.com/457-24551>
3. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учебник для вузов / В. Я. Ротач. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
4. Комплектование садки слябов методической печи в условиях информационно-технологической среды / М. П. Кухтик, С. П. Генералов, И. А. Харитонов, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 (184) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 70–72.
5. Оценка запаса устойчивости системы управления методической печью по частотному показателю колебательности / М. П. Кухтик [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (156) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 13). – С. 61–63.
6. Сердобинцев, Ю. П. Stability factor estimation of heating control system in a continuous furnace [Electronic resource] / Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2015. – No. 2. – URL : <http://www.science-sd.com/461-24941>
7. Кухтик, М. П. Настройка робастного регулятора методической печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев, М. А. Круглов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 59–61.

УДК 621.798.34

*О. В. Мушкин, А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, М. А. Лапиков***СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ\*****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

Разработана структурно-функциональная схема системы автоматического дозирования сыпучих материалов, содержащая питатель для равномерной и регулируемой подачи сыпучего материала, измерительное устройство для измерения параметров дозирования и устройство управления подачей для контроля процесса дозирования. Проанализировано влияние свойств различных сыпучих материалов на структуру системы автоматического дозирования. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем автоматического дозирования на линиях расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

*Ключевые слова:* расфасовка, дозирование, гибкий контейнер, структурно-функциональная схема.

Developed structural-functional scheme of automatic dosing of bulk materials containing feeder for uniform and regulated feed of loose material, a measuring device for measuring parameters of the measuring and control device serving to control the dispensing process. The influence of properties of various bulk materials to the structure of the system of automatic dosing. The obtained results can be used in the design of systems of automatic dosing on the lines of packing bulk material in flexible containers.

*Keywords:* bagging, dosing, flexible container, a structural-functional diagram.

При порционном и непрерывном дозировании материалов приходится сталкиваться с определенными трудностями выдачи материалов из бункеров. Особенно затруднена выдача сыпучих и вязких материалов. Это связано с тем, что в отличие от жидкостей сыпучие и вязкие материалы по-разному ведут себя при загрузке и выгрузке. Если загрузка достаточно проста, то выгрузка вызывает большие сложности, связанные с свойствами сыпучего материала.

Различные сыпучие материалы имеют индивидуальные свойства, от которых зависит выбор элементов дозирующей системы.

Основными свойствами сыпучего материала являются:

1) химические свойства, такие как реакционная способность, коррозионная активность, токсичность, воспламеняемость, взрывоопасность, растворимость и др.;

2) физические свойства – плотность, форма, размер и удельная поверхность частиц, силы адгезии и когезии т. д.;

3) технологические свойства – насыпная плотность, степень сжатия, коэффициент уплотнения, сыпучесть, угол естественного откоса, влажность, коэффициент вибрационного уплотнения, гранулометрический состав и др.;

4) механические и реологические свойства, которые определяются поведением сыпучего материала в процессе деформации и в моменты

разрушения, характеризуя его упругость, пластичность и прочность.

На основе анализа принципиальных схем дозаторов можно выделить модульный принцип их построения, при котором любой дозатор содержит три класса модулей: питатели, измерительные устройства (ИУ) и устройства управления подачей материала (УУП).

В основу разработки таких устройств может быть положен структурно-функциональный подход, при котором техническую систему (ТС) можно разделить на несколько основных функциональных элементов, взаимосвязанных между собой и выполняющих определенные функции.

Составим таблицу анализа функций типовой схемы устройств дозирования. Для этого разделим данную ТС на элементы. Выделим главные элементы, обозначим их  $E$ , и объекты окружения, обозначим  $V$ . Определим функции  $f$  каждого элемента системы, а результаты сведем в таблице.

На основе данных таблицы составим структурно-функциональную схему устройства дозирования и подачи сыпучего материала в гибкий контейнер (рис. 1).

Конструкция питателя обусловлена главным образом материалом, подача которого осуществляется, и характером движения рабочего органа, выбираемым исходя из требований по точности и производительности дозирования.

© Мушкин О. В., Макаров А. М., Сердобинцев Ю. П., Лапиков М. А., 2017

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

## Анализ функций системы дозирования и подачи сыпучих материалов

Элемент		Функция	
Обозначение	Наименование	Обозначение	Описание
$E_1$	Питатель	$f_1$	Подача сыпучего материала, передает сыпучий материал ( $V_1$ ) к УУП ( $E_2$ )
$E_2$	Устройство управления питателем (УУП)	$f_2$	Управление потоком материала ( $V_1$ ) к устройству подачи ( $E_4$ ).
$E_3$	Измерительное устройство	$f_3$	Контроль выгруженной массы материала ( $V_1$ ) из питателя ( $E_1$ ) через УУП ( $E_2$ ) с возможностью корректировки
$E_4$	Устройство подачи	$F_4$	Загружает сыпучий материал в гибкий контейнер ( $V_2$ )

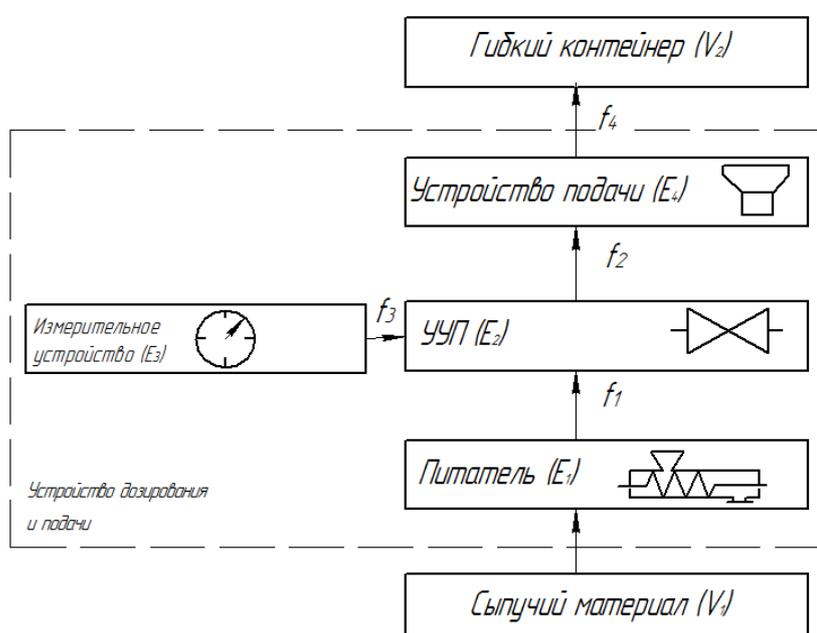


Рис. 1. Структурно-функциональная схема устройства дозирования и подачи сыпучего материала

На рис. 2 приведены принципиальные схемы наиболее распространенных типов питателей. Для перемещения материала в питателях используются гравитационные силы, а также силы, развиваемые приводами. В последнем случае материалу может сообщаться как прямолинейное, так и криволинейное движение. Для перемещения материала используются также тепловая энергия (испарители) и энергия электрического тока (электролитические ячейки).

Наиболее простым конструктивно и распространенным является гравитационный тип питателей (рис. 2, а) представляющих собой бункер, загружаемый материалом, с отверстием, через которое под действием гравитации выгружается материал.

Шлюзовые (секторные) питатели (рис. 2, б) предназначены для выдачи порошкообразных и мелкозернистых хорошо сыпучих материалов. Такие питатели имеют вращающийся барабан, разделенный радиальными стенками в общем случае на несколько отсеков. Выдача материала обеспечивается за счет поочередного заполнения и опорожнения отсеков в процессе вращения.

Шнековые питатели (рис. 2, в) предназначены для выдачи порошкообразных и мелкодисперсных материалов. Подобную конструкцию имеют червячные и винтовые питатели, применяемые для вязкоупругих и жидких материалов.

Тарельчатые питатели (рис. 2, г) предназначены для выдачи из бункеров преимущественно

мелкозернистых и мелкокусковых материалов при повышенных температурах.

Лотковые вибропитатели (рис. 2, *д*) применяются для подачи разнообразных материалов. Движение материала по наклонному лотку обеспечивается за счет создания колебаний, направленных под некоторым углом к лотку.

В качестве приводов лотковых питателей используются механизмы, обеспечивающие возвратно-поступательное движение.

Ленточные питатели (рис. 2, *е*) предназначены для выдачи мелкозернистых, мелкокусковых и крупнокусковых материалов при температуре до 100 °С.

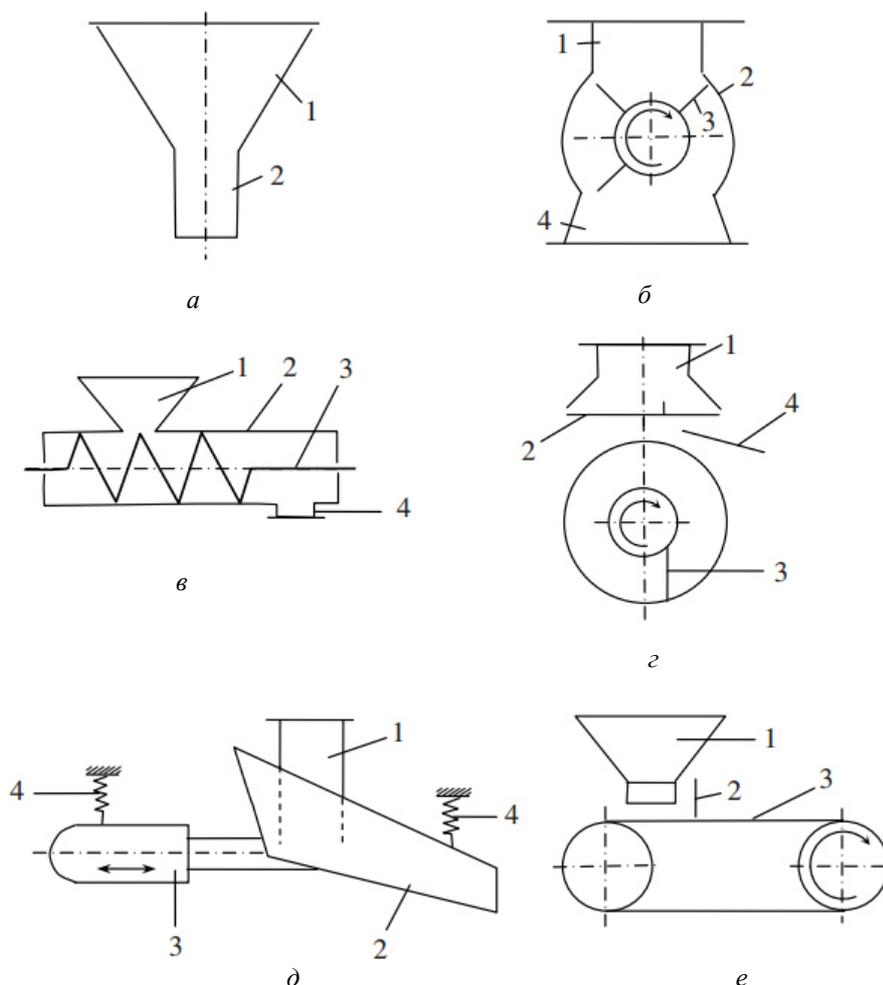


Рис. 2. Принципиальные схемы питателей:

*а* – гравитационный питатель (*1* – бункер, *2* – выпускной патрубков); *б* – шлюзовой питатель (*1* – впускной патрубков, *2* – корпус, *3* – ротор, *4* – выпускной патрубков); *в* – шнековый питатель (*1* – впускной патрубков, *2* – корпус, *3* – шнек, *4* – выпускной патрубков); *г* – тарельчатый питатель (*1* – корпус, *2* – тарель, *3* – нож, *4* – лоток); *д* – лотковый питатель (*1* – впускной патрубков, *2* – лоток, *3* – вибродвигатель, *4* – пружинная подвеска); *е* – ленточный питатель (*1* – бункер, *2* – заслонка, *3* – ленточный транспортер)

Измерительные устройства подразделяются на преобразователи силы, манометры, уровнемеры, расходомеры, интеграторы и счетчики импульсов [8]. Выбор конкретного вида ИУ осуществляется в зависимости от типа дозирования (назначение, критерий дозирования, способ дозирования, степень автоматизации); свойств материала; допускаемой погрешности дозирования и измерения в процессе дозирования; предполагаемого расхода или производительности и т. д.

Выбор того или иного УУП обусловлен типом используемого питателя. В УУП используется широкая номенклатура электро-, пневмо- и гидроавтоматики, электронные устройства коммутирования и программирования.

Управляемые приводы вращения [7] представляют собой управляемые электродвигатели, неуправляемые электродвигатели с редуктором или вариатором, или управляемый гидравлический привод.

В дозирующих системах наибольшее рас-

пространение получили лобовые вариаторы с биконическими роликами, вариаторы с коническими барабанами, торовые и соосные многодисковые вариаторы, а также клиноременные вариаторы с раздвижными шкивами.

Гидравлический привод в автоматизированных системах дозирования применяется в качестве привода исполнительного механизма регулятора (главным образом, силовые гидроцилиндры) или в качестве вариатора скорости для автоматического управления (регулирования) приводом главного движения (гидрвариаторы) [5].

Не менее важными устройствами управления подачей материала являются регуляторы расхода, которые делятся на бесступенчатые и ступенчатые (дискретные).

Структурно-функциональный анализ устройств дозирования и подачи сыпучих материалов показывает, что для построения систем автоматического дозирования рационально использовать модульный принцип, при этом проектирование отдельных модулей, а также их комплектование в готовую систему необходимо вести с учетом свойств и специфики данного сыпучего материала (или группы материалов со схожими свойствами), а также вида, особенностей, прочностных и других свойств расфасовочной тары, применяемой для упаковки этих материалов [3, 6].

Полученные результаты, в совокупности с анализом устройств для манипулирования мягкой тарой [2, 4] могут быть использованы при проектировании систем автоматического дозирования и упаковки сыпучих материалов на автоматизированных линиях их расфасовки [1, 4, 9, 10].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерное моделирование процесса расфасовки сыпучих материалов в открытую мягкую тару / А. М. Макаров, В. Ф. Кучинский, О. В. Мушкин, М. А. Лапиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 79–81.
2. Конструктивно-функциональный анализ и разработка захватных устройств для гибких контейнеров / А. М. Макаров, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (156) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 63–66.
3. Макаров, А. М. Автоматизация процесса наполнения мягкой расфасовочной тары сыпучим материалом / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев // Современные проблемы науки и образования, 2011. – № 6; URL: www.science-education.ru/100-5113 (дата обращения: 04.02.2017).
4. Макаров, А. М. Автоматическая расфасовка сыпучих материалов в мягкую тару. Повышение эффективности процесса / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев. – Саарбрюккен : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 128 с.
5. Наземцев, А. С. Гидравлические и пневматические системы / А. С. Наземцев. – Москва : «Форум», 2004. – 240 с.
6. Сердобинцев, Ю. П. Повышение качества предпроектной подготовки процесса фасовки сыпучих материалов в условиях информационно-технологической среды / Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 4. – С. 48–50.
7. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока : учеб. пособ. (гриф) / А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 190 с.
8. Шаранов, В. М. Датчики : справ. пособ. / под общ. ред. В. М. Шаранова, Е. С. Полищука. – Москва : «Техносфера», 2012. – 624 с.
9. Makarov, A. M., Rabinowich L. A.: Automatyizacja dozowania materialow sypkich do malo sztywnych opakowan / MECHANIKA // Technika i technologia montazu maszyn. Kwartalnik 83 (nr1/2011). Rzeszow, Polska.
10. Transfer Machine Line for Packaging Granular Materials in a Soft Open Container A. M. Makarov, Y. P. Serdobintsev, M. P. Kuhtik. Journal of Applied Packaging Research (JAPR) Vol. 6, №4, pp. 203–209, October 2012, DEStech Publication, Inc.

УДК 681.515

*Е. В. Николаев, А. Г. Алехин*

#### НАСТРОЙКА ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

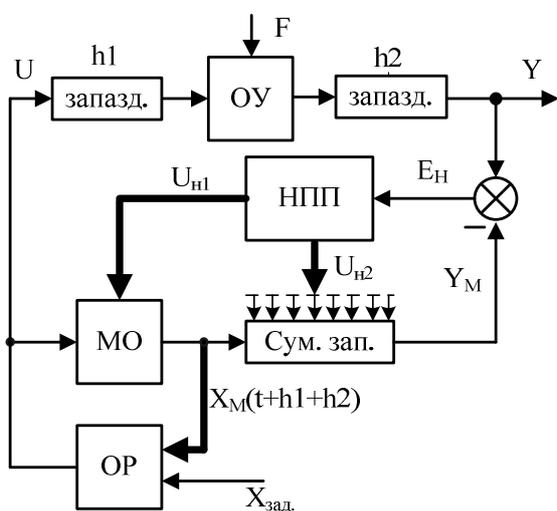
Рассмотрен метод построения регулятора для объекта с запаздыванием с использованием наблюдателя полного порядка для формирования упрежденных координат вектора состояния объекта.

*Ключевые слова:* объект с запаздыванием, наблюдатель полного порядка, вектор состояния объекта.

The method of constructing a regulator for the object with delay with a full order observer for the formation of pre-emption of the coordinates of an object's state.

*Keywords:* object with delay, full-order observer state vector object.

Как известно, одним из подходов к построению систем управления при неполной информации об объекте является введение в структуру регулятора наблюдающего устройства, предназначенного для восстановления всех (наблюдатель полного порядка) или недостающих (наблюдатель пониженного порядка) координат вектора состояния объекта. Для управления объектами второго порядка с запаздыванием предлагается использовать наблюдатель полного порядка для формирования упрежденных координат вектора состояния объекта. Это можно осуществить, если в схеме с наблюдателем переместить суммарное запаздывание за динамическую часть модели объекта, так, как это показано на рисунке.



Обобщенная структурная схема регулятора с наблюдателем для объекта с запаздыванием

На рис. обозначены: НПП – наблюдатель полного порядка, МО – модель объекта, ОР – оптимальный регулятор, ОУ – объект управления.

Соответствие движений в модели и объекте достигается за счет использования статического или астатического наблюдателя полного порядка. Формирование управляющего сигнала ведется по сигналам с модели объекта без за-

паздывания. Это приводит к тому, что повышается быстродействие и точность регулирования в контуре «МО – ОР», и, как следствие, улучшается качество управления во всей системе регулирования. Необходимо заметить, что наряду с получением упрежденного выхода мы получаем и значения оценок недоступных для измерения упрежденных координат вектора состояния объекта. Это позволяет применить более совершенные по структуре линейный или оптимальный по быстродействию регулятор состояния.

Для объектов со значительным уровнем возмущений следует применять астатический наблюдатель (АНПП), формирующий оценку действующего на объект возмущения и полностью его компенсирующий.

Если в выходном сигнале объекта присутствует шум, то наблюдатель может выполнять также фильтрующие функции, обеспечивая получение оценок сигналов и с малой дисперсией (шумовой составляющей).

Реализацию предложенной структуры системы управления объектом с запаздыванием удобнее вести в цифровом виде, ориентируясь на использование микропроцессорных регулирующих контроллеров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазуров, В. М. Модальные регуляторы для промышленных объектов с запаздыванием / В. М. Мазуров, А. Е. Мерцалов // Автоматизация в промышленности / Издательский дом «ИнфоАвтоматизация». – Москва, 2006. – № 9. – С. 41–46.
2. Мазуров, В. М. Расчет модальных цифровых регуляторов для объектов с запаздыванием : учеб. пособие / В. М. Мазуров, В. С. Карпов. – Тула : Тул. гос. техн. ун-т, 1995. – 65 с.
3. Клюев, А. С. Синтез быстродействующих регуляторов для объектов с запаздыванием / А. С. Клюев, В. С. Карпов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
4. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Папов. – М. : Наука, 1997. – 768 с.

УДК 621.757:519.87

С. Г. Поступаева, И. Е. Грязнов

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА  
ДЛЯ НАСТРОЙКИ ПИ-РЕГУЛЯТОРА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Статья посвящена анализу и сравнению различных алгоритмов нечеткого вывода для настройки ПИ-регулятора применительно к одному объекту управления. Результаты показали высокую эффективность использования метода настройки с помощью алгоритма нечеткого вывода Сугено.

*Ключевые слова:* регулятор, алгоритм нечеткого вывода, метод настройки.

This article is devoted to analysis and comparison of different algorithms fuzzy logic for tuning PI-regulator for one control object. The results showed high effectiveness of the method setup using the algorithm of fuzzy inference Sugeno.

*Keywords:* controller, algorithm for fuzzy output, method setup.

В настоящее время широко применяются системы автоматизации и промышленные регуляторы. В автоматизированных системах управления технологическими процессами наиболее часто встречающимся регулятором является пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор). Использование ПИ-регулятора в системе управления позволяет повысить быстродействие и точность. Однако это может быть достигнуто только при оптимальных настройках регулятора. Поэтому при разработке систем автоматического регулирования (САР) одной из основных задач является адекватная настройка параметров ПИ-регулятора. Существует большое количество методов настройки ПИ-регуляторов [1, 2], однако многие из них либо чрезмерно трудоемки, либо не обладают необходимой точностью. Как правило, применение этих методов позволяет обеспечить устойчивость системы управления, но не гарантирует ее качественную работу. Поэтому важно не только корректно настроить ПИ-регулятор, но и выбрать наиболее подходящий для данного объекта управления метод настройки.

В последнее время широкую популярность находят нечеткие модели и алгоритмы управ-

ления. Одним из научных направлений в данной области является нечеткая коррекция настроек ПИ-регулятора по анализу качества переходных процессов [3].

Нечеткий логический вывод осуществляется за следующие четыре этапа: фазификация, логический вывод, композиция и дефазификация (приведение к четкости). Существует четыре классических алгоритма нечеткого вывода: Мамдани, Сугено, Цукамото, Ларсена. В настоящей работе будет проведен сравнительный анализ алгоритмов нечеткого вывода.

В качестве объекта управления взят объект с передаточной функцией [4]:

$$W(p) = \frac{K_{ob}}{(T_{ob}p + 1)^n} e^{-\tau p},$$

где  $K_{ob} = 0,43$ ;  $T_{ob} = 3,9$ ;  $\tau = 0,52$ ;  $n = 3$ .

Исходная система автоматического управления имеет вид, представленный на рисунке.

Предположим, что значения  $K_{ob}$  и  $T_{ob}$  изменяются до 60% случайным образом в течение времени. Таким образом, объект управления имеет следующий разброс параметров:

$$0,28 = K_{ob\_min} \leq K_{ob\_sr} = 0,45 \leq K_{ob\_max} = 0,72$$

$$2,43 = T_{ob\_min} \leq T_{ob\_sr} = 3,9 \leq T_{ob\_max} = 6,24.$$

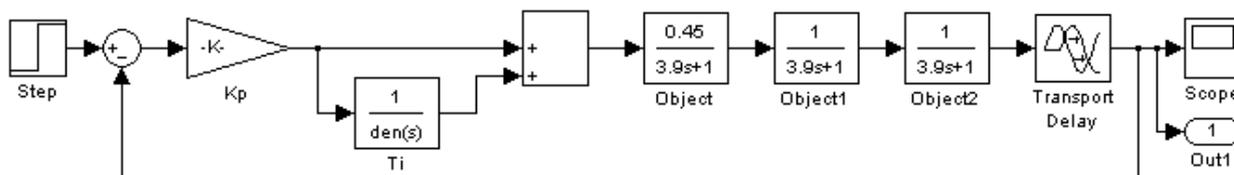


Схема САУ

В связи с тем, что для данного объекта управления отсутствуют рекомендации экспертов-наладчиков, попробуем составить рекомендации исходя из опытных данных. Запишем в табл. 1 значения коэффициента усиления  $K_p$

и постоянной интегрирования  $T_i$  ПИ-регулятора, необходимые для обеспечения заданных параметров качества переходного процесса САУ ( $A_{max}=1,05$  и  $t_p=40$  с), полученных при девяти парах значений  $K_{ob} - T_{ob}$ .

Таблица 1

Kob	Tob																
mal	mal	mal	bol	bol	mal	bol	bol	sr	sr	sr	mal	sr	bol	mal	sr	bol	sr
0,28	2,43	0,28	6,24	0,72	2,43	0,72	6,24	0,43	3,9	0,43	2,43	0,43	6,24	0,28	3,9	0,72	3,9
Kp	Ti																
1,5	4,35	2,6	8,3	1,75	10	1	8,39	3	12,5	2,7	9,8	1,7	8,35	4,5	12,5	1,55	11,6

База знания разработана на основе анализа данных табл. 1.

- 1) Если  $K_{ob} = mal$  и  $T_{ob} = mal$ , Тогда  $K_p = neb$  и  $T_i = mal$ ;
- 2) Если  $K_{ob} = mal$  и  $T_{ob} = bol$ , Тогда  $K_p = sr$  и  $T_i = neb$ ;
- 3) Если  $K_{ob} = bol$  и  $T_{ob} = mal$ , Тогда  $K_p = neb$  и  $T_i = sr$ ;
- 4) Если  $K_{ob} = bol$  и  $T_{ob} = bol$ , Тогда  $K_p = mal$  и  $T_i = neb$ ;
- 5) Если  $K_{ob} = sr$  и  $T_{ob} = sr$ , Тогда  $K_p = sr$  и  $T_i = bol$ ;
- 6) Если  $K_{ob} = sr$  и  $T_{ob} = mal$ , Тогда  $K_p = sr$  и  $T_i = sr$ ;
- 7) Если  $K_{ob} = sr$  и  $T_{ob} = bol$ , Тогда  $K_p = neb$  и  $T_i = neb$ ;
- 8) Если  $K_{ob} = mal$  и  $T_{ob} = sr$ , Тогда  $K_p = bol$  и  $T_i = bol$ ;
- 9) Если  $K_{ob} = bol$  и  $T_{ob} = sr$ , Тогда  $K_p = neb$  и  $T_i = nemal$ .

Под сокращениями *mal, nebol, sr, nemal, bol* понимаются соответственно малые, небольшие, средние, немалые и большие значения параметров объекта управления  $K_{ob}$  и  $T_{ob}$ , настроечных коэффициентов ПИ-регулятора  $K_p$  и  $T_i$ . В качестве функций принадлежности возьмем функции принадлежности треугольной формы.

Для простоты реализации на языке программирования *ST* среды программирования

*CoDeSys* вместо слов *mal, nebol, sr, nemal, bol* используются обозначения типа A1, A2, A3, B1, B2, ... и др.

В данной работе невозможна реализация алгоритма Цукamoto, предполагающего, что функции принадлежности являются монотонными [5]. В качестве примера приведен фрагмент кода программы в инструментальном пакете *CoDeSys*, реализующий алгоритм Мамдани (табл. 2).

Таблица 2

№	Код программы	Комментарий
1	Kob:=0.575; Tob:=3.165;	(1) Текущие параметры объекта управления (2) Начальные значения искомых параметров ПИ-регулятора (3–9) Описание функций принадлежности ЛП « $K_{ob}$ »  (10–16) Описание функций принадлежности ЛП « $T_{ob}$ »
2	Kp:=1;Ti:=4.3;	
3	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 THEN A1:=-6.667*Kob+2.687; END_IF;	
4	IF Kob>0.43 THEN A1:=0; END_IF;	
5	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 THEN A2:=6.667*Kob-1.867; END_IF;	
6	IF Kob<=0.72 AND Kob>0.43 THEN A2:=-3.448*Kob+2.483; END_IF;	
7	IF Kob<0.28 AND Kob>0.72 THEN A2:=0; END_IF;	
8	IF Kob>=0.43 AND Kob<=0.72 THEN A3:=3.448*Kob-1.483; END_IF;	
9	IF Kob<0.43 THEN A3:=0; END_IF;	
10	IF Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN B1:=-0.68*Tob+2.653; END_IF;	
11	IF Tob>3.9 THEN B1:=0;END_IF;	
12	IF Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN B2:=0.68*Tob-1.653; END_IF;	
13	IF Tob<=6.24 AND Tob>3.9 THEN B2:=-0.412*Tob+2.568; END_IF;	
14	IF Tob<2.43 AND Tob>6.24 THEN B2:=0; END_IF;	
15	IF Tob>=3.9 AND Tob<=6.24 THEN B3:=0.412*Tob-1.605; END_IF;	
16	IF Tob<3.9 THEN B3:=0; END_IF;	

Окончание табл. 2

№	Код программы	Комментарий	
17	alpha1:=MIN(A1,B1); alpha2:=MIN(A1,B3);	(17-20) Вывод: находятся уровни отсечения для предпосылок каждого из девяти правил с использованием операции минимум (21-22) Начальные значения числителя и знаменателя, необходимые для организации цикла	
18	alpha3:=MIN(A3,B1); alpha4:=MIN(A3,B3);		
19	alpha5:=MIN(A2,B2); alpha6:=MIN(A2,B1);		
20	alpha7:=MIN(A2,B3); alpha8:=MIN(A1,B2); alpha9:=MIN(A3,B2);		
21	znamenatelKp:=0.00001;chislitelKp:=0;		
22	FOR I:=1 TO 350 DO		
23	IF Kp>=1 AND Kp<=1.6 THEN C1:=-1.667*Kp+2.667; END_IF;		
24	IF Kp>1.6 THEN C1:=0; END_IF;		
25	IF Kp>=1 AND Kp<=1.6 THEN C2:=1.667*Kp-1.667; END_IF;		
26	IF Kp>=1.6 AND Kp<=2.8 THEN C2:=-0.833*Kp+2.333; END_IF;		
27	IF Kp<1 AND Kp>2.8 THEN C2:=0; END_IF;		
28	IF Kp>=1.6 AND Kp<=2.8 THEN C3:=0.833*Kp-1.333; END_IF;		
29	IF Kp>=2.8 AND Kp<=4.5 THEN C3:=-0.588*Kp+2.647; END_IF;		
30	IF Kp<1.6 AND Kp>4.5 THEN C3:=0; END_IF;		
31	IF Kp>=2.8 AND Kp<=4.5 THEN C4:=0.588*Kp-1.647; END_IF;		
32	IF Kp<2.8 THEN C4:=0; END_IF;		
33	C1shtrih:=MIN(alpha1,C2); C2shtrih:=MIN(alpha2,C3);		23-32) Описание функций принадлежности ЛП «Kp» (33-37) Усеченные функции принадлежности
34	C3shtrih:=MIN(alpha3,C2); C4shtrih:=MIN(alpha4,C1);		
35	C5shtrih:=MIN(alpha5,C3); C6shtrih:=MIN(alpha6,C3);		
36	C7shtrih:=MIN(alpha7,C2); C8shtrih:=MIN(alpha8,C4);		
37	C9shtrih:=MIN(alpha9,C2);		

Алгоритм Ларсена отличается от алгоритма Мамдани изменением строк 33-37 таблицы: нечеткое подмножество переменного вывода для каждого правила находится с использованием

оператора умножения (вместо оператора *MIN* в алгоритме Мамдани).

В табл. 3 приведен фрагмент кода программы, реализующий алгоритм Сугено нулевого порядка.

Таблица 3

№	Код программы	Комментарий
21	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 AND Tob<=3.9 AND Tob>=2.43	(21-57) Находятся индивидуальные выводы правил согласно алгоритму Сугено 0-го порядка
22	THEN Kp1:=1;	
23	END_IF;	
24	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 AND Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN Ti1:=4.3;	
25	END_IF;	
26	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=3.9 THEN Kp2:=2.8;	
27	END_IF;	
28	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=3.9 THEN Ti2:=8.34;	
29	END_IF;	
30	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.43 AND Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN Kp3:=1.6;	
31	END_IF;	
32	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.43 AND Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN Ti3:=9.9;	
33	END_IF;	
34	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.43 AND Tob<=6.24 AND Tob>=3.9 THEN Kp4:=1;	
35	END_IF;	
36	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.43 AND Tob<=6.24 AND Tob>=3.9 THEN Ti4:=8.34;	
37	END_IF;	
38	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=2.43 THEN Kp5:=2.8;	
39	END_IF;	
40	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=2.43 THEN Ti5:=12.5;	
41	END_IF;	
42	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.28 AND Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN Kp6:=2.8;	
43	END_IF;	
44	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.28 AND Tob<=3.9 AND Tob>=2.43 THEN Ti6:=9.9;	
45	END_IF;	
46	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=3.9 THEN Kp7:=1.6;	
47	END_IF;	

Окончание табл. 3

№	Код программы	Комментарий
48	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=3.9 THEN Ti7:=8.34;	
49	END_IF;	
50	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=2.43 THEN Kp8:=4.5;	
51	END_IF;	
52	IF Kob<=0.43 AND Kob>=0.28 AND Tob<=6.24 AND Tob>=2.43 THEN Ti8:=12.5;	
53	END_IF;	
54	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.43 AND Tob<=6.24 AND Tob>=2.43 THEN Kp9:=1.6;	
55	END_IF;	
56	IF Kob<=0.72 AND Kob>=0.43 AND Tob<=6.24 AND Tob>=2.43 THEN Ti9:=11.6;	
57	END_IF;	

Проверим разработанные алгоритмы при значениях параметров объекта управления  $K_{ob}$  и  $T_{ob}$  в точках, находящихся между вершинами термов лингвистических переменных « $K_{ob}$ » и « $T_{ob}$ ». Полученные значения  $K_p$  и  $T_i$  подста-

вим в ПИ-регулятор исходной схемы САУ (см. рис.). С помощью пакета имитационного моделирования *Simulink* вычислим значения  $A_{max}$  и  $t_p$ . Все данные сведем в табл. 4.

Таблица 4

Kob = 0,355; Tob = 3,165		
Sugeno	Larsen	Mamdani
Kp = 2,780468	Kp = 2,862266	Kp = 2,829011
Ti = 10,10573	Ti = 8,510162	Ti = 8,561392
Amax = 1,0406	Amax = 1,1365	Amax = 1,1150
tp = 38,7837	tp = 38,8617	tp = 37,8676
Kob = 0,575; Tob = 5,07		
Kp = 1,747813	Kp = 2,460507	Kp = 2,549901
Ti = 10,18598	Ti = 8,827668	Ti = 8,655898
Amax = 1,1047	Amax = 1,3505	Amax = 1,3877
tp = 43,8494	tp = 55,7489	tp = 55,7406
Kob = 0,355; Tob = 5,07		
Kp = 2,777397	Kp = 2,730978	Kp = 2,720113
Ti = 10,41393	Ti = 8,17458	Ti = 8,100894
Amax = 1,0843	Amax = 1,2022	Amax = 1,2012
tp = 43,8453	tp = 46,0342	tp = 46,0443
Kob = 0,575; Tob = 3,165		
Kp = 2,20024	Kp = 2,567808	Kp = 2,622523
Ti = 10,97414	Ti = 10,00462	Ti = 9,725539
Amax = 1,0079	Amax = 1,2454	Amax = 1,2744
tp = 37,5318	tp = 36,1367	tp = 44,0821

**Выводы:** с помощью алгоритма нечеткого вывода Сугено, более простого в реализации, были получены параметры ПИ-регулятора, позволяющие качественно настроить исходную САУ. Данные табл. 4 говорят также о том, что алгоритмы Ларсена и Мамдани выявили близкие по значению данные, но алгоритм Мамдани оказался менее точным.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поступаева, С. Г. Работа САУ, основанных на традиционных и нетрадиционных методах настройки регулятора / С. Г. Поступаева, И. Е. Грязнов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 117–121.
2. Поступаева, С. Г. Разработка алгоритма настройки ПИ-регулятора на основе нейро-нечеткой сети / С. Г. Поступаева, С. Г. Грязнов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 122–127.

паева, И. Е. Грязнов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – С. 86–89.

3. Михайленко, В. С. Анализ методов разработки нечетких САР для управления сложными взаимосвязанными объектами / В. С. Михайленко, В. Ф. Ложечников // ААЭКС. – 2009. – № 1.

4. Михайленко, В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ-регулятора по идентификации переходного процесса /

В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – Вып. 1 (38). – С. 152–156.

5. Рогозин, О. В. Метод нечеткого вывода решения в задаче подбора программного обеспечения на основе качественных характеристик этого обеспечения как объекта инвестиций / О. В. Рогозин // Приборы, методы и технологии. – 2009. – № 3. – С. 43–49.

УДК 681.5

*А. В. Савчиц, Е. А. Зверяк, И. В. Сиваков, А. М. Мазырина*

## РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА СОВМЕСТНО С СИСТЕМОЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ВПИ (филиал) ВолгГТУ

E-mail: artem-savchic@yandex.ru

В статье рассмотрены проблемы, связанные с применением различных регуляторов для поддержания температуры, с помощью электронагревательных элементов, в технологическом оборудовании для производства и переработки полимеров. Рассмотрен предварительный подход для разработки адаптивного двухпозиционного регулятора. Также в статье рассмотрены основные виды электронагревательных элементов и самые распространенные причины выхода их из строя. Представлены используемые в настоящее время методы диагностирования технического состояния электронагревательных элементов. Предложена общая концепция системы технического диагностирования технического состояния электронагревательных элементов.

*Ключевые слова:* адаптивный регулятор, позиционный регулятор, система технического диагностирования, полимер, электронагревательный элемент.

The article describes the problems associated with the use of a variety of regulators to maintain the temperature by electric heating elements in process equipment for the production and processing of polymers. Considered a preliminary approach for the development of an adaptive on-off control. Also, the article describes the main types of electric heating elements and the most common cause of the release of their failure. Presents, currently used methods of diagnosing a technical condition of electric heating elements. The general concept of the system of technical diagnostics of technical condition of electric heating elements.

*Keywords:* adaptive control, on-off control, technical diagnostic system, polymer, heating element.

В последнее десятилетие интенсивно развиваются процессы производства и переработки полимеров. Обусловлено это развитием старых и появлением новых технологий производства различных изделий из полимерных материалов, а так же интенсивной вторичной переработкой полимеров.

Производство и переработка полимеров осуществляется с помощью широкого спектра специального оборудования, например, экструдеров, литьевых машин, различных прессов и т. д. Полимер, в данном оборудовании, размягчается или плавится с помощью нагрева электричеством, паром или высокотемпературными теплоносителями (ВОТ). В настоящее время наибольшее распространение получил обогрев электричеством с помощью электрических нагревательных элементов.

Каждый вид полимера должен перерабатываться при определенной температуре, со строго

фиксированным значением отклонением от задания. Для некоторых полимеров превышение температуры негативно сказывается на его свойствах: теряется цвет, изменяется свето-пропускание, появляется хрупкость [2]. Помимо изменения свойств самого полимера, превышение температур переработки сказывается на дальнейших стадиях производства. Например, при производстве полимерных труб может изменяться их толщина, появляться зоны с малым количеством полимера или вообще с образованием дыр.

Поэтому регулирование температуры должно осуществляться с минимальным значением перерегулирования, что не всегда можно достичь по следующим причинам:

1. Большая инерционность у объекта регулирования.
2. Изменчивость условий протекания технологического процесса (температуры, изменение скорости подачи полимера, другой полимер).

3. Использование регуляторов с двухпозиционным законом регулирования. Что совместно с большой инерционностью объекта регулирования дает большие значения перерегулирования до 30–40 °С.

В большинстве случаев, поддержание температуры, в обогреваемых зонах оборудования, осуществляется регулятором с двухпозиционным законом регулирования.

Другое дело, использование самонастраивающихся регуляторов, которые сами в процессе работы будут адаптироваться к условиям протекающего процесса [1, 3].

Конечно, можно разработать алгоритм адаптации ПИД регулятора, что может быть даст лучшие показатели регулирования, но его адаптация может оказаться тяжелой задачей для вычислительного устройства-ПЛК или микроконтроллера. Поэтому предлагается разработка адаптивного двухпозиционного регулятора, который бы сам рассчитывал необходимое время для включения или отключения нагревательного элемента, минимизировав перерегулирование. Предварительная структурная схема такого регулятора представлена на рис. 1.

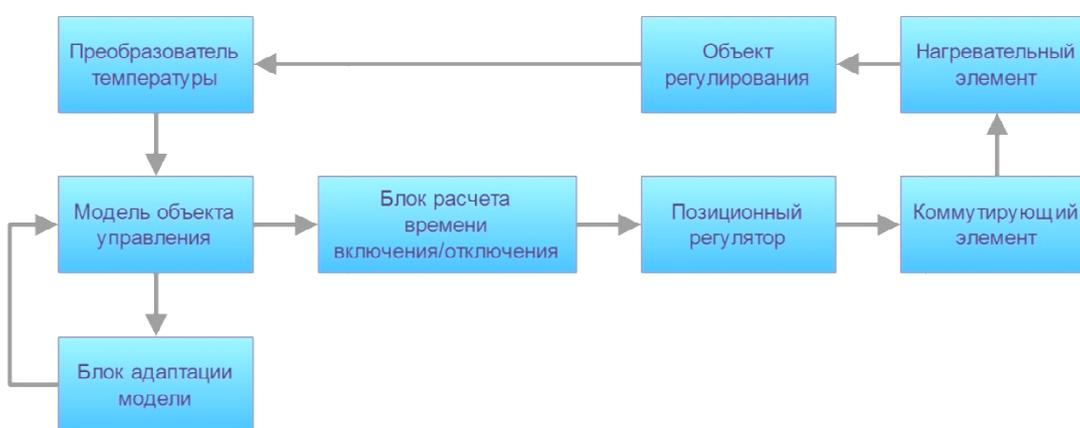


Рис. 1. Структурная схема адаптивного двухпозиционного регулятора

Работу адаптивного позиционного регулятора предлагается организовать следующим образом:

Измеренные значения температуры с объекта регулирования поступают в блок модели объекта управления и адаптации модели, где с использованием рекуррентного метода наименьших квадратов определяются [3, 4, 5] коэффициенты математической модели (1):

$$a_1 \ddot{T}_M(t) + a_2 \dot{T}_M(t) + T_M(t) = kP, \quad (1)$$

где  $T_M(t)$  – измеренная температура, °С;  $\dot{T}_M(t)$  – скорость изменения температуры, °С/мин;  $\ddot{T}_M(t)$  – ускорение изменения температуры, °С<sup>2</sup>/мин;  $k$  – коэффициент компенсации мощности;  $P$  – сигнал управления, Вт;  $a_0 \dots a_2$  – постоянные коэффициенты времени.

Мощность  $P$  считаем постоянной. Хотя на самом деле она будет колебаться от напряжения, подаваемого на нагревательный элемент. Так же может и колебаться ток, потребляемый нагревательным элементом из-за его износа или старения. Поэтому введен коэффициент мощности  $k$ , что бы компенсировать данные колебания.

Исходя из полученных коэффициентов, выполняется расчет или корректировка времени включения/отключения нагревательного элемента. Тем самым выключая или отключая нагревательный элемент заранее, компенсируя инерционность объекта управления, что бы обеспечить меньшее перерегулирование температуры.

Данные получаемые из разработанной математической модели предлагается использовать для автоматизированной системы диагностирования технического состояния используемых в оборудовании нагревательных элементов.

Большинство электронагревателей изготавливают в закрытом исполнении (ТЭНы, металлические хомутовые нагреватели, кабельные и ленточные и т. д.), но есть и такие которые выполняются в открытом или полукрытом исполнении (спиральные, спиральные керамические, хомутовые керамические и т. д.). И те и другие обладают как существенными преимуществами, так и существенными недостатками [2].

К достоинствам электронагревателей закрытого исполнения можно отнести:

- долговечность и безопасность в работе, так как основной нагревательный элемент скрыт или защищен оболочкой.

- отсутствие чувствительности к «заливке» полимером.

- простота замены, в случае выхода из строя.

К недостаткам можно отнести:

- Дороже, чем полузакрытые или открытые электронагреватели.

- Отсутствие, в большинстве случаев, возможности ремонта.

- В случае замены, нужно иметь нагреватель такого же исполнения, как и вышедший из строя. Иначе его просто не получится установить.

Нагреватели открытого или полукрытого исполнения состоят из двух частей металлической основы (сталь, алюминий) с канавками под спирали и самой спирали. Поэтому легче произвести ремонт, так как не требуется полный демонтаж нагревателя. Достаточно заменить спираль на новую. Спираль может изготовить рабочий персонал предприятия.

Но они менее надежны и безопасны в работе. Из-за того, что спираль контактирует с воздухом, она быстро окисляется и как следствие происходит быстрое перегорание и потеря теплопередающих свойств. Так же спираль может залить полимером, что ускорит его выход из строя.

Хорошо, если нагревательный элемент выходит из строя во время пуска (прогрева) оборудования, или в зонах легкодоступных для проведения замены. Тогда можно оперативно

устранить неисправность либо ремонтом, либо заменой. В противном случае требуется полная остановка оборудования, так как это повлечет за собой серьезные технические проблемы. Например, с заклиниванием, каких либо элементов из-за образования различных «козлов» и «колтыков». Для устранения, которых, требуется полная разборка оборудования, что сопряжено с большими финансовыми затратами.

Дабы избежать таких сложностей, а так же финансовых затрат необходима такая автоматизированная система, которая заранее могла определить вероятность выхода из строя нагревательного элемента и оповестить об этом обслуживающий персонал.

Исходя из этого, предлагается разработка автоматизированной системы технической диагностики нагревательных элементов, которая заранее смогла бы определить предполагаемое время выхода нагревательного элемента из строя. Тем самым уменьшая как финансовые, так и трудовые затраты.

Для работы системы диагностирования технического состояния нагревательных элементов достаточно будет измерительной информации с преобразователя температуры из контуров регулирования, в которых задействованы нагреватели. При этом информация необходимая для диагностического анализа будет получаться из математической модели, построенной для конкретного нагревательного элемента [6, 7, 8]. Структурная схема данной системы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема системы технического диагностирования

Диагностический анализ будет строиться на основе двух подходов:

1. Анализ невязки между выходом математической модели объекта и измерительной информации с объекта. При этом, чем больше бу-

дет невязка, тем больше вероятность выхода из строя нагревательного элемента [7].

2. Анализ коэффициентов математической модели, путем сравнения их со значениями эталонной модели, полученными при первом за-

пуске. Коэффициенты получаются из адаптивной модели объекта [5].

Для повышения точности и надежности диагностирования в математическую модель можно будет дополнительно ввести измерительную информацию о токе и напряжении, потребляемом нагревательным элементом. Тогда мы получим математическую модель, которая будет учитывать колебания напряжения в сети и как следствие тока.

Внедрение двух систем: адаптивного двухпозиционного регулятора и диагностирования технического состояния нагревательных элементов позволит не только повысить качество производимой полимерной продукции, но и заблаговременно информировать о возможных неисправностях в системе регулирования температуры, тем самым уменьшая издержки на производство.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. – М. : Высшая школа, 1989. – 263 с.
2. Ким, В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. – М. : Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
3. Сейдж, Э. П. Идентификация систем управления / Э. П. Сейдж, Д. Л. Мелса. – М. : Наука, 1974. – 246 с.
4. Сейдж, Э. П. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. П. Сейдж, Д. Л. Мелса. – М. : Связь, 1976. – 496 с.
5. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 958 с.
6. Ding, S. X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools / S.X. Ding – Berlin: Springer, 2008 – p. 473.
7. Iserman, R. Fault-diagnosis applications. Model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors and fault-tolerant systems/R. Iserman – New York: Springer, 2011 – p. 354
8. Vachtsevanos, G. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems/ G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer A. Hess , B. Wu. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. – p. 422.

УДК 629.114.2-235

*Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов*

### РАЗРАБОТКА НОВОЙ БЛОКИРУЮЩЕЙ ОБОЙМЫ КОНИЧЕСКОГО ИНЕРЦИОННОГО СИНХРОНИЗАТОРА ФРИКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ТРАНСМИССИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ В МАСЛЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: au@vstu.ru

Предлагаемое техническое решение – новая блокирующая обойма конического инерционного синхронизатора, на рабочих поверхностях которой выполнено плазменное фрикционное покрытие, – может быть использована в машиностроении, в тормозных и фрикционных устройствах, работающих со стальным контртелом в масле. Новая блокирующая обойма обеспечивает повышение надежности и долговечности при эксплуатации фрикционных и тормозных узлов в тяжелых условиях и позволяет уменьшить массу и габариты указанных узлов за счет повышения триботехнических характеристик.

*Ключевые слова:* блокирующая обойма синхронизатора, газотермическое покрытие, плазменное напыление, бронза, контртело, трение в масле.

The offered technical decision - new blocking holder of the conical inertial synchronizer on the workings surfaces of which the plasma frictional covering is executed, can be used in mechanical engineering, in the brake and frictional devices working with a steel counterface in oil. The new blocking holder provides increase of reliability and durability at operation frictional and brake assemblies under trying conditions and allows to decrease mass and sizes of the specified assemblies due to the increase of tribotechnical characteristics.

*Keywords:* a blocking holder of the synchronizer, gas-thermal coating, a plasma dusting, bronze, a counterface, a friction in oil.

Предлагаемое техническое решение предназначено для использования в механических коробках перемены передач с зубчатыми муфтами и постоянно зацепленными шестернями трансмиссий гусеничных или колесных машин, например, гусеничных тягачей, тракторов, автомобилей и т. д., в которых применяются

инерционные конусные синхронизаторы для безударного включения передач.

Известны конструкции стальных блокирующих обойм инерционных синхронизаторов для трансмиссий гусеничных и колесных машин с коническими рабочими поверхностями [1]. Блокирующая обойма имеет фигурные пазы

под пальцы синхронизатора на цилиндрической поверхности, внутреннюю кольцевую трапецевидную канавку под фиксаторы, конические рабочие поверхности. Такая обойма работает в паре со стальным контртелом-коническими поверхностями, выполненными на шестернях, соединяемых с валом коробки перемены передач.

На рис. 1 показан инерционный конусный синхронизатор коробки передач.

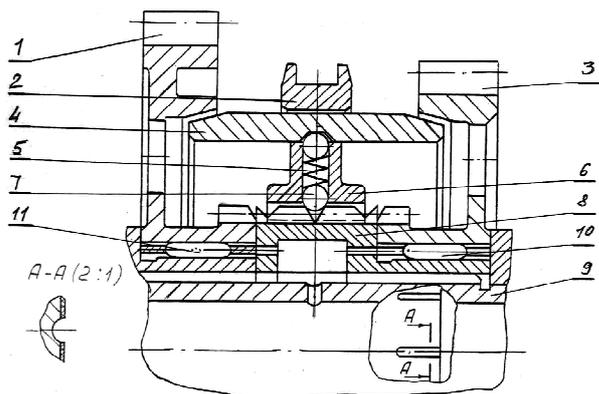


Рис. 1. Инерционный конусный синхронизатор коробки передач:

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

Указанная блокирующая стальная обойма инерционного синхронизатора обладает недостатками. При значительных нагрузках она не обеспечивает надежности и долговечности работы узла. При работе стальной обоймы синхронизатора со стальным 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 передеформированию 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 обоймы синхронизатора из строя.

Целью предлагаемого технического решения является повышение надежности и долго-

вечности работы 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 (получилиндрические) канавки глубиной 1...1,2 мм.

Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины. Подбор составов фрикционного материала и напыление его на основу проводились в ИПМ.

Выполненные ранее исследования [2, 3] показали, что использование для деталей узлов трения, эксплуатируемых в масле, газотермических покрытий на основе бронзы взамен традиционных спеченных материалов обеспечивает улучшение триботехнических характеристик фрикционных сопряжений.

На рис. 2 приведена микроструктура покрытия из бронзы БрАЖ(SiC).

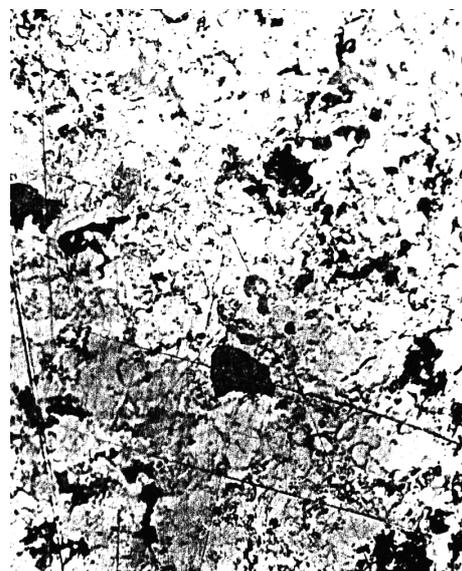


Рис. 2. Микроструктура покрытия из бронзы БрАЖ(SiC) (Увеличение  $\times 400$ ). Подложка Сталь 3

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

В качестве промежуточных слоев использованы плакированные порошки, состоящие из никеля – 85 % и алюминия – 15 %. В процессе плазменного напыления этих слоев толщиной 80...120 мкм под действием высокотемпературной газовой струи происходят экзотермические реакции между компонентами порошка с образованиями между ними интерметаллического соединения.

Теплота экзотермических реакций способствует повышению прочности сцепления покрытия с основным металлом. Покрытие из алюминидов никеля может успешно использоваться при высоких температурах – до 650 °С, обладая высокой прочностью и способностью сцепления.

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

К порошковой ленте для напыления предъявляется важное требование – необходимость однородности размера зерен (грануляции): слишком крупные частицы не прогреваются до необходимой температуры, мелкие – испаряются, сгорают, уносятся струей газа при ударе о поверхность. Размер частиц, из которых состоит порошковая лента, выбирают, исходя из теплофизических свойств порошков и характеристик плазмотронов. Были использованы порошки с размером частиц 80...160 мкм.

Температура в плазменной струе достигает 15000...30000 °С. При плазменном напылении покрытий достигается сравнительно невысокая температура нагрева напыляемой поверхности – до 150...200°С. Поэтому плазменный метод рационально использовать для напыления бронзы, молибдена и ряда других материалов на детали узлов трения, изготовленные из дешевых конструкционных сталей, обеспечивая их хорошие эксплуатационные характеристики.

Материал из бронзы отличается повышенной фрикционной активностью. Апробация материалов, изготовленных плазменным напыле-

нием с механическим активированием поверхности, позволяющей снижать пористость до 7 %, выявила возможность рационального использования алюминиевожелезистой бронзы БрАЖ(SiC) в фрикционных устройствах.

Низкие значения темпа изнашивания предлагаемых материалов способны предопределить увеличенный ресурс работы экспериментальных материалов в реальном фрикционном устройстве, а высокие коэффициенты трения – требуемый уровень фрикционной эффективности.

Пара трения с плазменным покрытием на основе БрАЖ(SiC) и сталью 65Г была испытана в лабораторных условиях на машине трения МТ-22 при работе с трансмиссионным маслом МТ-16П ГОСТ 6337–83. Результаты испытаний в виде зависимости удельной критической нагрузки  $P_{уд.кр.}$  от скорости скольжения  $V_{ск}$  для фрикционных плазменных покрытий Мо и БрАЖ(SiC) приведены на рис. 3 [4]. При непрерывном трении удельные критические нагрузки  $P_{уд.кр.}$  имеют высокий уровень для плазменных покрытий, что объясняется их пористостью и обеспечивает определенную износостойкость покрытия.

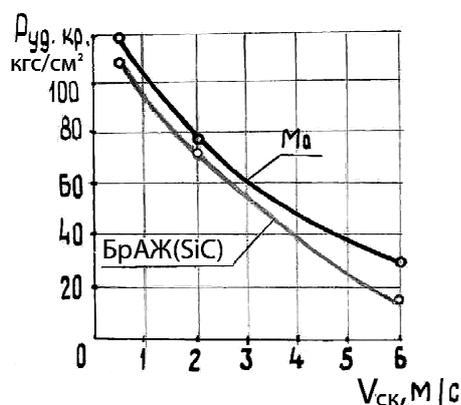


Рис. 3. Зависимости  $P_{уд.кр.}$  от  $V_{ск}$  для фрикционных плазменных покрытий Мо и БрАЖ(SiC)

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

Критические нагрузки  $P_{уд.кр.}$  характеризуют полное или частичное разрушение масляной пленки, что приводит к возникновению процессов трения без смазки и возрастанию коэффи-

циента трения до значений, характерных для сухого трения.

В момент достижения  $P_{уд.кр}$  коэффициент трения  $f$  в масле для бронзового плазменного

покрытия больше или равен  $0,2 (f \geq 0,2)$ .

Триботехнические характеристики пар трения в масле, полученные на машине трения МТ-22, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Триботехнические характеристики пар трения

Пара трения	Скорость скольжения, м/с	Нагрузка, МПа	Темп изнашивания, мкм/км	Коэффициент трения
Сталь 12ХН3А по стали 20Х2Н4А	0,5	2	11,0	0,15
		4	11,0	0,15
		6	11,0	0,15
		8	12,0	0,16
		10	13,0	0,18
	1,5	2	8,0	0,13
		4	8,5	0,12
		6	9,0	0,13
		8	10,0	0,14
		10	11,0	0,15
	3,0	2	6,0	0,11
		4	7,0	0,11
		6	8,0	0,12
		8	9,0	0,13
		10	10,0	0,135
БрАЖ(SiC) по стали 20Х2Н4А	0,5	2	3,0	0,170
		4	3,0	0,170
		6	3,0	0,175
		8	3,0	0,185
		10	3,5	0,22
	1,5	2	2,0	0,13
		4	2,0	0,13
		6	2,3	0,15
		8	2,3	0,15
		10	2,5	0,16
	3,0	2	1,0	0,11
		4	1,0	0,11
		6	1,0	0,12
		8	1,5	0,13
		10	2,0	0,14

Поведение сопряжения сталь 12ХН3А по стали 20Х2Н4А на фрикционном контакте характеризуется высоким уровнем изнашивания (10...13 мкм/км) и коэффициента трения. При этом прослеживается тенденция к смещению в область низких значений величин изнашивания и коэффициента трения по мере перехода на более высокие скорости скольжения т. е. от 0,5 до 3 м/с.

На рис. 4 изображена предлагаемая блокирующая обойма инерционного синхронизатора с фрикционным газотермическим покрытием, с фигурными пазами под пальцы синхронизатора

на цилиндрической поверхности, с внутренней кольцевой трапецевидной канавкой под фиксаторы, с коническими рабочими поверхностями для трансмиссии гусеничной или колесной машины. Обойма состоит из стальной основы 1 и покрытия 2 на конических рабочих поверхностях обоймы. На наружные конические поверхности стальной основы обоймы синхронизатора нанесено покрытие из материала триботехнического назначения, например, железо-алюминиевая бронза с пористостью 10...25 % толщиной 0,5 мм [2, 3].

Нижний предел по пористости 10 % устанавливается исходя из условий деформирования пористого тела и накопления масла в порах.

Верхний предел по пористости 25 % устанавливается из условий обеспечения прочностных свойств покрытия, так как дальнейшее увеличение пористости приводит к значительному уменьшению прочности покрытия.

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.

Работает предлагаемая обойма функционально также как известные обоймы. При скольжении конических поверхностей обоймы и контртел пористое покрытие на блокирующей обойме способно деформироваться и уплотняться в локальных объемах, что в значительной степени уменьшает возможность схватывания на локальных участках поверхностей трения и, следовательно, предотвращает распространение процесса схватывания на всю поверхность трения. При этом уменьшается вероятность выхода рабочей поверхности из строя и обеспечивается высокая надежность работы предлагаемой обоймы синхронизатора. Уменьшение вероятности процессов локального схватывания и наличие дополнительной смазки в порах покрытия обеспечивает также снижение темпа износа сопряженных поверхностей, что значительно увеличивает долговечность предлагаемой обоймы синхронизатора.

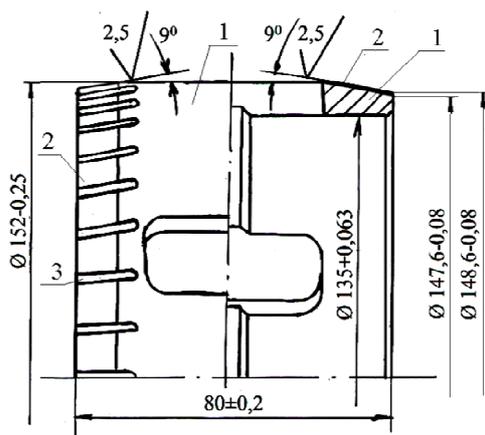


Рис. 4. Блокирующая обойма инерционного синхронизатора с фрикционным газотермическим покрытием:  
1 – основа (Сталь 12ХН3А); 2 – покрытие; 3 – канавка

**Технические требования к заготовкам блокирующих обойм с бронзовым покрытием:**

– покрытия должны наноситься механической смесью порошков бронзы БрАЖ9-4 ТУ

48-21-642- 79 и карбида кремния ГОСТ26327–84 на основу, изготовленную из стали 12ХН3А ГОСТ 4543–71;

– форма и размеры заготовок должны соответствовать рис. 4;

– твердость покрытий по Виккерсу должна быть не менее 1200...1500 МПа (120... 150 кгс/мм<sup>2</sup>); адгезионная прочность покрытий должна быть не менее 22,0 МПа (2,2 кгс/мм<sup>2</sup>); пористость покрытий должна быть 15...20 %;

– микроструктура покрытия должна быть: матрица (твердый раствор алюминия и железа в меди) традиционного бронзового цвета, на отдельных участках матрицы включения интерметаллидов, Cu<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub> светлосерого с голубишной оттенка. Микроструктура покрытия приведена на рис. 2;

– триботехнические характеристики покрытия при испытании со смазкой ТСЗП-8 ОСТ 38.01365–84 при скорости скольжения 20 м/с и удельном давлении 2 МПа должны быть: коэффициент трения в паре со сталью 20Х2Н4А не менее 0,15; темп износа в паре со сталью 20Х2Н4А не более 4,0 мкм/км;

– при многократных повторениях циклов включения – выключения блокирующие обоймы должны хорошо противостоять тепловому удару;

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

**Требования к методам испытаний заготовок блокирующих обойм:** контроль размеров; определение твердости; определение адгезионной прочности по ГОСТ1497–84; определение пористости гидростатическим методом по ГОСТ18898–73; определение микроструктуры; определение триботехнических характеристик на машине трения по ГОСТ26614–85.

Пробеговым испытаниям подвергались синхронизаторы с двухсторонним конусом – блокирующей обоймой, на который наносилось бронзовые (механическая смесь порошков из бронзы БрАЖ 9-4 и карбида кремния) покрытие методом плазменного напыления в ИПМ АН УССР. Механическая обработка конических поверхностей осуществлялась в опытном производстве СКБ ВГТЗ.

В процессе проведения испытаний в качестве контртела использовались серийные детали, изготовленные из стали 20Х2Н4А, - шестерни ведущие III и IV передач с рабочими внутренними коническими поверхностями. По-

верхность контртел подвергалась цементации на глубину 1...1,4 мм и последующей закалке. Твердость цементированной поверхности равнялась  $HRC > 59$ , сердцевины –  $HRC36...46$ .

**Условия работа серийных конусных инерционных синхронизаторов коробки передач трансмиссии гусеничных машин массой 7...8 т:** работа трения, кгс·м – 196-переход с III передачи на IV передачу; удельная работа трения, кгс·м/см<sup>2</sup> – 3,87; максимальная линейная скорость скольжения относительно контртела, м/с – 12,95; максимальное удельное давление на поверхности трения, кгс/см<sup>2</sup> – 12,37; время буксования, с – 0,39; рабочая смазка – масло МТ16П ГОСТ 6360–83; температура в зоне трения, 0 °С: а) средняя – 100, б) допустимая – 150, в) диапазон рабочих температур – 60...150; материал контртела – сталь 20X2H4A ГОСТ 4543-71  $HRC \geq 58$ .

ГМ массой 7,2 т с удельной мощностью  $N_{уд} = 24,5$  кВт/тс с опытными конусами синхронизатора III и IV передач испытывались по грунтовым проселочным дорогам в различных погодных и дорожных условиях.

В процессе полевых испытаний опытные синхронизаторы с новым плазменным покрытием на конусах обеспечили нормальную работу ГМ с общей протяженностью пробега: 5770 км.

Отклонений в работе синхронизаторов при переключении передач не обнаружено, обеспечивалось быстрое безударное включение передач, что свидетельствует о достаточной величине коэффициента трения.

После разборки КП обнаружена хорошая приработка поверхностей трения и равномерное прилегание поверхностей трения конических синхронизаторов. После микрометража установлено, что конуса пригодны к дальнейшей эксплуатации. Состояние стальных контртел, эксплуатируемых в паре с опытными конусами синхронизаторов, хорошее. На рис. 5 показаны блокирующая обойма синхронизатора с фрикционным слоем из состава Бр.АЖ9-4 (SiC) и контртела из стали 20X2H4A после пробега изделия 5770 км. В результате измерения геометрических размеров опытных конусов синхронизаторов после пробеговых испытаний определены величины износа поверхностей трения, которые представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что блокирующая обойма – конус синхронизатора с газотермическим бронзовым покрытием, износостойкость которой выше в сравнении с серийной, изготовленной из стали 12ХН3А, по эксплуатационным свойствам значительно превосходит серийную блокирующую обойму синхронизатора.

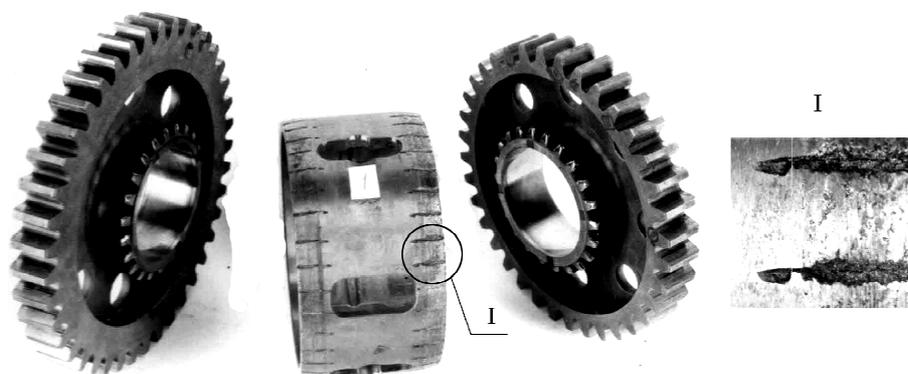


Рис. 5. Блокирующая обойма синхронизатора с фрикционным слоем из состава Бр.АЖ9-4 (SiC) и контртела из стали 20X2H4A после пробега изделия 5770 км

Таблица 2

Результаты натурных испытаний опытного и серийного 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	5770	Бр.АЖ9-4 (SiC)	0,0375	0,036	0,0265	0,009
2	10000*	Сталь 12ХН3А	0,225	0,2	0,1	0,1

\* – штатная эксплуатация ГМ

Учитывая успешные результаты пробеговых испытаний с опытными блокирующими обоймами, сложность традиционной технологии изготовления серийной блокирующей обоймы, которая заключается в двойном маршруте термической обработки (цементация и последующая закалка) и сопровождается, в связи с этим, значительным браком деталей, так как тонкая трубчатая конструкция блокирующей обоймы склонна к короблению, и то обстоятельство, что в серийном конусном синхронизаторе пару трения образуют стальные, предрасположенные к схватыванию поверхности, следует рекомендовать для применения в коробках передач гусеничных и колесных машин конусные инерционные синхронизаторы с плазменным бронзовым покрытием.

**Вывод.** Новая блокирующая обойма – конус инерционного синхронизатора коробки пе-

редач с поверхностью трения на основе железоалюминиевой бронзы, работающая со смазкой, перспективна для повышения надежности и долговечности работы фрикционных устройств трансмиссий транспортных гусеничных машин.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красеньков, В. И. Синхронизаторы в ступенчатых трансмиссиях / В. И. Красеньков, В. В. Егоркин. – М. : Машиностроение, 1967. – С. 80–84.
2. Федорченко, И. М. Современные фрикционные материалы / И. М. Федорченко, В. М. Крячек И. И. Панаюти. – Киев : Наукова думка, 1975. – 334 с.
3. Шведков, Е. Л. Словарь справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун. – Киев : Наукова думка, 1979. – 188 с.
4. 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 629.114.2-235

*Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов*

### РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ДИСКОВ С КОМБИНИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТРЕНИЯ НА БАЗЕ БРОНЗОВОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ В МАСЛЕ ФРИКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ТРАНСМИССИЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: au@vstu.ru

Предлагаемое техническое решение – диск с комбинированной поверхностью трения на основе бронзы, получаемой с помощью плазменного напыления – может быть использовано в машиностроении, в тормозных и фрикционных устройствах, работающих со стальным контртелом в масле.

Новый диск трения обеспечивает повышение надежности и долговечности при эксплуатации фрикционных и тормозных узлов в тяжелых условиях и позволяет уменьшить массу и габариты указанных узлов за счет повышения триботехнических характеристик, в первую очередь, коэффициента трения.

*Ключевые слова:* диск трения, основа диска, комбинированная поверхность трения, газотермическое покрытие, плазменное напыление, бронза, контртело, трение в масле.

The proposed technical solution - disk with a combined surface friction based on the bronze, obtained by using plasma spraying, can be used in mechanical engineering, brake and friction devices, operating with steel counterface in oil.

New friction disc provides increased reliability and long-lasting-ness in the operation of the friction and brake assemblies in harsh environments and allows to reduce the weight and dimensions specified nodes by increasing tribotechnical characteristics in the first place, - the coefficient of friction.

*Keywords:* friction disc, base of disk, combined surface friction, thermal spray coatings, plasma spraying, bronze, counterface, friction in oil.

Предлагаемое техническое решение может быть использовано для работы со стальным контртелом в масле в машиностроении, в тормозных и фрикционных устройствах, например в гусеничных и колесных машинах.

В транспортном машиностроении применяются в гидромеханических трансмиссиях (ГМТ) фрикционные муфты, работающие в масле: бло-

кировочный фрикцион гидротрансформатора, тормоз-синхронизатор для включения зубчатых муфт, фрикционные муфты переключения передач, фрикционная муфта отключения гидрообъемной передачи (ГОП) механизма поворота, фрикционные муфты включения водометных движителей. На рис. 1 представлена фрикционная муфта переключения передач ГМТ.

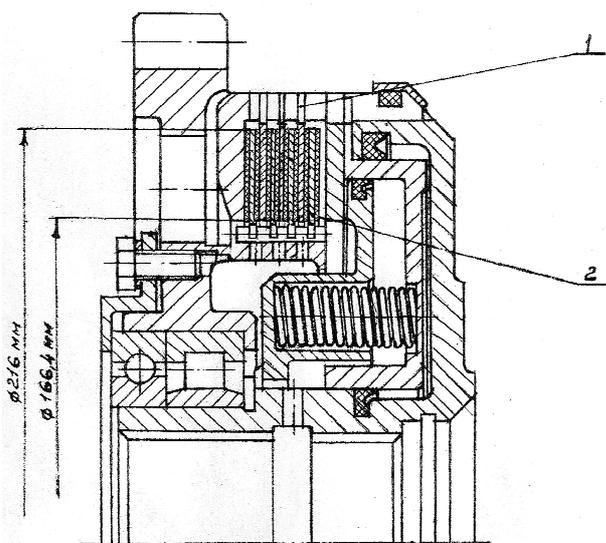


Рис. 1. Фрикционная муфта переключения передач ГМТ:  
1 – ведущие диски из стали 65Г ГОСТ 1050-74, НВ 285...321; 2 –  
ведомые диски из материала на медной основе МК-5 ТУ 1-1291-75

Физико-механические свойства спеченного фрикционного материала МК-5: твердость, кгс/мм<sup>2</sup> – 20...60; химический состав, вес %: олово – 9...11; свинец – 6...10; графит – 6...8; железо – 3...5; медь – остальное; микроструктура – твердый раствор олова в меди с включениями графита, свинца, железа и пор, равномерно расположенных по полю шлифа.

Рекомендуемые условия работы материала МК-5 при трении со смазкой: скорость скольжения, м/с – до 40; удельное давление, кгс/см<sup>2</sup> – до 40.

Известны диски трения с двумя трущимися поверхностями, состоящие из металлической основы и фрикционного материала, работающие со стальным контртелом со смазкой или без смазки при больших скоростях скольжения и удельных давлениях на фрикционном контакте. В таких дисках на стальную основу с двух сторон припекают под давлением кольцевые металлокерамические прессовки на медной или железной основе [1].

Недостатком таких дисков является низкий коэффициент трения при работе со стальным контртелом со смазкой, что снижает надежность и долговечность фрикционного или тормозного узла, увеличивает габариты и массу конструкции [2, 3].

Целью предлагаемого технического решения является повышение коэффициента трения сопрягаемых деталей фрикционного узла, надежности и долговечности работы, уменьшение габаритов и массы узла.

Новизной технического решения является то, что в диске трения основа выполнена с равномерно расположенными по окружности ра-

диальными торцевыми пазами, заполняемыми, например, методом плазменного напыления пористым бронзовым фрикционным материалом, причем толщина диска выполняется равной толщине основы, а площадь пазов относится к остальной площади торца основы в соотношении как 3...4 к 1.

Работа проводилась Волгоградским тракторным заводом совместно с Институтом проблем материаловедения АН Украины. Подбор составов фрикционного материала и напыление его на основу проводились в ИПМ.

#### Лабораторные испытания образцов фрикционных материалов

Испытаниям подвергались образцы, имеющие комбинированную поверхность трения – рис. 2, состоящую из участков стали 65Г и пористого плазменного фрикционного железоалюминиевого покрытия.

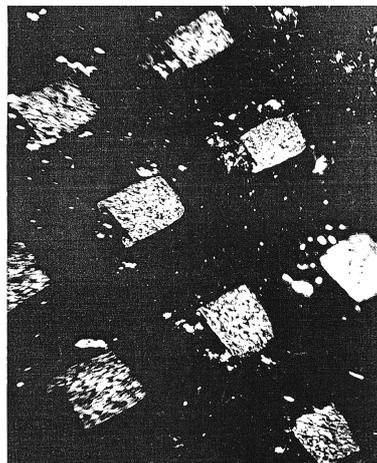


Рис. 2. Комбинированная поверхность трения: светлые участки – сталь 65Г, темные участки – плазменное покрытие

В настоящей работе предпринята попытка конструирования поверхности трения фрикционных сопряжений, эксплуатируемых в масле. Идея создания комбинированной поверхности трения – рис. 2, заключается в чередовании стальных участков – сталь 65Г, с участками плазменных покрытий, обеспечивающих малые потери на трение. При работе пары трения сталь – комбинированная поверхность плазменное покрытие, расположенное в пазах между стальными участками, переносятся на указанные стальные участки и ответную пару трения, предотвращая контакт «родственных материалов», т. е. предотвращая полностью или частично контактирование стали по стали. Наличие на поверхности трения твердых стальных участков, занимающих по площади от 10 до 30 % поверхности, и участков, заполненных пористым напыленным покрытием, обеспечивают

в процессе нагружения трением достижение высоких удельных нагрузок, т. е. легко обеспечивается достижение критических нагрузок  $P_{уд.кр.}$ , когда наблюдается полное или частичное разрушение масляной пленки, что приводит к возникновению процессов трения без смазки и возрастанию коэффициента трения до значений характерных для сухого трения. Можно предполагать, что подобная конструкция фрикционной поверхности обеспечит надежную работу сопряжения. Возможность работы пары трения сталь 65Г – комбинированная поверхность БрАЖ(SiC) + сталь 65Г была проверена при испытании на трение и изнашивание в лабораторных условиях.

В условиях непрерывного трения пары трения с плазменным покрытием на основе БрАЖ(SiC) и сталью 65Г (контртело), а также с комбинированной поверхностью трения с плазменным покрытием БрАЖ(SiC) + сталь 65Г и сталью 65Г (контртело) были испытаны в лабораторных условиях на машине трения МТ – 22 при работе с трансмиссионным маслом МТ – 16П ГОСТ 6337-83. Результаты испытаний в виде зависимости удельной критической нагрузки  $P_{уд.кр.}$  от скорости скольжения  $V_{ск}$  для фрикционных плазменных покрытий БрАЖ(SiC) и БрАЖ(SiC) + сталь 65Г приведены на рис. 3.

При непрерывном трении удельные критические нагрузки  $P_{уд.кр.}$  имеют высокий уровень для плазменных бронзовых покрытий, что объясняется их пористостью и обеспечивает определенную износостойкость покрытия.

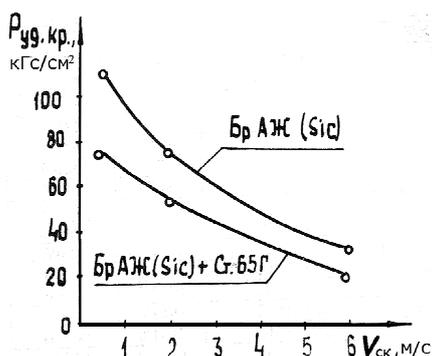


Рис. 3. Зависимости удельной критической нагрузки  $P_{уд.кр.}$  от скорости скольжения  $V_{ск}$  для фрикционных плазменных покрытий

Из рис. 3 следует, что при всех скоростях скольжения удельные критические нагрузки для комбинированной поверхности трения БрАЖ(SiC) + сталь 65Г значительно ниже, чем для плазменного покрытия из железоалюминиевой бронзы. Это объясняется тем, что плазменное покрытие из БрАЖ(SiC) является пористым телом, состоящим из отдельных частиц,

что обеспечивает определенную износостойкость. Качество межчастичных контактов в таких телах не является совершенным. Указанные характеристики структуры затрудняют достижение  $P_{уд.кр.}$  (рис. 3), при нагружении трением пористого плазменного покрытия в связи с возможностью уплотнения материала на локальных участках поверхности трения.

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

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

При сравнении темпа изнашивания комбинированной поверхности трения, состоящей из стальных участков и участков плазменных покрытий, и чисто плазменных покрытий наблюдается закономерность – износостойкость комбинированных поверхностей в 1,5...1,7 раза выше в сравнении с плазменными покрытиями. Эта закономерность характерна для бронзовых покрытий для всех скоростей скольжения.

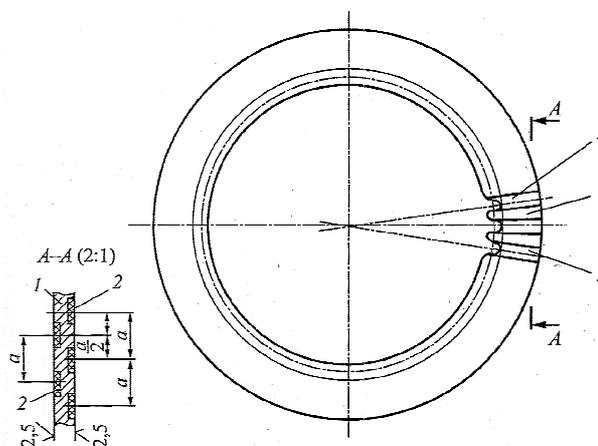


Рис. 4. Диск трения: 1 – основа диска; 2 – фрикционный материал; а – шаг торцевых пазов

На рис. 4 изображен предлагаемый диск трения с двумя рабочими поверхностями, состоящий из металлической основы 1 и фрикционного материала 2, для работы со стальным контртелом в масле. Основа диска выполнена с равномерно расположенными по окружности радиальными торцевыми пазами глубиной 0,3...0,5 мм с шагом «а», заполняемыми пористым фрикционным материалом 2, например, на основе железо-алюминиевой бронзы, который наносится методом плазменного напыления. На противоположных торцах диска пазы могут быть смещены на величину  $a/2$ . Толщина диска выполняется равной

толщине основы  $I$ , а площадь пазов относится к остальной площади торца основы  $I$  в соотношении  $3 \dots 4/1$ . Рабочая поверхность диска трения представляет собой чередующиеся участки плотного беспористого стального материала и пористого антизадирного материала, т. е. комбинированную поверхность трения [4].

Диск работает следующим образом. При трении диска в масле со стальным контртелом при больших скоростях скольжения и больших удельных давлениях на фрикционном контакте стальные участки с комбинированной поверхностью трения диска обеспечивают высокий коэффициент трения. Пористые участки комбинированной поверхности трения обеспечивают антизадирные качества соединению. Частицы пористого материала при трении переносятся на стальные участки, намазываются на них и препятствуют износу поверхностей трения.

#### Испытание дисков на инерционном электростенде.

Для проведения исследований были изготовлены фрикционные диски  $\varnothing 216$  мм с комбинированной поверхностью трения по технологии плазменного напыления железо-алюминиевой бронзы. Заготовки дисков трения коробки перемены передач, изготовленные по технологии плазменного напыления, должны соответствовать следующим паспортным данным;

1. Поверхность трения: 70 % площади – покрытие БрАЖ с включением SiC; 30 % площади – сталь 65Г ГОСТ 1054–74. Состав покрытия: 96,0–96,2 % веса БрАЖ 9-4 ТУ 48-21-642–79; 3,8–4 % SiC ГОСТ 26327–84.

2. Физико-механические свойства покрытия БрАЖ(SiC):

– твердость–1200–1500 МПа (120–150 кгс/мм<sup>2</sup> по Виккерсу);

– пористость – 15–20 % (плотность 5,4–5,7 г/см<sup>3</sup>);

– адгезионная прочность через подслоя из молибдена не менее 22 МПа.

3. Геометрические размеры заготовки: наружный диаметр по покрытию – 216 мм; внутренний диаметр по покрытию – 168 мм; толщина покрытия на сторону – (0,7+0,05) мм; общая толщина – (4,5+0,05) мм,

4. Фрикционные характеристики согласно испытаниям на машине трения МТ-68 (условия испытаний: скорость скольжения – 20 м/с, удельное давление – 2 МПа; вид трения – со смазкой маслом ТСЗП-8 ОСТ 38.01365–84): коэффициент трения  $\geq 0,18$ ; темп износа в паре со сталью 65Г –  $\leq 5$  мкм/км.

5. Режим напыления подслоя из Мо: сила тока – 500 А; напряжение – 40 В; дистанция –

105 мм; плазмообразующий газ – аргон; расход газа – 30 л/мин.

6. Режим напыления фрикционного слоя: сила тока – 470...500 А; напряжение – 37...40 В; дистанция – 105 мм; плазмообразующий газ – аргон; расход газа – 25...27 л/мин.

7. Режим механической обработки (шлифовки): шлифовальный круг – белый корунд, зерно 40 мкм, связка – керамическая, глубина резания – 30...35 м/с; поперечная подача – 0,9...1,1 мм/проход; охлаждающая жидкость – СОЖ.

Изготовление заготовок дисков  $\varnothing 176$  и  $\varnothing 216$  мм по технологии плазменного напыления проводилось в ИПМ АН УССР. На рис. 5 показаны основа заготовки диска и собственно заготовка диска  $\varnothing 216$  мм.

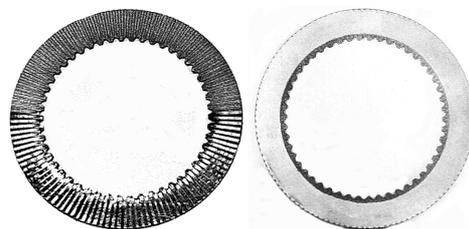


Рис. 5. Основа заготовки диска (слева) и собственно заготовка диска  $\varnothing 216$  мм

Механическая обработка дисков осуществлялась в опытном производстве СКБ Волгоградского тракторного завода. Изготовление эталонных накладок серийных дисков 150.37.074СБ из фрикционного материала МК-5 проводилось на Броварском заводе порошковой металлургии (БЗПМ).

Металлокерамический диск 150.37.074 СБ имеет на поверхности трения спиральную канавку шага 2,2 мм шириной 0,45 мм и восемь радиальных канавок (четыре с выходом на наружный диаметр, четыре с выходом на внутренний диаметр) шириной 2,5 мм.

В качестве сопряженных стальных дисков использовались серийные диски трения 950.12.390СБ из стали 65Г. Исследования фрикционных и износных характеристик, термической стойкости опытных дисков трансмиссии проводились на стенде фрикционных элементов.

Для оценки влияния конструкции, типа фрикционного материала дисков, изготовленных по технологии плазменного напыления, на фрикционные, износные характеристики пары трения и термическую стойкость дисков в пакете испытания проводились на режиме, соответствующем предельным условиям работы фрикционных элементов трансмиссий гусеничных машин на режимах переключения передач и трогания. Параметры режима испытаний дисков приведены в табл. 1.

Таблица 1  
**Параметры режима испытаний дисков**

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

При испытании опытных дисков со смазочными канавками на поверхностях трения и без них суммарные параметры нагружения дисков сохранялись на уровне серийных дисков. Для обеспечения заданных значений параметров нагружения стендовый фрикционный узел комплектовался из трех металлокерамических дисков, двух сопряженных стальных дисков и двух стендовых контртел.

Испытания дисков проводились на масле ТЗСП-8 отдельными торможениями фрикционного узла с выбранной начальной скорости до полной остановки. Численные значения оценочных показателей характеристик дисков при испытаниях на заданном режиме приведены в табл. 2, а в табл. 3 – износ дисков в пакете и фрикционные свойства дисков.

Предлагаемая конструкция диска трения с наружным Ø216 мм с комбинированными поверхностями с пористым фрикционным материалом на основе железо-алюминиевой бронзы при сравнительных испытаниях на инерционном стенде фрикционных дисков при работе со стальным контртелом со смазкой в условиях эксплуатации коробки перемены передач транспортной гусеничной машины подтвердила су-

щественные преимущества по триботехническим и эксплуатационным характеристикам в сравнении с серийными металлокерамическими дисками того же типоразмера на медной основе с материалом МК-5, спеченными под давлением.

Диски с комбинированной поверхностью трения при сравнительных испытаниях обеспечили: увеличение коэффициента трения в 3 раза, уменьшение времени буксования в 2 раза. Нанесение на рабочую поверхность опытных дисков смазочных канавок улучшает их прирабатываемость, обеспечивает более равномерно тепловыделение на поверхности трения, что в конечном итоге приводит к снижению коробления сопряженных стальных дисков. Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота гусеничных машин массой 18 т представлены в табл. 4.

Новые диски в количестве четырех штук с наружным диаметром 176 мм с комбинированной поверхностью трения на основе БрАЖ9-4(SiC) устанавливались в тормоз-синхронизатор для включения зубчатой муфты реверса и I передачи механизма передач и поворота гидромеханической трансмиссии с зубчато-фрикционным переключением передач транспортной гусеничной машины массой 18 т и эксплуатировались в течение 1500 км без замечаний. Указанные преимущества существенно повышают надежность и долговечность при эксплуатации фрикционных и тормозных узлов в тяжелых условиях и позволяют уменьшить массу и габариты указанных узлов на стадии их создания за счет повышения триботехнических свойств пары трения, в первую очередь, – коэффициента трения, повысить износостойкость и уменьшить время буксования по сравнению с дисками, изготовленными на основе МК-5.

**Износ дисков в пакете**

Таблица 2

Характеристика пакета дисков	Номер диска с покрытием	Износ, мкм		Средний износ за 400 торможений, мкм	Износ за одно торможение после приработки, мкм	Средний износ за одно торможение после приработки, мкм
		За 100 торможений	За 400 торможений			
Диски трения, изготовленные по технологии плазменного напыления. Покрытие БрАЖ(SiC) + сталь 65Г. Поверхность трения без смазочных канавок. Сопряженные стальные диски серийные	1	7,50	22,50	44,00	0,05	0,11
	2	15,75	70,50		0,18	
	3	12,50	39,00		0,09	
Диски трения, изготовленные по технологии плазменного напыления. Покрытие БрАЖ(SiC) + сталь 65Г. Поверхность трения со смазочными канавками. Сопряженные стальные диски серийные	1	76,25	127,25	132,70	0,17	0,18
	2	75,75	130,50		0,18	
	3	86,00	140,25		0,18	
Диски трения 150.37.074СБ, изготовленные по серийной технологии методом прессования и спекания под давлением. Накладки из металлокерамики МК-5. Поверхность трения со смазочными канавками. Сопряженные стальные диски серийные	1	51,00	78,50	57,92	0,09	0,10
	2	19,25	27,50		0,03	
	3	17,50	67,75		0,17	

Таблица 3

## Фрикционные свойства дисков

Характеристика пакета дисков	Номер пакета	Время буксования, с		Средний за торможение коэффициент трения	
		Разброс по пакету	Среднее значение по пакету	Разброс по пакету	Среднее значение по пакету
Диски трения, изготовленные по технологии плазменного напыления. Покрытие БрАЖ(SiC) + сталь 65Г. Поверхность трения без смазочных канавок. Сопряженные стальные диски серийные	1	0,267 ... 0,284	0,277	0,150... 0,141	0,145
Диски трения, изготовленные по технологии плазменного напыления. Покрытие БрАЖ(SiC) + сталь 65Г. Поверхность трения со смазочными канавками. Сопряженные стальные диски серийные	2	0,246 ... 0,306	0,268	0,130... 0,160	0,148
Диски трения 150.37.074СБ, изготовленные по серийной технологии методом прессования и спекания под давлением. Накладки из металлокерамики МК-5. Поверхность трения со смазочными канавками. Сопряженные стальные диски серийные	3	0,585 ... 0,682	0,646	0,042... 0,050	0,043

Таблица 4

## Условия работы дисков трения в механизме передач и поворота

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

Представляется целесообразным дальнейшие работы по созданию дисков с комбинированной поверхностью трения с плазменным напылением фрикционного слоя проводить в направлении подбора наиболее приемлемых соотношений коэффициента трения и износостойкости с последующей проверкой в стендовых и объектовых условиях.

Вывод. Новые фрикционные диски с комбинированной поверхностью трения на основе железоалюминиевой бронзы, работающие со смазкой, перспективны для повышения триботехнических характеристик, в первую очередь, коэффициента трения, надежности и долговечности работы фрикционных устройств трансмиссий транспортных гусеничных машин.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трактор Т-150 / под ред. Б. П. Кашубы и И. А. Ковалю. – М. : Колос, 1978. – С. 106–107.
2. Федорченко, И. М. Современные фрикционные материалы / И. М. Федорченко, В. М. Крячек, И. И. Панаоти. – Киев : Наукова думка, 1975. – 334 с.
3. Шведков, Е. Л. Словарь справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун. – Киев : Наукова думка, 1979. – 188 с.
4. Труханов, В. М. Разработка фрикционных дисков с комбинированной поверхностью, изготавливаемых с использованием автоматизированной технологии плазменного напыления / В. М. Труханов, Ю. И. Крыхтин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 3. – С. 13–18.

Редактор  
**Н. Н. Кваша**

Компьютерная верстка:  
**Е. В. Макарова**

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.  
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.  
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)  
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

---

Темплан 2017 г. Поз. № 4ж. Подписано в печать 07.06.2017 г. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,74.  
Тираж 70 экз. Свободная цена. Заказ №  
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолГТУ  
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.  
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолГТУ  
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.