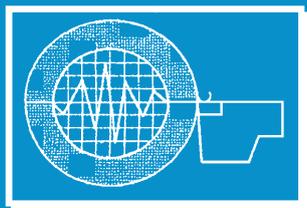


ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Прогрессивные технологии
в машиностроении

16+

№ 7 (217)
2018

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

Редакционная коллегия:

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

Серия
«ПРОГРЕССИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Полянчиков Ю. Н., д.т.н., проф.

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

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

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

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

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

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

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

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.

Тескер Е. И., д.т.н., проф.

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

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

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

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

Плотников А. Л., д.т.н., проф.

Фролов Е. М., к.т.н., доц.
(ответственный секретарь)

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.

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

Тел. издательства ВолГТУ:

(8442) 24-84-06

Факс (8442) 24-84-06

otr@vstu.ru

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

№ 7 (217)

Июль

2018

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ФГБОУ высшего образования

«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.

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

E-mail: president@vstu.ru

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

© Волгоградский государственный технический университет,

«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2018

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

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

Editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SERIES
«ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING»

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

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

Editorial board:

Chairman

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

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

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

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

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 7 (217)
July
2018

FOUNDER:

FSBEI of Higher Professional Education
«Volgograd State Technical University»

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

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

E-mail: president@vstu.ru

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

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

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

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

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Барабанов В. Г. 76, 81
Бекренев Н. В. 17, 22
Божков А. В. 49
Бокова Л. Г. 7
Бориско С. Н. 90
Бочкарев П. Ю. 7
Бурлаченко О. В. 69
Ваганов А. В. 73, 87
Владимиров А. А. 13
Волков И. В. 78
Гаврилов Д. П. 76
Гусев В. Г. 66
Дикарев П. В. 78
Дружинин С. А. 81
Егоров Н. И. 63
Жуков И. С. 60
Жупиков А. Е. 73, 87
Злобина И. В. 17, 22
Као С. Ч. 63
Карпов В. Г. 53
Киселева М. Н. 69
Козловцева Н. В. 84
Корзун Э. А. 66
Королев Р. Д. 7
Крылов Е. Г. 84
Кузнецов С. П. 41
Курсин О. А. 63
Липатов А. А. 26
Макаров А. М. 73, 78, 84, 87
Малахов В. Г. 13, 49
Матлахов В. П. 58
Мушкин О. В. 87
Носенко В. А. 41
Переладов А. Б. 29, 35
Петрюк И. П. 60
Поступаева С. Г. 90
Пушкарев О. И. 41
Репин К. А. 44
Рожнов А. В. 60
Санинский В. А. 49, 53
Селифонов В. С. 58
Сергиев А. П. 13
Смирнова Е. Н. 53
Сорокин В. С. 90
Сотников Д. В. 73
Турыгин А. Б. 60
Фам С. Б. 63
Фам Х. Ч. 26
Фролов Е. М. 66
Хандожко В. А. 58
Худяков К. В. 53
Чигиринский Ю. Л. 26, 63
Яковлев А. А. 78, 84, 90

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Бокова Л. Г., Королев Р. Д., Бочкарев П. Ю.</i> Использование показателя однородности по используемому оборудованию при оценке производственной технологичности деталей.....	7
<i>Владимиров А. А., Сергиев А. П.</i> Влияние амплитуды колебаний на составляющие функции комплексного вибрационного воздействия низкочастотных колебаний.....	13
<i>Злобина И. В., Бекренев Н. В.</i> Модифицирование микроструктуры отвержденных армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов в СВЧ электромагнитном поле.....	17
<i>Злобина И. В., Бекренев Н. В.</i> Исследование микроволнового упрочняющего модифицирования конструкционных элементов из композиционных материалов.....	22
<i>Липатов А. А., Чигиринский Ю. Л., Фам Х. Ч.</i> К вопросу о причинах неустойчивости стружкообразования при резании аустенитной стали твердосплавным инструментом.....	26
<i>Переладов А. Б.</i> Решение основного уравнения шлифования с использованием методики трехмерного компьютерного моделирования.....	29
<i>Переладов А. Б.</i> Исследование прочности закрепления абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента.....	35
<i>Пушкарев О. И., Носенко В. А., Кузнецов С. П.</i> Моделирование доводочных процессов микрорезания материалов методами микроиндентирования.....	41
<i>Репин К. А.</i> Методика проведения экспериментальных исследований и сравнительный анализ технологии термосиловой обработки мало жестких длинномерных деталей.....	44
<i>Санинский В. А., Малахов В. Г., Божков А. В.</i> Повышение работоспособности шпиндельных узлов пинолей путем совмещения газовых подшипников скольжения и подшипников качения....	49
<i>Санинский В. А., Худяков К. В., Смирнова Е. Н., Карпов В. Г.</i> Расчеты контактной жесткости и долговечности при точечном и линейном контакте роликов и дорожек качения.....	53
<i>Селифонов В. С., Хандожко В. А., Матлахов В. П.</i> Стенд для параметризации и настройки сервоприводов станков с числовым программным управлением.....	58
<i>Турыгин А. Б., Рожнов А. В., Петрюк И. П., Жуков И. С.</i> Работоспособность соединений деталей сельскохозяйственной техники.....	60
<i>Фам С. Б., Курсин О. А., Чигиринский Ю. Л., Егоров Н. И., Као С. Ч.</i> Исследование способа хонингования с опережающим пластическим деформированием при обработке крупногабаритных изделий из низкоуглеродистых сталей.....	63
<i>Фролов Е. М., Гусев В. Г., Корзун Э. А.</i> Особенности датчиков для промышленного применения методов оперативного контроля и управления процессом резания.....	66
<i>Бурлаченко О. В., Киселева М. Н.</i> Обеспечение качества поверхности ферритов при доводке.....	69

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Ваганов А. В., Жупиков А. Е., Сотников Д. В., Макаров А. М.</i> Исследование процесса удержания воздухопроницаемых гибких контейнеров для сыпучих материалов вакуумными захватными устройствами.....	73
<i>Гаврилов Д. П., Барабанов В. Г.</i> Обеспечение информационной безопасности в автоматизированных системах управления технологическими процессами.....	76
<i>Дикарев П. В., Макаров А. М., Волков И. В., Яковлев А. А.</i> Разработка и исследование автоматизированной мобильной когенерационной установки.....	78
<i>Дружинин С. А., Барабанов В. Г.</i> Разработка устройства для контроля утечки в бытовых газовых приборах...	81
<i>Крылов Е. Г., Макаров А. М., Яковлев А. А., Козловцева Н. В.</i> Автоматизация расчета параметров шариковинтовых передач мехатронных узлов.....	84
<i>Макаров А. М., Мушкин О. В., Ваганов А. В., Жупиков А. Е.</i> Использование аддитивных технологий при проектировании и изготовлении модульного вакуумного захватного устройства для гибких контейнеров.....	87
<i>Яковлев А. А., Сорокин В. С., Бориско С. Н., Поступаева С. Г.</i> Разработка устройства подачи смазочно-охлаждающего технологического средства методом поискового конструирования.....	90
К сведению авторов.....	95

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.791.03-52

Л. Г. Бокова, Р. Д. Королев, П. Ю. Бочкарев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ОДНОРОДНОСТИ ПО ИСПОЛЬЗУЕМОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Саратовский государственный технический университет
им. Ю. А. Гагарина

E-mail: bokovalg@mail.ru, bpy@mail.ru

В статье представлен метод количественной оценки производственной технологичности изделий, учитывающий функциональные возможности оборудования с позиции увеличения концентрации технологических операций и обеспечения условий для формирования рациональных структур операций в системе планирования многономенклатурных технологических процессов. Метод позволяет провести оценку соответствия конструктивных особенностей детали с возможностями технологического оборудования в рамках конкретной производственной системы с позиции достижения требуемых значений концентрации технологических операций, позволяющих обеспечить многовариантность принятия решений при проектировании и реализации технологии в зависимости от складывающейся производственной ситуации.

Применяемый метод в системе планирования многономенклатурных технологических процессов позволяет исключить появление ошибок из-за субъективных составляющих на ранних этапах проектных решений, повысить производительность технологического оборудования при обработке деталей за счет учета результатов оценки производственной технологичности.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, технологическое оборудование, количественный показатель производственной технологичности, система планирования многономенклатурных производственных систем.

L. G. Bokova, R. D. Korolev, P. Yu. Bochkarev

THE USE OF THE HOMOGENEITY INDICATOR OF USED EQUIPMENT IN THE EVALUATION PRODUCTION MANUFACTURABILITY OF PARTS

Yuri Gagarin Saratov state technical university

The method of quantitative assessment of production technological effectiveness of products considering functionality of the equipment from a position of increase in concentration of technological operations and providing conditions for formation of rational structures of operations in the system of planning of multinomenclature technological processes is presented in article. The method allows to carry out assessment of compliance of design features of a detail with opportunities of processing equipment within a concrete production system from a position of achievement of the required values of concentration of technological operations, allowing to provide diversity of decision-making at design and realization of technology depending on the developing production situation.

The applied method in the system of planning of multinomenclature technological processes allows to exclude emergence of mistakes because of subjective components, at early stages of design decisions. To increase productivity of processing equipment when processing details due to accounting of results of assessment of production technological effectiveness.

Keywords: technological preparation of production, processing equipment, quantitative index of production technological effectiveness, system of planning of multinomenclature production systems.

На всех этапах развития машиностроительных производств стык между конструкторскими разработками изделий и созданием технологических методов их изготовления являлся

наиболее проблемным и вызывающим наибольшие противоречивые дискуссии между проектировщиками. Это связано с разноплановостью задач, решаемых в рамках данных двух

укрупненных групп обеспечения производства, а также отличающимися квалификационными профилями специалистов, участвующих в их реализации. На каждом из временных этапов совершенствования техники и технологий решение имеющихся противоречий между конструкторской и технологической подготовкой машиностроительных производств основывались на организационных методах, регламентирующих взаимодействия между соответствующими службами в виде нормативных документов.

Современное состояние данного вопроса, в первую очередь, определяется тенденциями развития машиностроительных производств, связанных с одной стороны с выпуском изделий, отличающихся высокими функциональными, надежностными показателями и обеспечением возрастающих требований индивидуализации потребительского спроса, с другой стороны – повышением производительности и эффективности технологических процессов их изготовления, что привело в настоящее время к резкому снижению серийности производства и преобладанию использования механообработывающего оборудования с автоматизированным управлением и широким диапазоном конструктивно-технологических характеристик обрабатываемых деталей. При этом создание методического обеспечения установления взаимосвязей между проектными процедурами и целевыми функциями конструкторской и технологической подготовки становится наиболее актуальной в связи с возрастающей конкуренцией и обязательным обеспечением рентабельной работы высокостоимостного оборудования в процессе реализации изготовления деталей с выполнением требований, заданных на этапах конструкторских работ [1–3].

Комплекс вопросов, связанных с оценкой производственной технологичности деталей, а именно совершенствованием конструкции при проектировании изделия с учетом характеристик технологического процесса, повышение качества их обработки и других вопросов стоят на ведущем месте развития производственных систем. Оценка технологичности деталей, сложный процесс, который, в соответствии с существующими методиками и нормативными документами подготовки производства, зависит от субъективных знаний и опыта конструктора и технолога, что зачастую не обеспечивает качественное принятие решений, базирующихся на знаниях о реальном состоянии

и информации о постоянно развивающихся возможностях современных производственных систем. Для отражения связей между затратами при изготовлении изделий и их конструктивными особенностями используется оценка технологичности, которая довольно противоречива и не имеет в настоящее время полного строгого описания ее проведения. То, что в одних определенных условиях, характеризуемых, например, специализацией цехов, наличием того или иного оборудования и средств технологического оснащения, может быть рациональным, технологичным, в других может оказаться неприемлемым.

Чтобы решить эти задачи необходимо развивать методы анализа производственной технологичности, в том числе на основе расширения дополнительных критериев для ее оценки, которые направлены на организацию технологической подготовки многономенклатурных производственных систем. Представленные исследования выполнены в рамках создания системы планирования многономенклатурных технологических процессов [4–5]. Возможность разработки дополнительных количественных критериев оценки производственной технологичности обусловлена следующими факторами: сформированной в системе планирования многономенклатурных технологических процессов базы данных о технологических возможностях оборудования; принципиально отличающимся подходом к технологической подготовке производства, позволяющим обеспечить многовариантность принятия решений при проектировании и реализации технологии в зависимости от складывающейся производственной ситуации.

На основе требований, предъявляемых к оценке производственной технологичности, с учетом условий конкретной производственной системы и ориентации на особенности многономенклатурных систем механообработки, установленных взаимосвязей между производственной технологичностью и ее влиянием на технологические составляющие обработки, обоснован состав дополнительных показателей оценки производственной технологичности для использования в системе планирования многономенклатурных технологических процессов [6–8]: показатель возможности изготовления заданной номенклатуры деталей; показатель использования технологических возможностей производственной системы; показатель технологичности детали по однородности техноло-

гического оборудования; показатель прогнозирования уровня загрузки технологического оборудования при обработке заданной номенклатуры деталей; показатели многовариантности принятия решений при проектировании и реализации технологических процессов. Известные показатели расширяются за счет предлагаемых, которые используют дополнительную исходную информацию, а именно данные о технологических возможностях оборудования, содержащуюся в информационном обеспечении системы планирования многономенклатурных технологических процессов.

Применение предлагаемых дополнительных показателей оценки производственной технологичности обеспечивает то, что определяется не абстрактная производственная технологичность деталей, а технологичность для конкретной производственной системы. За счет этого делается не только более корректное заключение об технологических возможностях обеспечения заданных характеристик получаемых изделий и уровне сложности подготовки производства, но и прогнозируется эффективность функционирования производственной системы при изготовлении деталей. В статье более подробно рассматривается такой показатель как модель оценки функциональных возможностей оборудования с позиции увеличения концентрации технологических операций и обеспечения условий для формирования рациональных структур операций.

Уникальность функционирования многономенклатурных производственных систем, заключающаяся в постоянном обновлении выпускаемой продукции и связанных с этими требованиями к разрабатываемым технологическим процессам, которые направлены на повышение концентрации технологических операций. Задача установления взаимосвязи между конструктивными характеристиками деталей и прогнозируемым уровнем концентрации технологических операций их изготовления на стадии оценки производственной технологичности до настоящего времени не ставилась. Проведение исследований в данном направлении, как и создание подсистемы планирования многономенклатурных процессов, позволит перейти к ее решению с использованием информации о потенциальных возможностях рационального изготовления деталей на основе их конструктивных характеристик.

В рамках системы планирования многономенклатурных технологических процессов важ-

нейшем этапе при создании модели оценки функциональных возможностей оборудования с позиции увеличения концентрации технологических операций и обеспечения условий для формирования рациональных структур операций является выявление возможности обработки набора элементарных поверхностей деталей на имеющемся оборудовании. На основе анализа баз данных технологических возможностей оборудования формируется матрица с множеством возможных показателей качества обработки на данном оборудовании для каждого рассматриваемого вида элементарных поверхностей для всех деталей, запланированных для обработки в рассматриваемый период времени. Если все размерно-точностные параметры и требования к характеристикам поверхностного слоя, заданные для конкретной элементарной поверхности могут быть выдержаны на этапе обработки с применением рассматриваемого оборудования, то данное технологическое оборудование принимается как один из вариантов обработки элементарной поверхности и информация вносится в соответствующий элемент формируемой матрицы. Если не выполняются данное условие, оборудование не включается в список.

Следующим этапом анализа взаимосвязей между конструктивными характеристиками деталей и прогнозируемым уровнем концентрации технологических операций их изготовления является возможность обработки элементарных поверхностей от заготовки до заданного конструктором результирующего состояния на выбранном оборудовании. С этой целью рассматривается сформированная матрица и сравниваются показатели качества элементарной поверхности и требования к показателям качества поверхности заготовки для обработки на данном оборудовании, содержащиеся в базе данных о технологических возможностях оборудования в системе планирования многономенклатурных технологических процессов. Если условия обработки элементарной поверхности выполняются, то обработка полностью возможна на рассматриваемом технологическом оборудовании. Если условие не выполняется, то принимается вариант использования нескольких единиц оборудования в процессе выполнения обработки поверхности детали. Данная проектная процедура носит итерационный характер для рассмотрения всех вариантов последовательностей обработки элементарных по-

верхностей, входящих в конструкции запланированных для обработки деталей.

В результате последовательного сравнения конструктивных характеристик поверхностей деталей и возможностей оборудования определяются все возможные варианты использования технологического оборудования, имеющегося в рамках производственной системы при обработке элементарных поверхностей для каждой детали, и формируется исходная результирующая бинарная матрица использования технологического оборудования при обработке элементарных поверхностей заданных деталей.

Для анализа возможностей объединения обработки отдельных элементарных поверхностей в рамках одной технологической операции предлагается проводить анализ по однородности вариантов использования технологического оборудования. При такой оценке возможно учесть наибольшее количество факторов, отражающих постоянно меняющуюся производственную ситуацию функционирования многономенклатурного производства. С этой целью выполняется отбор вариантов использования технологического оборудования при обработке элементарной поверхности с вероятностью максимальной концентрации фрагментов техноло-

гических операций с использованием математического аппарата алгебры Буля.

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M Va_{j(m)(v_j)} \neq 0, \\ \sum_{m=1}^M Va_{j(m)(v_j)} \rightarrow \min \end{cases}$$

где $Va_{j(m)(v_j)}$ – варианты использования m -го технологического оборудования при обработке j -й элементарной поверхности для a -й детали; $\sum_{m=1}^M Va_{j(m)(v_j)} \neq 0$ – условие, не менее одного оборудования должно использоваться при обработке j -й поверхности детали.

По результатам отбора вариантов использования технологического оборудования для каждой элементарной поверхности для дальнейших исследований имеем отобранные варианты использования технологического оборудования при обработке j -й элементарной поверхности (vo_j). $Va_{j(m)(vo_j)}$ – условие обработки j -й элементарной поверхности a -й детали при vo_j отобранном варианте использования m -го технологического оборудования.

$$Va_{j(m)(vo_j)} = \begin{cases} 1, & \text{если при } vo_j \text{ отобранном варианте использования } m\text{-го технологического оборудования выполняется обработка } j\text{-й элементарной поверхности } a\text{-й детали.} \\ 0, & \text{если при } vo_j \text{ отобранном варианте использования } m\text{-го технологического оборудования не выполняется обработка } j\text{-й элементарной поверхности } a\text{-й детали.} \end{cases}$$

Сгенерированные и впоследствии отобранные варианты позволяют создать картину возможных вариантов рационального использования технологического оборудования при обработке каждой элементарной поверхности, включенной в состав одной из детали, входящей в номенклатуру обрабатываемых деталей в рамках производственной системы в рассматриваемый промежуток времени. Однако, при прогнозировании функционирования производственной системы с позиции удовлетворения при технологической подготовке производства наибольшей концентрации операций, кроме объединения этапов обработки отдельных элементарных поверхностей, необходимо выполнить оценку степени возможности объединения

обработки на одном оборудовании для нескольких поверхностей детали [9].

На стадии оценки производственной технологичности в данной постановке задача представляется очень сложной т. к. на этом этапе технологической подготовки производства отсутствуют не только данные по состоянию производственной системы на момент реализации задания на обработку деталей, но еще не разработаны технологические процессы их изготовления. Поэтому было предложено дальнейшее исследование по прогнозированию возможной степени концентрации технологических операций вести с привлечением в качестве математического аппарата – кластерного анализа.

На основе отобранных вариантов применения технологического оборудования была сформирована булева матрица, в которой отражен весь набор использования оборудования для элементарных поверхностей в рамках имеющейся производственной системы. Содержащаяся в матрице информация позволяет сделать предположение о степени многовариантности при обработке каждой элементарной поверхности с учетом вероятности объединения обработки отдельных элементарных поверхностей при разработке технологических процессов в рамках одной операции. Таким образом, данная матрица является базовой при проведении кластеризации элементарных поверхностей деталей, при прогнозировании степени концентрации планируемых операций.

По результатам проведения процедуры кластеризации и построения дендограммы (рис. 1) определяются показатели близости при последовательном объединении отдельных элементарных поверхностей в кластер ($S=1-v$), где v – стандартный индекс иерархии аналогичный расстоянию или показателю близости). Полученная информация является источником информации для прогнозирования возможностей для рассматриваемой детали при проектировании и реализации технологических процессов с позиции возможностей структурной оптимизации и степени гибкости принятия решений при технологической подготовке производства.

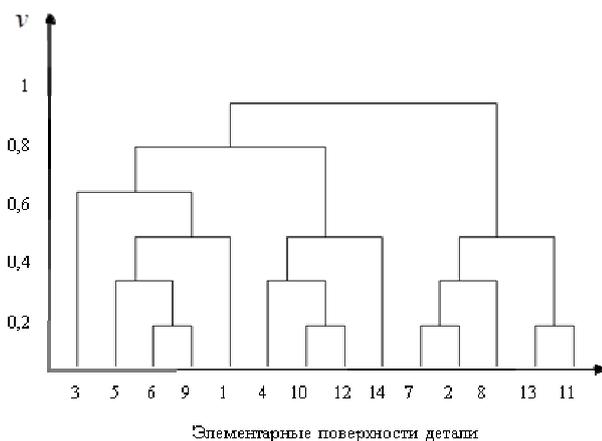


Рис. 1. Дендограмма последовательного объединения элементарных поверхностей детали в кластеры по возможности объединения их обработки в одной технологической операции

Для решения задачи учета возможного объединения обработки отдельных элементарных поверхностей в рамках технологических операций при разработке технологических процессов

на стадии оценки детали на технологичность предлагается ввести показатель однородности по используемому технологическому оборудованию.

$$P_{outo} = 1 - \frac{\sum_{ky} v_{ky} \cdot E_{ky}}{\sum_{ky} E_{ky}}$$

где ky – сформированный кластер элементарных поверхностей (последовательность присвоения номеров от $v = 0$ до $v = 1$ с шагом присвоения номера – 1); KY – максимальное количество последовательно сформированных кластеров элементарных поверхностей при выполнении процедуры кластеризации; v_{ky} – индекс иерархии, соответствующей формированию кластеру ky ; E_{ky} – количество элементарных поверхностей, объединенных в один из кластеров на уровне с v_{ky} – индексом иерархии.

На основе созданных моделей разработан алгоритм и автоматизированная программа [10] для выбора из множества возможных планов механической обработки поверхностей деталей таких вариантов, в которых используется минимальное количество различных групп оборудования, что позволит обеспечить максимальную концентрацию операций при разработке технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Эффективность применения автоматизированной подсистемы складывается из обеспечения качества проектных решений на стадии оценки технологичности деталей, исключения появления ошибок за счет отсутствия субъективных составляющих на данном этапе технологической подготовки производства, повышения производительности технологического оборудования при обработке деталей за счет учета результатов оценки производственной технологичности.

Повышение концентрации операций обеспечивает сокращение длины маршрутов технологических процессов, сокращение затрат на переналадку технологического оборудования, проектирование структуры технологических операций, позволяющей за счет ее оптимизации сократить основное время выполнения операций с применением параллельной обработки, вспомогательное время и рационально использовать средства технического оснащения (рис. 2).

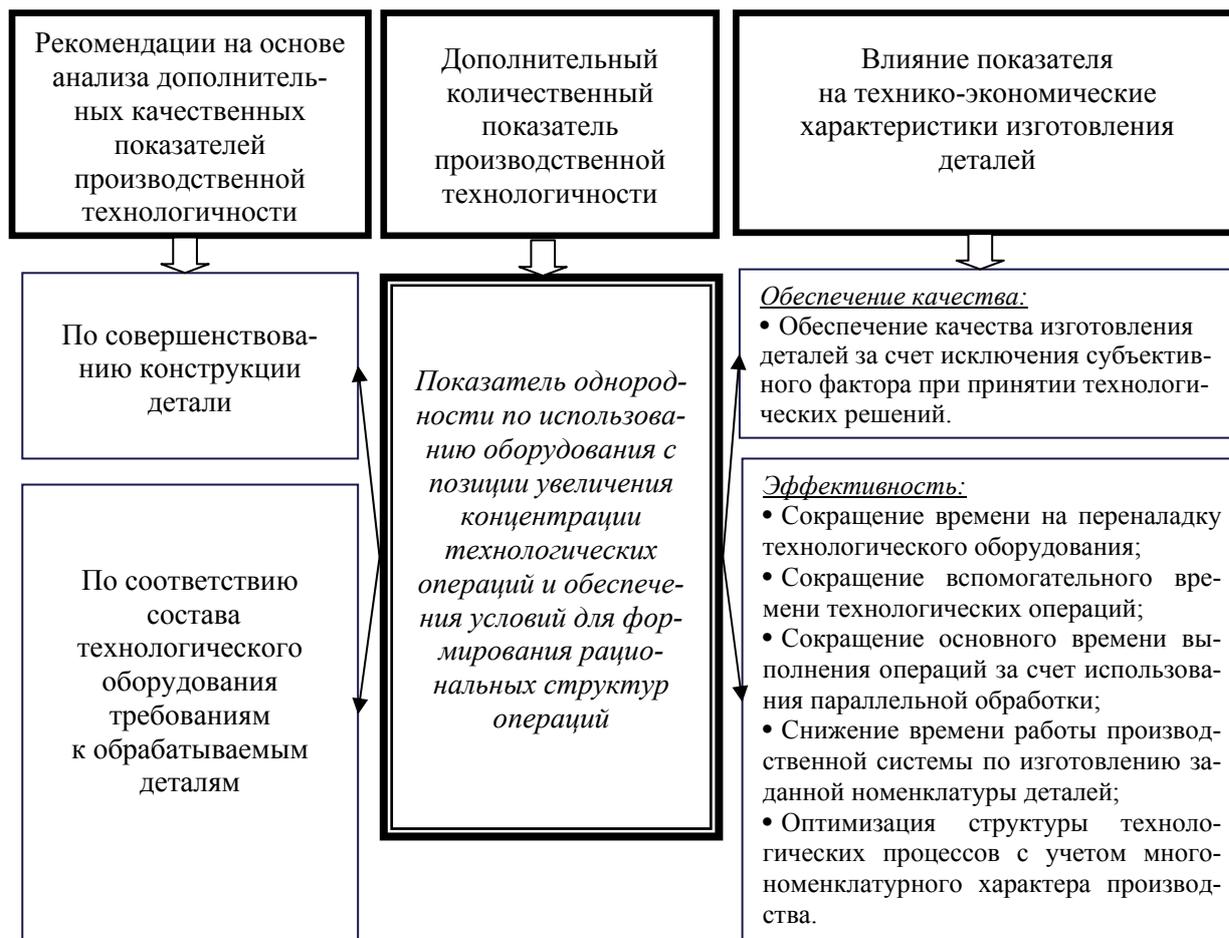


Рис. 2. Использование разработанного дополнительного количественного показателя производственной технологичности в конструкторско-технологической подготовке производства

Показатель технологичности детали, для оценки однородности по используемому технологическому оборудованию, позволяет провести оценку соответствия конструкции и характеристик поверхностей детали возможностям технологического оборудования в рамках рассматриваемой производственной системы, с позиции достижения требуемых значений концентрации технологических операций, что для условий многономенклатурного производства является одним из определяющих факторов обеспечения качества выполнения работ (снижения количества переустановок детали) и эффективного функционирования оборудования, за счет снижения количества переналадок технологического оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безъязычный, В. Ф. Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс] : учеб. для вузов / В. Ф. Безъязычный. – Электрон. текстовые данные. – М. : Машиностроение, 2013. – 568 с.

2. Васильев, А. С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев, А. М. Дальский, Ю. М. Золотаревский, А. И. Кондаков ; под ред. А. И. Кондакова. – М. : Машиностроение, 2005. – 352 с.

3. Сулов, А. Г. Технология машиностроения : учеб. / А. Г. Сулов. – М. : Кнорус, 2013. – 336 с.

4. Бочкарев, П. Ю. Технологичность как фактор повышения эффективности конструкторско-технологической подготовки механообрабатывающих производств / П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова // Вестник Дагестанского научного центра РАН. – 2012. – N 45. – С. 29–31.

5. Митин, С. Г. Автоматизация оценки производственной технологичности изделия в условиях многономенклатурных производственных систем / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова // Научно-технические исследования в машиностроении. – 2014. – № 9 (39). – С. 44–48.

6. Бокова, Л. Г. Структура оценки производственной технологичности деталей в многономенклатурных механообрабатывающих системах / Л. Г. Бокова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 2. N 2 (56). – С. 27–31.

7. Бокова, Л. Г. Разработка показателей для оценки производственной технологичности деталей в системе планирования технологических процессов механообработки / Л. Г. Бокова, П. Ю. Бочкарев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 3–1 (33–1). – С. 29–35.

8. Бочкарев, П. Ю. Оценка производственной технологичности деталей в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем / П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2017. – № 1 (40). – С. 250–254.

9. Бочкарев, П. Ю. Оценка производственной технологичности : учеб. пособие / П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова. – СПб. : Изд-во «Лань», 2017. – 132 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013660669 Российская Федерация. Программа выбора вариантов использования технологического оборудования, имеющих максимальную концентрацию операций механической обработки / Л. Г. Бокова, П. Ю. Бочкарев, С. Г. Митин; правообладатель ФГБОУ ВПО «СГТУ имени Гагарина Ю. А.» (RU) №, 14.11.2013 г. – № 2013618617; заявл. 27.09.2013; зарегистр. 14.11.2013; опубл. 20.12.2013, Реестр программ для ЭВМ.

УДК 621.9.048

А. А. Владимиров, А. П. Сергиев

**ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ ФУНКЦИИ
КОМПЛЕКСНОГО ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

**Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»**

E-mail: alexsandrvodila@yandex.ru

Статья посвящена разработке математической модели механизма формирования шероховатости поверхности в виде обобщенной функции вибрационного воздействия. Модель включает в себя три основных фактора воздействия вибраций в зоне резания: вибрационную скорость, вибрационное ускорение и энергию рассеивания в зоне резания. Математическая модель раскрывает физическую сущность процесса вибрационного резания и позволяет описывать механизм формирования шероховатости поверхности при постоянной амплитуде изменением частоты колебаний.

Ключевые слова: вибрационное резание; виброскорость; виброускорение; энергия рассеивания; обобщенная функция вибрационного воздействия; амплитуда колебаний; частота колебаний; шероховатость поверхности.

A. A. Vladimirov, A. P. Sergiev

**EFFECT OF THE AMPLITUDE OF OSCILLATIONS ON THE COMPONENTS
OF THE COMPLEX VIBRATION FUNCTION
OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS**

**Stary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov
(branch) NUST «MISIS»**

The article is devoted to the development of a mathematical model for the formation of a surface roughness in the form of a generalized function of the vibrational action. The model includes three main factors of the impact of vibrations in the cutting zone: the vibrational speed, the vibrational acceleration and the energy of dispersion in the cutting zone. The mathematical model reveals the physical essence of the process of vibrational cutting and allows describing the mechanism of surface roughness formation at a constant amplitude by changing the frequency of oscillations.

Keywords: cutting vibration; vibrospeed; vibroacceleration; dissipating energy; generalized function of vibration exposure; the amplitude of the oscillation; oscillation frequency; surface roughness.

В современном машиностроении все большее применение находят материалы, обладающие высокими физико-механическими характеристиками, которые ухудшают их обрабатываемость резанием. Применение вибрационного резания при точении таких материалов является одним из эффективных способов обработки. Задание определенных режимов колебаний, для обеспечения требуемой шероховатости поверхности является актуальной задачей.

На основании результатов предшествующих экспериментов [1, 2] по вибрационному точению стали 12X18H10T, можно считать установленным, что разработку математической модели, характеризующей параметры шероховатости при вибрационном резании, целесообразно представить в виде обобщенной функции вибрационного воздействия (ОФВВ) $F(A, \omega)$, включающей влияние трех основных факторов воздействия вибраций в зоне резания: виброскорости ($A\omega$), вибраци-

онного ускорения ($A\omega^2$), определяющего силу резания, и энергии рассеивания в зоне деформаций за период колебания ($A^2\omega^2$) [3].

Наличие таких факторов, как вибрационное ускорение и энергия рассеивания, определяет целесообразность поиска решения ОФВВ в виде полинома второй степени

$$Y = F(A, \omega) = B_0 + B_1X_1 + B_2X_1^2 + B_3X_2, \quad (1)$$

Принимая функцию отклика $Y = Ra$, после подстановки соответствующих факторов $X_1 = A\omega$, $X_2 = A\omega^2$ получим

$$Ra = B_0 + B_1(A\omega) + B_2(A^2\omega^2) + B_3(A\omega^2), \quad (2)$$

где B_0 – исходное значение параметра шероховатости; $B_1A\omega$ – долевое влияние виброскорости; $B_2A^2\omega^2$ – долевое влияние рассеяния энер-

гии в зоне резания за период; $B_3A\omega^2$ – долевое влияние вибрационного ускорения, характеризующее силовое воздействие.

Для вычисления коэффициентов полинома были проведены серии экспериментов на следующих режимах колебаний:

1) амплитуды $A = 10, 30$ и 50 мкм и частоты $f = 9,6; 16,7$ и $23,9$ Гц;

2) амплитуда $A = 70$ мкм и частоты $f = 50; 60$ и 70 Гц;

3) амплитуда $A = 100$ мкм и частоты $f = 5; 15$ и 25 Гц.

Значение шероховатости оценивали как среднее из четырех измерений на каждом обработанном участке. Эмпирические формулы ОФВВ при $A = 10$ мкм (3), $A = 30$ мкм (4), $A = 50$ мкм (5) приняли следующий вид

$$Ra = 3,393 - 1,13 \cdot 10^{-3}(A\omega) + 2,67 \cdot 10^{-3}(A^2\omega^2) - 7,5 \cdot 10^{-3}(A\omega^2), \quad (3)$$

$$Ra = 3,393 + 3,19 \cdot 10^{-4}(A\omega) + 2,2 \cdot 10^{-7}(A^2\omega^2) + 5,77 \cdot 10^{-6}(A\omega^2), \quad (4)$$

$$Ra = 3,393 + 3,02 \cdot 10^{-4}(A\omega) + 6,43 \cdot 10^{-8}(A^2\omega^2) + 2,84 \cdot 10^{-6}(A\omega^2). \quad (5)$$

Эмпирическая формула ОФВВ при $A = 70$ мкм, приняла вид

$$Ra = 3,393 + 2,02 \cdot 10^{-4}(A\omega) - 6,31 \cdot 10^{-9}(A^2\omega^2) + 5,23 \cdot 10^{-7}(A\omega^2). \quad (6)$$

Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования проводились при амплитуде колебаний $A = 100$ мкм и частотах от 5 до 25 Гц.

Эмпирическая формула ОФВВ при $A = 100$ мкм, приняла вид

$$Ra = 3,393 + 7,86 \cdot 10^{-4}(A\omega) - 3,12 \cdot 10^{-8}(A^2\omega^2) + 6,41 \cdot 10^{-7}(A\omega^2). \quad (7)$$

Для установления зависимости каждого составляющего фактора ОФВВ на шероховатость поверхности были построены графики (рис. 1–4).

Анализ зависимостей (рис. 1) показал, что составляющая $B_1A\omega$ для амплитуды 10 мкм уменьшается при увеличении частоты колебаний. Для амплитуд 30 и 50 мкм, увеличение составляющей $B_1A\omega$ способствует увеличению шероховатости. При этом, значение составляющей возрастает с ростом частоты колебаний и вновь уменьшается при амплитуде 100 мкм.

Из графика (рис. 2) очевидно, что для амплитуд 10, 30 и 50 мкм рост составляющей $B_2A^2\omega^2$, при увеличении частоты колебаний, способствует увеличению шероховатости. Механизм воздействия рассеивания энергии в зоне деформации изменяется с ростом амплитуды колебаний и достигает максимума при амплитуде колебаний 100 мкм, при увеличении частоты, наблюдается снижение шероховатости за

счет возрастания влияния составляющей функции $B_2A^2\omega^2$, которая растет с ростом частоты колебаний.

Что касается составляющей $B_3A\omega^2$ ОФВВ (рис. 3), то она также оказывает различное влияние на механизм формирования шероховатости, в зависимости от амплитуды колебаний, оказывал оптимальное влияние на снижение шероховатости при частотах колебаний 20...25 Гц, при $A = 100$ мкм.

Таким образом, для амплитуды 10 мкм уменьшение значения составляющей $B_3A\omega^2$, при увеличении частоты колебаний, приводит к увеличению шероховатости поверхности. При увеличении частоты колебаний для амплитуд 30, 50 и 100 мкм составляющая $B_3A\omega^2$ ОФВВ возрастает, но в отличие от зависимостей для амплитуд 30 и 50 мкм, увеличение составляющей для 100 мкм способствует уменьшению шероховатости поверхности.

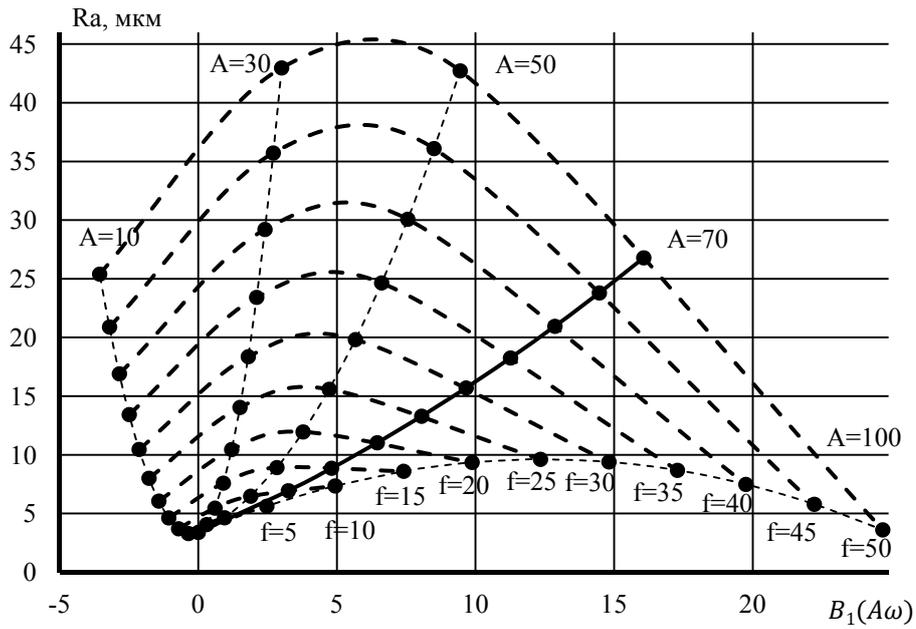


Рис. 1. Зависимость шероховатости от составляющей $B_1(A\omega)$

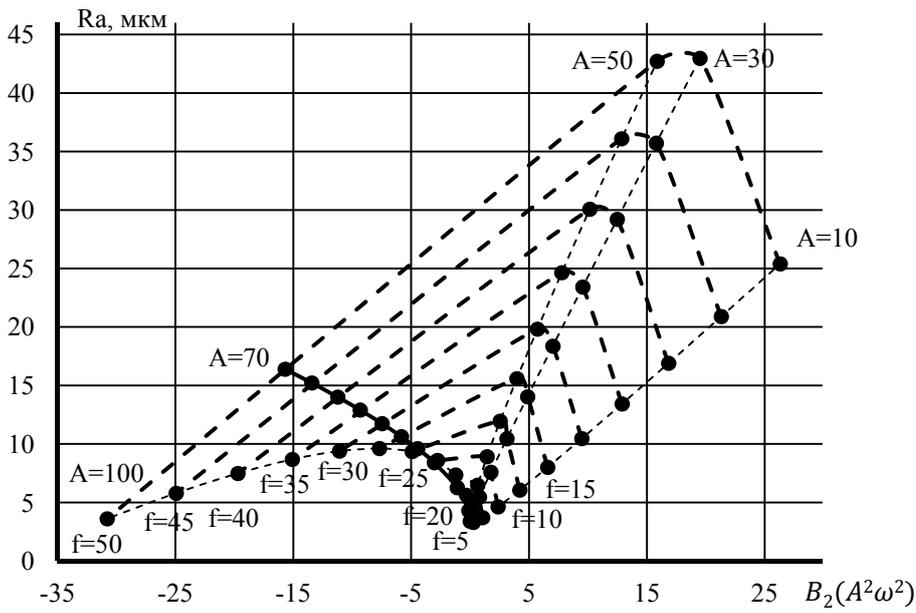


Рис. 2. Зависимость шероховатости от составляющей $B_2(A^2\omega^2)$

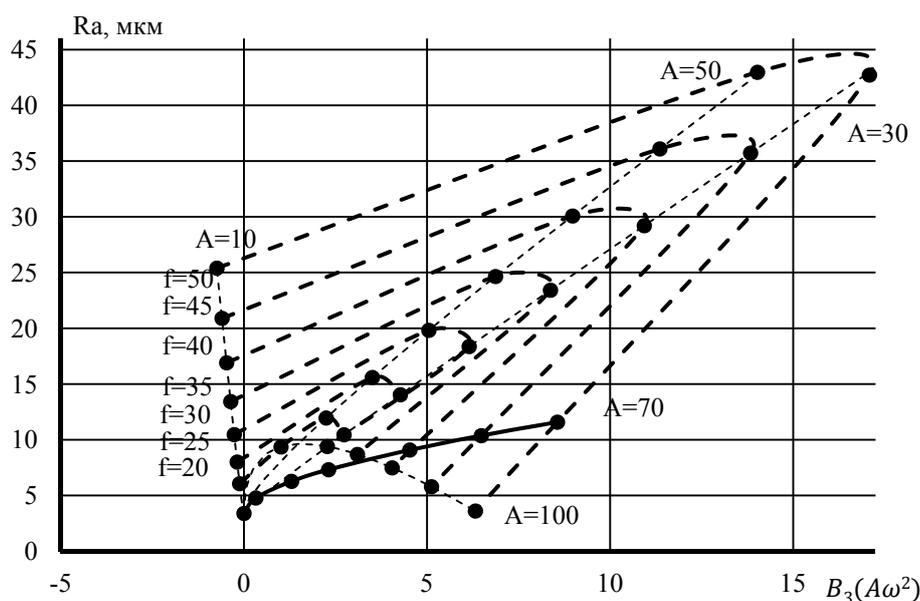
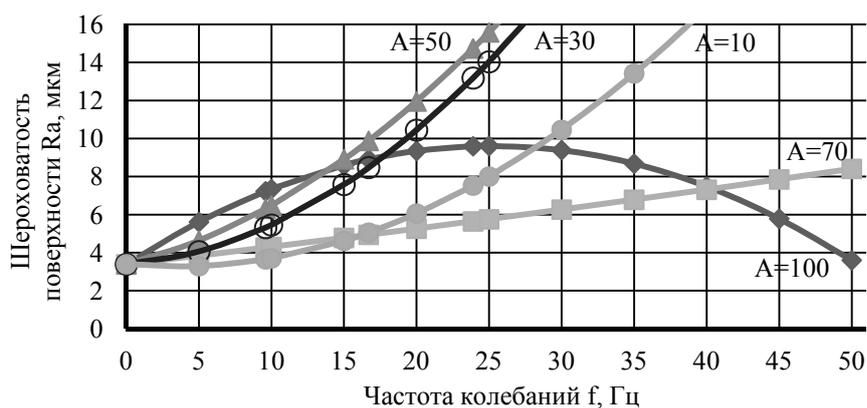
Рис. 3. Зависимость шероховатости от составляющей $B_3(A\omega^2)$ 

Рис. 4. Зависимость шероховатости от частоты колебаний

Различный характер влияния составляющих ОФВВ на шероховатость поверхности объясняется их специфическим воздействием на механизм стружкообразования в зоне резания при виброточении и наглядно демонстрируется кривыми (рис. 4). Анализ зависимости при амплитуде 100 мкм показал, что с увеличением частоты колебаний наблюдается уменьшение шероховатости поверхности, что позволяет при имеющихся технических параметрах вибрационного резания считать оптимальным.

Оценка экспериментальных и расчетных значений показала адекватность разработанных математических моделей.

Представленная математическая модель, в виде обобщенной функции вибрационного воздействия, позволяет установить оптимальные параметры вибрационного резания при требуемом уровне шероховатости поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сергеев, А. П. Исследование влияния амплитудно-частотных характеристик вибрационного точения на параметры шероховатости / А. П. Сергеев, А. А. Владимиров, Е. Г. Швачкин // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины : сб. науч. ст. : в 2 ч. Ч. 2 / редкол.: С. Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.] ; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С. 15–17.
2. Сергеев, А. П. Особенности стружкообразования при чистовом вибрационном точении стали 12Х18Н10Т / А. П. Сергеев, А. А. Владимиров, А. В. Макаров, Е. Г. Швачкин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : сб. ст. по матер. XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, (Старый Оскол, 23–25 нояб. 2016 г.), Старый Оскол: Изд-во СТИ НИТУ МИСиС, 2016. Т. 1. С. 285–288.
3. Сергеев, А. П. Физические основы процесса вибрационного резания при точении / А. П. Сергеев, А. А. Владимиров, А. В. Макаров, Е. Г. Швачкин // Научно-теоретический журнал Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 94–102.

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

И. В. Злобина, Н. В. Бекренев

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОТВЕРЖДЕННЫХ
АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ***

Саратовский государственный технический университет

им. Ю. А. Гагарина

E-mail: tnm@sstu.ru

Выполнены исследования влияния электромагнитного поля частотой 2450 МГц на изменение структуры полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных углеродными волокнами. Установлен факт квазиструктурирования отвержденной матрицы, проявляющийся в измельчении агломератов и повышении фрактальной размерности их контура на 15–20 %. Показано, что в наибольшей степени рост фрактальной размерности проявляется при максимальном увеличении фрагментов структуры с выделением образований нанометрового диапазона размеров (менее 0,1 мкм). Рост фрактальной размерности фрагментов матрицы способствует увеличению количества точек контактного взаимодействия в межфазной зоне «матрица-волокно», что может способствовать повышению физико-механических свойств ПКМ и улучшению эксплуатационных характеристик изделий из них.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, СВЧ электромагнитное поле, микроструктура, фрактальная размерность, отвержденное состояние, квазиструктурирование.

I. V. Zlobina, N. V. Bekrennev

**MODIFYING OF THE MICROSTRUCTURE OF THE CURED POLYMERIC
COMPOSITE MATERIALS REINFORCED BY CARBON FIBRES
IN THE MICROWAVE OVEN THE ELECTROMAGNETIC FIELD**

Yuri Gagarin Saratov state technical university

Researches of influence of the electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz on change of structure of the polymeric composite materials (PCM) reinforced by carbon fibers are executed. The established fact of quasistructuring the cured matrix which is shown in crushing of agglomerates and increase in fractal dimension of their contour for 15-20%. It is shown that most growth of fractal dimension is shown at the maximum increase in fragments of structure with allocation of formations of nanometer range of the sizes (less than 0,1 microns). Growth of fractal dimension of fragments of a matrix promotes increase in quantity of points of contact interaction in the interphase zone "matrix fibre" that can promote increase in the PKM physicomechanical properties and improvement of operational characteristics of products from them.

Keywords: polymeric composite materials, the microwave oven the electromagnetic field, a microstructure, fractal dimension, the cured state, quasistructuring.

Введение

В качестве конструкционных элементов авиационной и другой транспортной техники, особенно малогабаритных летательных аппаратов типа квадрокоптеров и дронов в последнее время широко используются композиционные материалы (ПКМ) типа углепластиков, состоящих из полимерной матрицы и армирующей структуры из определенным образом ориентированных углеродных волокон. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 году 23,55 млрд. долл. [1, 2]. Однако композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механиче-

ских характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов [3], что вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, приводя к увеличению веса. Данный факт весьма нежелателен для изделий авиационно-космической техники, особенно для высокоманевренных и скоростных объектов. Помимо физико-механических свойств основных компонентов, их соотношения и адгезионных характеристик важное значение для величины и равномерности прочности изделия имеет ориентация волокон и ее распределение между слоями, а также характер микроструктуры особенно в точках контакта элементов матрицы

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., 2018

* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послонно формируемых электротехнологическими методами».

с волокнами. Известные методы улучшения характеристик изделий из ПКМ, в частности – прочности, заключаются в использовании волокон повышенного качества, применении новых составов связующего (матрицы), совершенствовании технологий формирования и отверждения композиций. Все эти методы не учитывают влияния технологической наследственности операций постобработки на окончательные характеристики изделия. Внедрение данных методов сопряжено с большими затратами, связанными с перестройкой отлаженных технологий. Изложенное делает актуальным изыскание альтернативных методов повышения качества изделий из ПКМ.

Постановка задачи

Для локального управляющего воздействия на структуру объекта из неметаллических материалов в качестве наиболее эффективного метода представляется применение СВЧ электромагнитного поля.

Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [4, 5] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется применению микроволновых технологий с целью замещения существующих технологий термообработки композиций на стадии их формирования и отверждения, что не устраняет негативного влияния на внутренние напряжения, возникающие в процессе размерной обработки и сборки изделий. Исследование структуры касались также в основном материалов после их отверждения с СВЧ воздействием на композицию в вязко-текущем состоянии.

Ранее нами были получены положительные результаты по увеличению прочностных характеристик отвержденных ПКМ, армированных углеродными волокнами, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля среднего уровня мощности [6–8].

Целью исследований явилось обоснование механизма упрочняющего воздействия СВЧ электромагнитного поля на ПКМ на основе выявления изменений в его микроструктуре.

Методика исследований и аппаратура

Для обоснования полученных ранее результатов по упрочнению в СВЧ электромагнитном поле отвержденных композиционных материалов [6–8] нами выполнены исследования микроструктуры образцов после испытаний на изгибную прочность при помощи электронной микро-

скопии. Исследовали образцы из отвержденного композита КМКУ-1.80.Э0,1, состоящего из матрицы на основе клеевого связующего ВК-51 и наполнителя – углеродной ленты ЭЛУР-П-А с объемной долей наполнителя 70–75 %. Использовали образцы в виде балок сечением 7 x 10 мм и длиной 70 мм. Эксперименты проводили в специальной СВЧ установке «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех» г. Обнинск Калужской обл.) с излучающей антенной рупорного типа. Частота электромагнитного поля составляла 2450 МГц, мощность магнетрона – 1200 Вт. Регулировка подведенной мощности осуществлялась путем изменения дистанции от плоскости раскрыва рупорной антенны до образца. Обработку осуществляли на среднем уровне мощности при времени воздействия, обеспечивающем максимальный упрочняющий эффект [8]. В связи с проходящим патентованием режимы не конкретизируются. Обработывали по 3 образца. Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersay Holding, Чехия) в Лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

Результаты и обсуждение

Микрофотографии структуры контрольного и обработанного образцов представлены на рис. 1 и 2. В поле зрения 239,9–165,3 мкм (при малом увеличении) визуальное какие-либо особенности отдельных элементов структуры выявить затруднительно. Следует отметить только, что частицы матрицы более равномерно и плотно покрывают армирующую конструкцию волокон (рис. 1, а).

В поле зрения 74,79–145,5 мкм видно, что фрагменты микроструктуры контрольного образца отличаются округлостью, в среднем их число меньше, чем у обработанного образца. У обработанного образца отмечается многогранность фрагментов микроструктуры и определенная хаотичность их расположения, что может обеспечить повышение изотропности прочностных характеристик материала за счет разнонаправленности точек контакта (рис. 1, б). В поле зрения 33,07 и 51,32 мкм видна существенно более развитая поверхность контакта армирующих волокон с матрицей после СВЧ обработки (рис. 2, в). Практически вся поверхность волокна имеет адгезионную связь со связующим материалом. В поле зрения 16,53 мкм как на боковой поверхности контрольного образца (рис. 2, б), видна явная округлость частиц

матрицы и их меньшее количество в контактных с волокнами зонах. Для обработанного образца так же, как и при меньшем увеличении,

заметно существенное возрастание количества частиц. При этом их размеры уменьшились, а границы выглядят более развитыми (рис. 2, з).

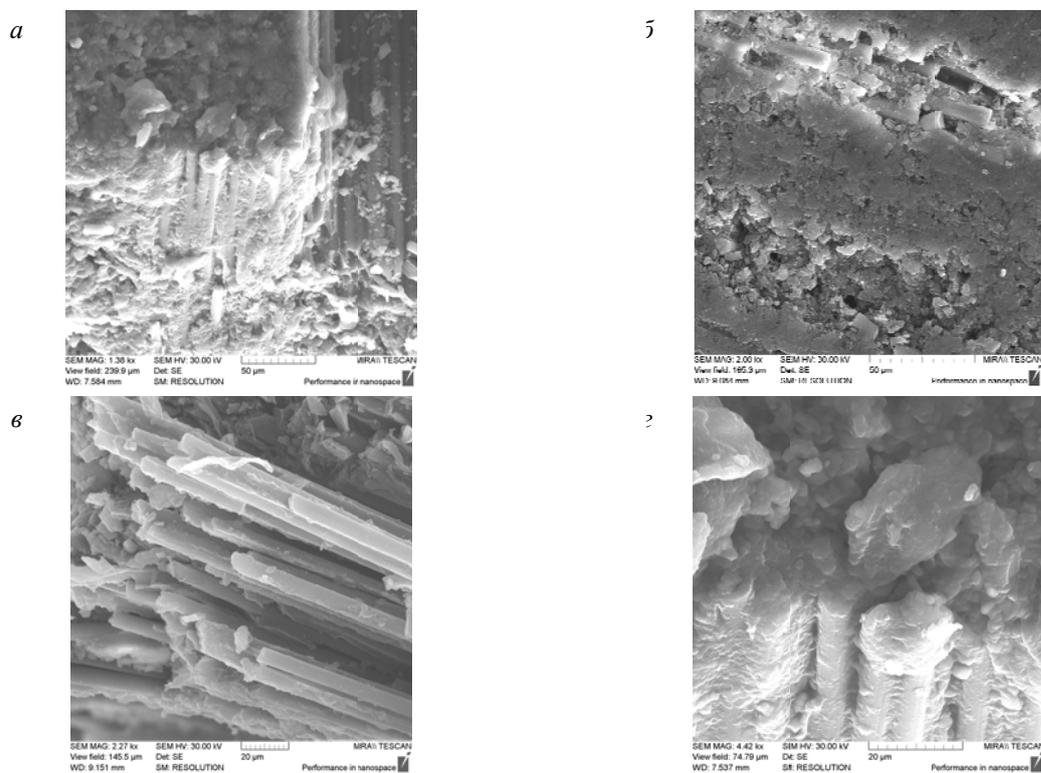


Рис. 1. Микроструктура контрольного (а, б) и обработанного (в, г) образцов при малом увеличении в поле зрения 239,9 мкм (а), 165,3 мкм (б), 145,5 мкм (в), 74,79 мкм (г)

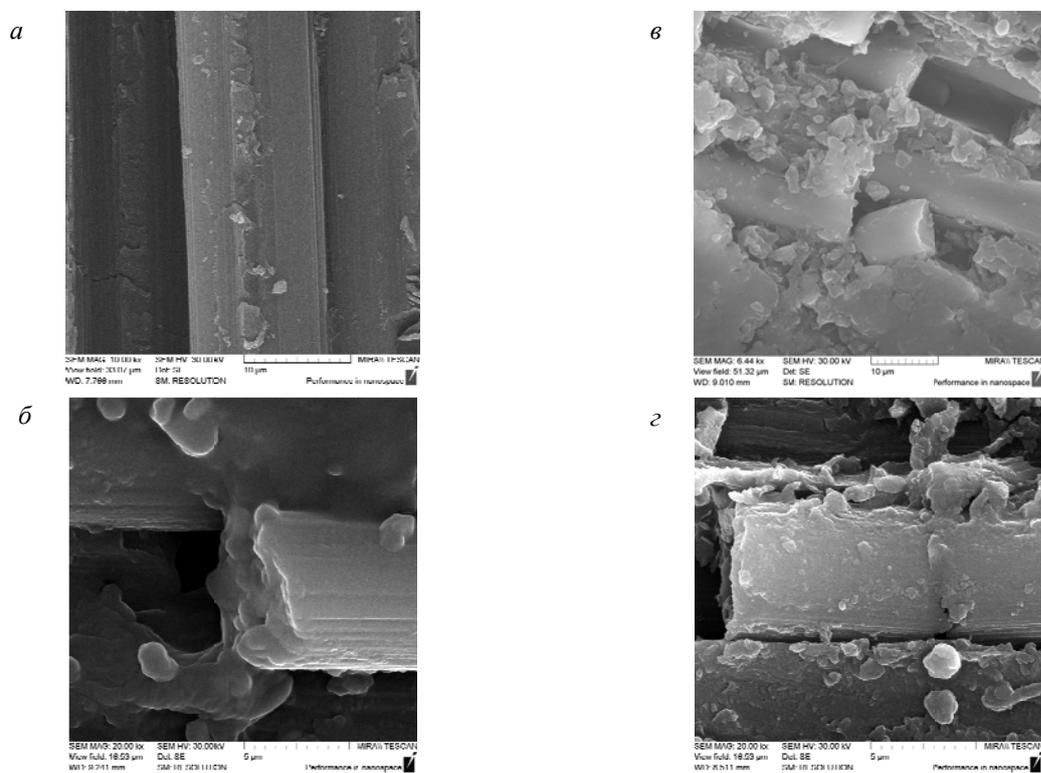


Рис. 2. Микроструктура контрольного (а, б) и обработанного (в, г) образцов при большом увеличении в поле зрения 33,07 мкм (а), 51,32 мкм (б), 16,53 мкм (в, г)

Для количественного анализа изменений в микроструктуре отвержденных образцов было проведено преобразование изображений в черно-белые поля (рис. 3 и 4) с последующим расчетом фрактальной размерности характеристических выделенных в структуре фрагментов.

но-белые поля (рис. 3 и 4) с последующим расчетом фрактальной размерности характеристических выделенных в структуре фрагментов.

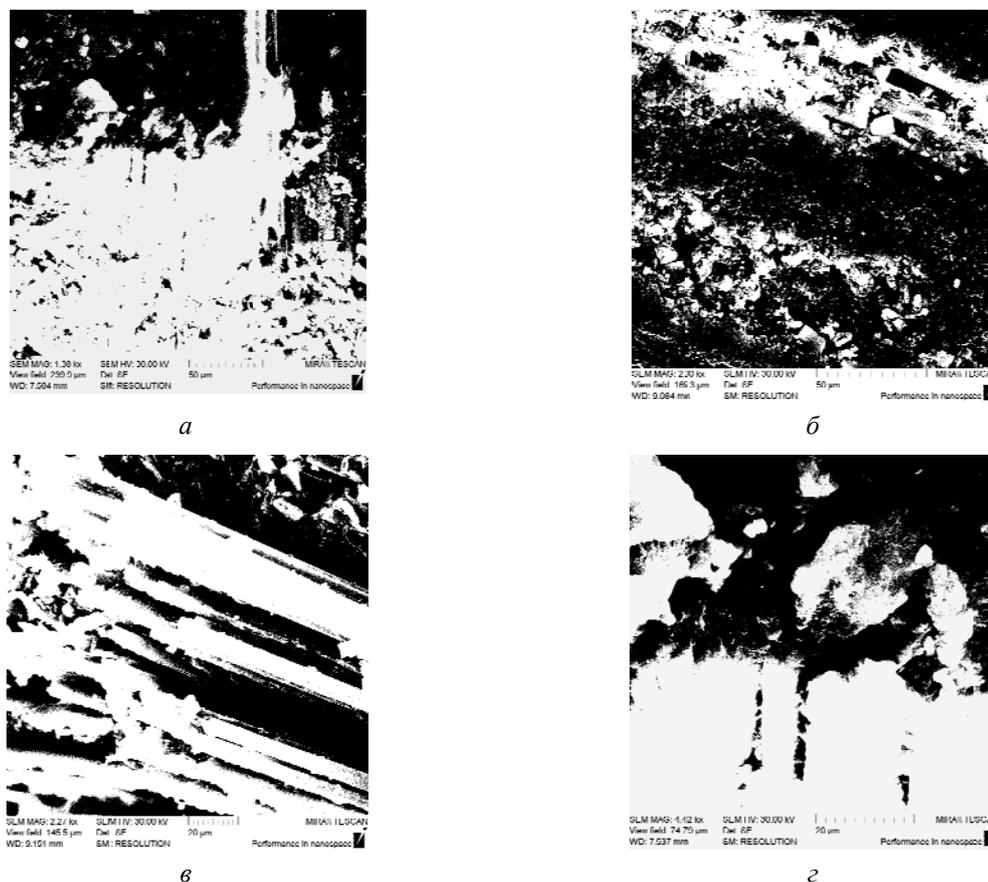


Рис. 3. Микроструктура контрольного (а, в) и обработанного (б, г) образцов в черно-белых полях при малом увеличении в поле зрения 239,9 мкм (а), 165,3 мкм (б), 145,5 мкм (в), 74,79 мкм (г)

В черно-белых полях микрофотографий отчетливо проявляется увеличение рельефности фрагментов микроструктуры образцов после воздействия СВЧ электромагнитного поля.

В процессе анализа контура выделенных объектов установлено, что значимые (более 10 %) изменения проявляются при максимальном увеличении (поле зрения менее 75 мкм).

С учетом установленной шкалы размерной сетки в 20 и 5 мкм это означает, что на границе контура объекта возможно достоверное выделение структур с размерами менее 0,1 мкм, т. е. относящихся к нанодиапазону параметров. Повышение степени увеличения изображения контрольного образца позволяет выявить рост фрактальной размерности не более чем на 1,5 %. У обработанного образца рост фрактальной

размерности при большем увеличении составляет порядка 15–20 %. С учетом данных расчета это означает, что именно наноразмерные структуры вносят вклад в рост фрактальной размерности объектов, а следовательно и в увеличение точек когезионного взаимодействия, что объясняет повышение прочностных характеристик материала.

Также это означает, что воздействие СВЧ электромагнитного поля на отвержденный материал окончательно сформированного образца вызывает измельчение структурных образований элементов микроструктуры, что позволяет высказать предположение о ее перестройке, «квазиструктурировании», приводящем к качественному изменению механических свойств ПКМ.

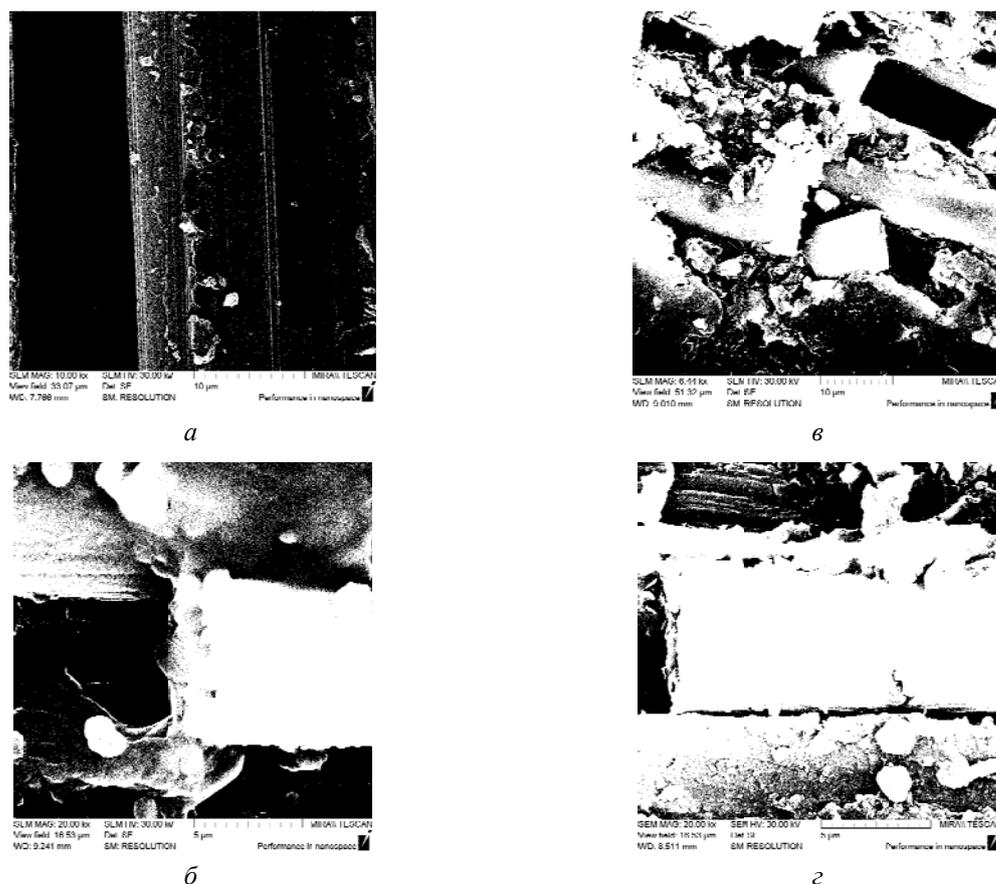


Рис. 4. Микроструктура контрольного (а, б) и обработанного (в, г) образцов в черно-белых полях при большом увеличении в поле зрения 33,07 мкм (а), 51,32 мкм (в), 16,53 мкм (б, г)

Выводы

Таким образом, изучение микрофотографий структуры контрольных и обработанных образцов подтвердило высказанное нами выше предположение о механизме повышения прочности композиционных армированных углеродным волокном материалов за счет возрастания количества сшивок и точек адгезионного взаимодействия волокон и матрицы, а также волокон между собой после воздействия СВЧ электромагнитного поля на окончательно сформированный материал. При этом увеличение точек взаимодействия подтверждается определенным нами на основе анализа выделенных фрагментов значимым (на 15–20 %) ростом фрактальной размерности границ характерных объектов микроструктуры. В данном направлении целесообразно проведение уточняющих измерений и вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошкин, Р. П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://sprmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.
2. Мирный, М. Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году URL: <https://mplast.by/>

[novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/](https://www.voprosy.ru/news/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/), (дата последнего обращения 20.09.2016 г.).

3. Каблов, Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520–530.
4. Коломейцев, В. А. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В. А. Коломейцев, Ю. А. Кузьмин, Д. Н. Никуйко, А. Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы, 2013. – Т. 18. – № 12. – С. 25–31.
5. Estel, L. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. – 2004. – № 11. – P. 33.
6. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25–30.
7. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // Solid State Phenomena. 2016. V. 870, p.p. 101–106.
8. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V., Muldasheva, G.K. // AIP Publishing, vol. 1783, 10 November 2016, 020236-1 – 020236-4.

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

И. В. Злобина, Н. В. Бекренев

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО УПРОЧНЯЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Саратовский государственный технический университет

им. Ю. А. Гагарина

E-mail: tmm@sstu.ru

Выполнены исследования прочностных характеристик композиционных угле- и стеклопластиков, после их модифицирования микроволновым излучением различной подведенной мощности. Установлено, что по сравнению с контрольными образцами микроволновое воздействие на окончательно сформированный объект при определенном для каждого материала уровне мощности позволяет повысить предельные напряжения изгиба углепластика на 47–53 %, стеклопластика – на 60 %. При этом отмечены значительные изменения микроструктуры, проявляющиеся в повышении ее однородности и плотности при возрастании точек контакта агломератов матрицы и армирующих волокон.

Ключевые слова: композиционные материалы, углепластики, стеклопластики, контактная зона, микроструктура, микроволновая обработка изделий.

I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev

RESEARCH OF THE MICROWAVE STRENGTHENING MODIFYING OF CONSTRUCTIONAL ELEMENTS FROM COMPOSITE MATERIALS

Yuri Gagarin Saratov state technical university

Researches of strength characteristics composite coal - and fibreglasses, after their modifying are executed by microwave of various brought power. It is established that in comparison with control samples microwave impact on finally created object at the power level determined for each material allows to increase the extreme tension of a bend of a coal plastic for 47–53 %, fibreglass - for 60 %. At the same time the considerable changes of a microstructure which are shown in increase in its uniformity and density at increase of points of contact of agglomerates of a matrix and the reinforcing fibers are noted.

Keywords: composite materials, coal plastics, fibreglasses, contact zone, microstructure, microwave processing of products.

Введение

Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей (ПКМ) и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике [1, 2]. Однако, композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов [3]. В тоже время перспективные авиационные комплексы, особенно малогабаритные беспилотные и дистанционно пилотируемые, будут высокоманевренными, что выдвигает повышенные требования к механической прочности их конструкционных элементов, имеющих сложные формы, сильно влияющие на распре-

деление опасных механических и температурных напряжений. Заданный комплекс свойств возможно получить, изменяя технологию создания материала и формования из него изделия. Также можно модифицировать структуру отвержденного материала с целью улучшения его эксплуатационных характеристик. Разработка оптимального технического решения, учитывающего как техническую, так и экономическую и организационную составляющие производственного цикла, представляет собой актуальную научно-практическую задачу с учетом сложности и трудоемкости существующих технологий синтеза компонентов ПКМ и затратности перестройки отлаженного производства волокон, препрегов и формования изделий. С этих позиций рациональным представляется воздействие на отвержденный ПКМ в составе готового изделия в процессе постобработки.

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., 2018

* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послыбно формируемых электротехнологическими методами».

Постановка задачи

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов в качестве одного из наиболее эффективных методов представляются применение микроволнового излучения (СВЧ электромагнитного) поля. Однако, большинство исследований данных электротехнологических процессов касались воздействий на процесс синтеза компонентов или отверждения композиции [4]. Практически отсутствует информация о механизме воздействия микроволнового излучения на отвержденную структуру окончательно сформированного изделия. В тоже время применение данного воздействия на композиционные материалы в процессе их формирования не всегда целесообразно по причине необходимости внесения изменений в отлаженный и сложный технологический процесс синтеза компонентов, выкладки слоев композита, отверждения и финишной обработки. Ранее нами получены положительные результаты по микроволновому упрочнению стержней из пул-трузионного карбона [5].

Целью наших исследований является экспериментальное определение возможности упрочняющего микроволнового модифицирования окончательно сформированной и отвержденной структуры конструкционных композиционных материалов типа стекло- и углепластиков с выявлением режимов, не приводящих к нагреву материала выше (35–40) °С.

Методика исследований, оборудование и аппаратура

Нами исследованы образцы из слоистых

стекло-, углепластиков в виде пластин с размерами 80,0x15,0x2,0 мм. В экспериментах использовали микроволновую установку «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл. с излучающей антенной рупорного типа. Установка генерирует электромагнитное поле 2450 МГц при выходной мощности 1200 Вт. Применяли три режима СВЧ мощности: малой РI, средней РII и высокой РIII. В связи с патентованием способа модифицирования в настоящее время конкретные технологические режимы не указываются. Время обработки устанавливали равным 1, 2, 3 минуты при разных уровнях мощности. Испытания образцов до и после обработки проводили на установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения. Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки производилась по специальной заложенной в установке программе (LabVIEW, г. Орел) и позволила получить графики нагрузки (момента на приводе) в динамике от момента приложения до разрушения. По известным зависимостям механики материалов вычисляли напряжения изгиба. Поверхность зоны деформации изучали при помощи цифрового микроскопа Digital Microscope 2.0 MP 1000X (GAOSUO, Китай) при увеличении x500 с выводом на экран ноутбука.

Результаты и обсуждение

По результатам обработки данных экспериментальной установки получены графические зависимости (рис. 1).

При малой мощности микроволнового излучения изгибные напряжения возрастают в среднем на 41 % и практически не зависят от времени

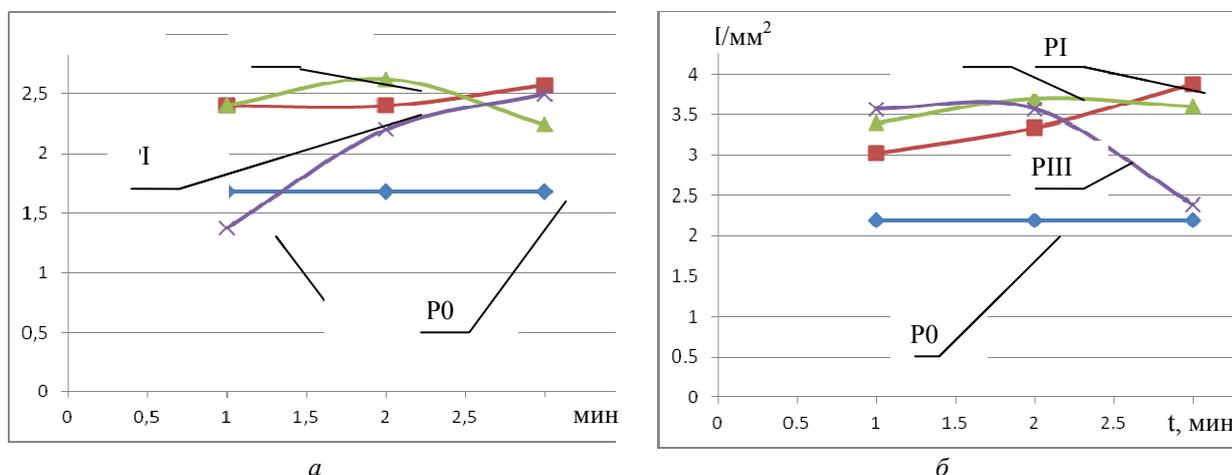


Рис. 1. Влияние времени микроволновой обработки углепластика (а) и стеклопластика (б) на изгибные напряжения σ_f при различной подведенной мощности

воздействия. При обработке на средней мощности зависимость эффекта упрочнения от времени также незначительна. Эффект упрочнения нестабилен и составляет от 29 % до 53 %. При использовании электромагнитного поля большой мощности проявляется явная зависимость упрочнения материала от времени. При увеличении времени воздействия с 1,5 до 3 мин изгибные напряжения возрастают почти на 47 %. Однако при малых временах наблюдается снижение прочности, что требует своего объяснения.

Характер зависимостей для стеклопластика отличается от представленных на рис. 1, *а*: при малом времени воздействия с увеличением подводимой мощности излучения наблюдается стабильное увеличение прочности образца, определяемое по предельным напряжениям изгиба, при увеличении времени прочность образца возрастает, но имеет тенденцию к снижению при возрастании мощности. Наконец, при максимальном из исследованного диапазона времени воз-

действия достигается максимальный эффект упрочнения при малой мощности, но при ее увеличении резко снижается. При максимальной мощности прочность образца остается практически сопоставимой с контрольным. В данном случае, очевидно, проявляется иной механизм воздействия электромагнитного поля на стеклопластик по сравнению с углепластиком. С течением времени при малом уровне мощности постепенно развиваются процессы образования дополнительных швов, как в матрице, так и между матрицей и армирующими волокнами, а также и между самими волокнами, образующими конгломераты (спаянные жгуты). Вследствие образования такой максимально связанной структуры материал приобретает максимальную прочность. Эффект упрочнения по изгибным напряжениям составляет в этом случае более 60 % и превышает достигнутый для углепластика.

Изучение микроструктуры зоны деформации образцов (рис. 2 и 3) показало следующее.

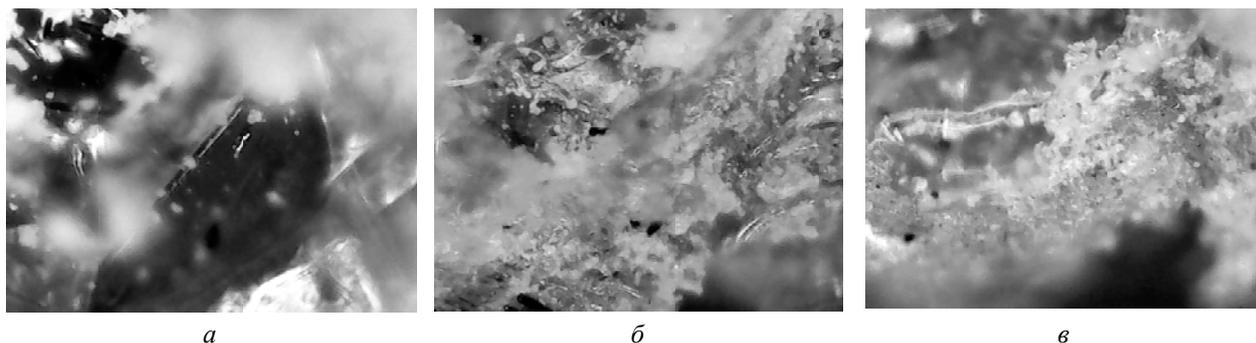


Рис. 2. Микроструктура контрольного образца из углепластика (*а*) и образцов, обработанных при средней (*б*) и большой (*в*) мощности микроволнового излучения $\times 500$

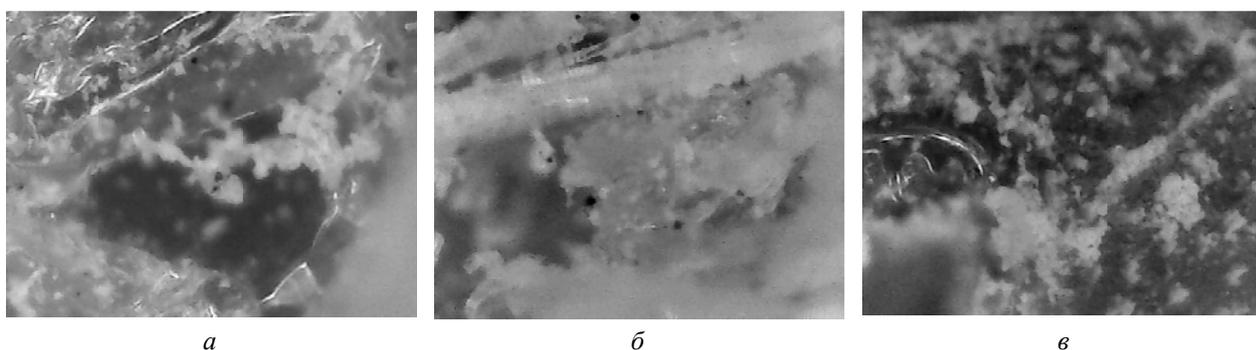


Рис. 3. Микроструктура контрольного образца из стеклопластика (*а*) и образцов, обработанных при средней (*б*) и большой (*в*) мощности микроволнового излучения $\times 500$

В зоне разрушения контрольного образца из углепластика (рис. 2, *а*) видны разрывы раскрошившейся матрицы, что привело к ослаблению связей между армирующими волокнами, и хотя последние сохранили в основном цело-

стность, вследствие отдельного функционирования не обеспечили сохранения формы образца. Структура обработанного при малой мощности образца характеризуется большей монолитностью, заметны незначительные трещины,

видно, что волокна связаны между собой структурами матрицы, имеющими более развитую поверхность контакта. При обработке на средней мощности в течение 3 мин (рис. 2, б) заметны трещины в матрице, разделяющие структуру на блоки, хотя и состоящие из конгломератов волокон. Микроструктура образцов, обработанных при большой мощности электромагнитного поля (рис. 2, в), имеет вид сплавленных блоков и микроблоков, имеющих очень развитую поверхность. Появляется большое количество агломератов матрицы с сильно развитой поверхностью, которые «переформатируют» связи волокон и матрицы: вместо определенного количества крупных сплавленных агломератов и небольшого количества значительных по объему полостей и разрывов возникает масса мелких агломератов, формируется многоконтактная структура, повышающая гибкость и упругость системы «волокно-матрица», а, следовательно,

прочность. В зоне разрушения контрольного образца из стеклопластика (рис. 3, а) видны разрывы волокон и частицы раскрошившейся матрицы. Структура обработанного при малой мощности образца характеризуется монолитностью, волокна связаны между собой «звездчатыми» структурами матрицы, имеющими развитую поверхность контакта. При обработке на средней мощности в течение 3 мин (рис. 3, в) заметны отдельные волокна, отделившиеся друг от друга, хотя с сохранившимися «звездчатыми» образованиями на поверхности. После воздействия в течение 3 мин на большой мощности образец выглядит полностью деструктурированным.

Для количественной оценки изменений, произошедших в микроструктуре исследованных материалов, микрофотографии были преобразованы в черно-белые изображения (рис. 4 и 5) с последующим фрактальным анализом типичных фрагментов.

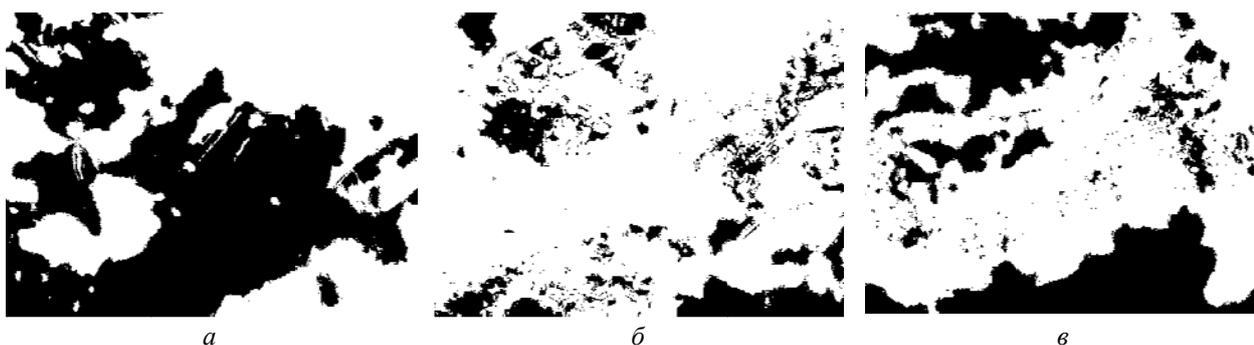


Рис. 4. Микроструктура контрольного образца из углепластика (а) и образцов, обработанных при средней (б) и большой (в) мощности микроволнового излучения $\times 500$



Рис. 5. Микроструктура контрольного образца из стеклопластика (а) и образцов, обработанных при средней (б) и большой (в) мощности микроволнового излучения $\times 500$

Установлено, что фрактальная размерность фрагментов структуры обработанных образцов, особенно при среднем уровне мощности, превышает данный параметр у контрольного образца в среднем на 25–30 %. При этом для углепластика этот показатель составляет 18–25 %, для стеклопластика – 20–30 %.

Полученные результаты могут быть объяснены следующим образом. Исследованный углепластик обладает относительно рыхлой (неплотной) упаковкой углеродных волокон и меньшее содержание армирующих компонентов. Соответственно, действие микроволнового излучения, в основном проявляющееся на уровне

образования дополнительных сшивок молекул матрицы, и способствующее образованию новых точек адгезионного взаимодействия полимера с волокнами, приводит к большему эффекту для материала с меньшим содержанием углеродного армирующего компонента. При возрастании подведенной к стеклопластику мощности излучения за счет большего, чем у углепластика тангенса угла диэлектрических потерь, происходит возрастание тепловыделения, приводящего к дегидратации и охрупчиванию как матрицы, так и армирующих волокон. При максимальной мощности этот эффект проявляется в большей степени, поэтому увеличение времени воздействия вызывает разогрев материала, отрицательно сказывающийся на адгезии компонентов и также – когезионном взаимодействии структурных компонентов матрицы. Соответственно сопротивление действию нагрузок снижается и достигает минимума при длительной обработке на максимальной из исследованного диапазона мощности.

Заключение

Таким образом, установлено, что по сравнению с контрольными образцами микроволновое воздействие на окончательно сформированный объект при определенном для каждого материала уровне мощности позволяет повысить предельные напряжения изгиба углепластика на 47–53 %, стеклопластика – на 60 %. При этом отмечены значительные изменения микроструктуры, проявляющиеся в повышении ее однородности

и плотности при возрастании точек контакта агломератов матрицы и армирующих волокон. Количественно это увеличение проявляется в росте фрактальной размерности выделенных фрагментов микроструктуры до 30 % по сравнению с контрольными образцами.

Полученные результаты позволяют рекомендовать данный метод упрочнения ПКМ для разработки серийных электрофизических технологий повышения эксплуатационных механических характеристик окончательно сформированных изделий перспективной авиационной и другой транспортной техники путем управляемого микрофолнового квазиструктурирования матрицы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошкин, Р. П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>, дата последнего обращения 28.01.2017 г.
2. Мирный, М. Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovyy-gyynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, дата последнего обращения сентябрь 2016 г.
3. Каблов, Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук, 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520–530.
4. Архангельский, Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю. С. Архангельский. – Саратов : Научная книга, 2011. – 560 с.
5. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // Solid State Phenomena. 2016. V. 870, p.p. 101–106.

УДК 621.9

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

К ВОПРОСУ О ПРИЧИНАХ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: leeandrej@yandex.ru

Рассмотрена неустойчивость стружкообразования при точении аустенитной стали твердосплавными инструментами. Показано, что частота неустойчивости в большей степени зависит от скорости резания, чем от марки твердого сплава и контактного взаимодействия на передней поверхности. Поэтому основной причиной неустойчивости стружкообразования являются процессы деформирования в зоне стружкообразования, а не неустойчивость деформирования в контактной зоне на передней поверхности.

Ключевые слова: точение, аустенитная сталь, твердосплавный инструмент, передняя поверхность, контактное взаимодействие, неустойчивость стружкообразования, частота неустойчивости, причины неустойчивости.

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

TO THE QUESTION ABOUT THE CAUSES OF THE INSTABILITY OF CHIP FORMATION DURING CUTTING OF AUSTENITIC STEEL BY CARBIDE TOOL

Volgograd State Technical University

Considered are the instability of chip formation when turning austenitic steel with carbide tooling. It is shown that frequency of instability depends mainly upon speed of cutting, than from mark of hard alloy and the contact interaction on the front surface. Therefore, the instability of chip formation is due mainly to deformation-processes in shear zone and not to instability of deformation in the contact zone on front surface.

Keywords: turning, austenitic steel, carbide tool, the front surface, the contact interaction, the instability of chip formation, frequency of instability, parents of instability.

Резание аустенитных сталей и других труднообрабатываемых материалов с практически применяемыми скоростями сопровождается неустойчивостью стружкообразования, существенно влияющей не только на интенсивность, но и на механизм изнашивания твердосплавного инструмента [1]. Выявление физического механизма неустойчивости (формирования циклических стружек) имеет большое теоретическое и практическое значение.

В работах Н. В. Талантова образование циклических стружек объяснено изменением соотношения интенсивности деформационного упрочнения и температурного разупрочнения на конечной границе самой зоны стружкообразования. Но это противоречит основному выводу работ Н. В. Талантова – признанию первичности контактных температурных и деформационных процессов по отношению к стружкообразованию. Действительно, причинно-следственная цепочка «повышение скорости – рост температуры и снижение сопротивления деформированию в контактной зоне – увеличение угла сдвига с уменьшением усадки стружки и сил резания» очевидна и необратима (как и подобная цепочка при снижении теплопроводности твердого сплава – переходе от группы ВК к ТТК и ТК). К тому же путем замера микротвердости было показано, что одновременно со сменой фаз сжатия и локализованного сдвига при формировании стружки изменяется интенсивность деформирования контактных слоев обрабатываемой стали на передней поверхности [2, 3]. Противоречие налицо.

В предложенной работе приведены дополнительные данные, касающиеся природы неустойчивости. При этом статья ни в коей мере не претендует на окончательное и исчерпывающее решение вопроса о ее механизме.

Исследования проводились при точении стали 12X18H10T инструментом из существенно отличающихся по теплопроводности твердых сплавов – ВК6 и ТТ20К9. Скорость резания варьировалась в диапазоне $v = 15-150$ м/мин при подаче 0,3 мм/об и глубине резания 1,5 мм.

Основная геометрия резцов: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\phi = 45^\circ$. Коэффициент усадки стружки ξ определялся как отношение пути, пройденного резцом за один оборот заготовки, к длине соответствующего участка стружки. Частота неустойчивости стружкообразования $f_{ц}$ вычислялась по скорости стружки $v_c = v/\xi$ и шагу неустойчивости (расстоянию между соседними зубчиками) на внешней стороне стружки. Корни стружек получали с помощью «падающего» резца.

На рис. 1 приведены результаты исследований – зависимости усадки стружки ξ и частоты неустойчивости стружкообразования $f_{ц}$ от скорости резания v . Здесь же представлены скоростные диапазоны существования видов контактного взаимодействия на передней поверхности, а также границы начала и завершения развития неустойчивости стружкообразования (перехода с ростом v от сливной стружки к строго циклической).

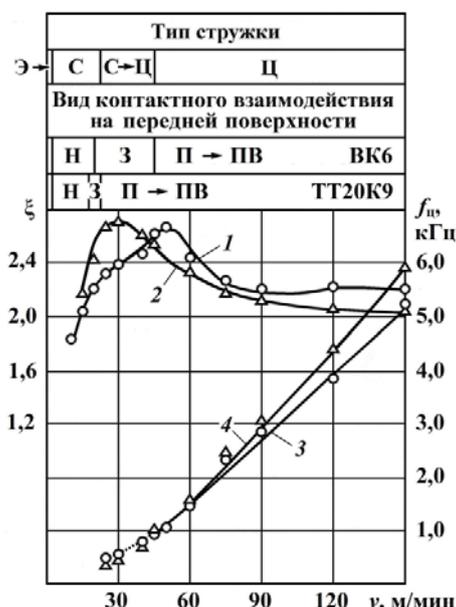


Рис. 1. Скоростные диапазоны существования видов контактного взаимодействия, типов формирующейся стружки и зависимости усадки стружки ξ (1 и 2) и частоты неустойчивости стружкообразования $f_{ц}$ (3 и 4) от скорости резания v при точении стали 12X18H10T инструментом из ВК6 (1 и 3) и ТТ20К9 (2 и 4). Типы стружек: Э – элементная, С – сливная, Ц – циклическая. Виды взаимодействия: Н – нарост, З – застойная зона со смещенным наростом, П – пластический контакт, ПВ – пластический и вязкий контакт

Изучение микрошлифов корней стружек показало, что скоростные диапазоны существования сливных (без следов неустойчивости), циклических (см., например, рис. *a* в [4]), а также стружек переходного типа (обозначение «С-Ц» на рис. 1; зубчики на стружке есть, но степень деформации металла в фазах сжатия и сдвига отличается незначительно) оказались практически одинаковыми для обеих марок твердых сплавов. Напротив, скоростные границы видов контактного взаимодействия для резки отличающихся по теплопроводности (до двух раз [5]) вольфрамокобальтового и титаносодержащего твердых сплавов различались существенно. Так, переход с ростом v к пластическому течению контактных слоев (полному отсутствию застойных явлений – П и ПВ на рис. 1) для твердого сплава ВК6 с гораздо большей теплопроводностью завершается при скорости 45 м/мин – вдвое большей, чем для ТТ20К9 (22,5 м/мин). Соответственно, максимум на графике зависимости $\xi(v)$ для ВК6 наблюдается при значительно большей скорости резания, чем для ТТ20К9.

Монотонно возрастающие зависимости частоты неустойчивости от скорости резания $f_{ц}(v)$ для резцов из ВК6 и ТТ20К9 практически совпадают вплоть до $v = 75$ м/мин. Расхождение, ожидаемое исходя из того, что первопричиной неустойчивости являются процессы в контактной зоне (меньшая теплопроводность ТТ20К9 обуславливает большую контактную температуру, что должно бы приводить, аналогично увеличению скорости, к росту $f_{ц}$), проявляется лишь начиная

с $v = 90$ м/мин. Однако даже для наибольшей из задействованных скоростей (150 м/мин) различие не превышает 15 %. Кроме того, расхождение кривых $f_{ц}(v)$ для ВК6 и ТТ20К9 может иметь и другое объяснение – уменьшение переднего угла резцов за счет деформации более пластичного сплава ВК6, проявляющейся для высоких скоростей даже при кратковременном резании (установлено заметное снижение частоты неустойчивости при уменьшении переднего угла [6]). Влияние пластической деформации режущего клина с уменьшением переднего угла на снижение $f_{ц}$ для ВК6 подтверждается и не вполне естественной стабилизацией величины ξ при скоростях выше 75 м/мин. Отметим также, что исследования микротвердости на косых срезах корней стружек [7] показали отсутствие неравномерности пластической деформации контактных слоев обрабатываемой стали, максимально приближенных к передней поверхности.

Решающим аргументом в пользу того, что основной причиной неустойчивости являются процессы в самой зоне стружкообразования, является сопоставление наблюдаемых на микрошлифах корней стружек картин неустойчивости и контактного взаимодействия. На рис. 2 приведены микрофотографии корней стружек: для случая обработки с меньшей скоростью (25 м/мин) резцом из менее теплопроводного сплава ТТ20К9 (рис. 2, *a*) и при резании инструментами из гораздо более теплопроводного сплава ВК6 с большими скоростями – 30 м/мин (рис. 2, *б*) и 40 м/мин (рис. 2, *в*).

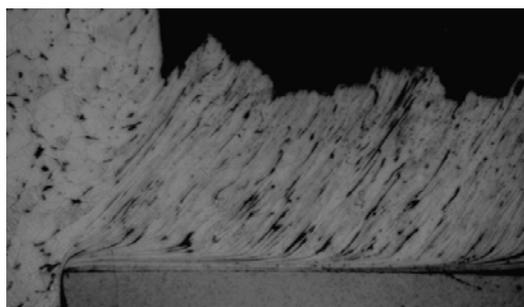
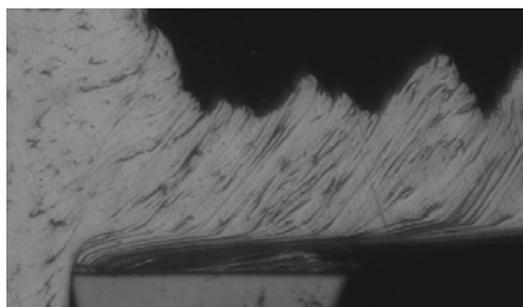
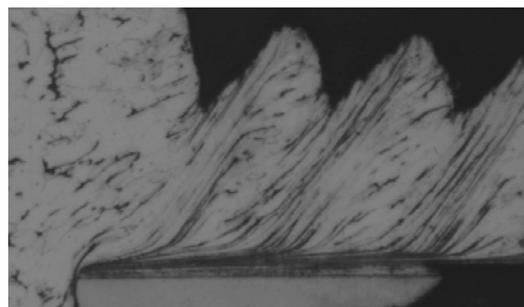
*a**б**в*

Рис. 2. Микрошлифы корней стружек, полученных при точении стали 12Х18Н10Т резцами из ТТ20К9 с $v = 22,5$ м/мин (*a*, $\times 100$), ВК6 с $v = 30$ м/мин (*б*, $\times 80$) и ВК6 с $v = 40$ м/мин (*в*, $\times 100$)

В первых двух случаях (рис. 2, *а* и *б*) наблюдается стружка переходного типа (от сливной к циклической) – толщина стружки меняется, но в ее теле нет ярко выраженных следов фаз сжатия и локализованного сдвига. При этом для инструмента из ТТ20К9 (рис. 2, *а*; $v = 25$ м/мин) имеет место полностью завершившийся переход к взаимодействию пластическим контактом. Для резца из ВК6, несмотря на большую скорость $v = 30$ м/мин (рис. 2, *б*), в контакте сохраняется застойная зона со смещенным наростом. Но при этом неустойчивость стружкообразования проявляется ярче (рис. 2, *б*) – наблюдаются не только более регулярные колебания толщины стружки (на рис. 2, *а* они скорее случайные), но и сильнее выражены различия степени деформации металла в теле стружки (на рис. 2, *а* практически отсутствуют). При дальнейшем увеличении v до 40 м/мин для резца из ВК6 стружкообразование приближается к строго циклическому (рис. 2, *в*) – несмотря на сохранение остатков смещенного нароста. Следовательно, определяющим фактором для неустойчивости является не вид контактного взаимодействия, а скорость резания.

Таким образом, возникновение и развитие неустойчивости определяется, главным образом, не процессами в контактной зоне, а закономерностями деформирования металла в самой зоне стружкообразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Липатов, А. А.* Влияние неустойчивости стружкообразования и особенностей контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности твердосплавного инструмента на его изнашивание при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 30–34.
2. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания / Н. В. Талантов // Физические процессы при резании металлов : сб. науч. тр. / ВолГПИ. – Волгоград, 1984. – С. 3–37.
3. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
4. *Липатов, А. А.* Характер контактного взаимодействия на площадке износа твердосплавного инструмента при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // Известия ВолГТУ : науч. журнал № 5 (200) / ВолГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 28–30.
5. *Резников, А. Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
6. *Липатов, А. А.* Влияние переднего угла на износ твердосплавного инструмента при точении аустенитной стали в условиях неустойчивого стружкообразования / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 (72) / ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 6). – С. 26–28.
7. *Липатов, А. А.* Неустойчивость деформирования в контактной зоне в условиях неустойчивого стружкообразования при резании аустенитной стали твердосплавным инструментом / А. А. Липатов // Известия ВолГТУ : науч. журнал № 5 (200) / ВолГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 26–28.

УДК 621.922

А. Б. Переладов

РЕШЕНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ШЛИФОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ ТРЕХМЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Курганский государственный университет

E-mail: pe_lov@mail.ru

В статье приведены методика исследования и полученные результаты, содержащие данные о параметрах микровзаимодействия вершин активных абразивных зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью заготовки в процессе шлифования, а именно о величине и характере статистического распределения площадей максимальных поперечных сечений срезаемых стружек. Исследования проводились с использованием разработанных компьютерных статистико-вероятностных моделей рабочей поверхности инструмента и процесса шлифования. Приведены примеры использования разработанной методики для конкретных условий процесса шлифования, описаны полученные результаты, сформулированы выводы.

Ключевые слова: процесс шлифования, микрорезание, сечение стружки компьютерная модель, методика расчета.

A. B. Pereladov

THE SOLUTION OF THE BASIC EQUATION OF GRINDING USING THE TECHNIQUE OF THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODELING

Kurgan state University

The article presents the research methodology and the results containing data on the parameters of micro-action of the vertices of the active abrasive grains of the grinding wheel with the workpiece surface processed during grinding, namely the size and nature of the statistical distribution of the areas of the maximum cross-sections of cut chips. Studies were carried out using the developed computer statistical and probabilistic models of the working surface of the tool and the grinding process. Examples of application of the developed technique for specific conditions of the grinding process are given, the obtained results are described, conclusions are formulated.

Keywords: grinding process, micronetinae, the cross section of the chip of the computer model, the method of calculation.

Введение

Шлифование является одним из самых распространенных и эффективных методов механической обработки, обеспечивающий высокие производительность удаления припуска и качество полученной поверхности. Однако, проектирование режимно-инструментального оснащения операций шлифования сегодня осуществляется, в большинстве случаев, с использованием справочных таблиц и других источников информации, не учитывающих многие значимые факторы процесса шлифования, влияющие на его показатели и результаты обработки. Численные расчеты оптимальных режимов и характеристик инструмента на практике в реальном производстве не используются в связи с отсутствием адекватных универсальных математических зависимостей процесса шлифования. Кроме того, шлифование является процессом обработки, выходные параметры и результаты которого испытывают значительные изменения в течение периода стойкости (время работы инструмента между двумя правками, силы шлифования, шероховатость шлифованной поверхности, точность полученных поверхностей и другие. Причинами этого являются износ рабочей поверхности (РП) абразивного инструмента и изменение ее геометрической формы [1–6], затупление и засаливание вершин режущих зерен, что приводит к изменению статистических показателей их распределения в объеме рабочего слоя шлифовального круга, числу и размерам срезаемых стружек. Эти и другие аспекты сегодня должны образом не исследованы и, следовательно, не учитываются при проектировании операций шлифования, определении параметров и результатов обработки заготовок, хотя во многом определяют показатели взаимодействия инструмента с заготовкой, динамику их изменений. Поэтому, исследование статистико-вероятност-

ных параметров микрорезания активными зернами, расположенными на рабочей поверхности шлифовального круга с учетом его характеристик и текущих состояний инструмента, разработка, на основе полученных результатов, расчетных методик для проектирования инструмента с оптимальными свойствами и режимов его применения является актуальной задачей.

1. Область, цель и задачи исследований

Определение параметров срезаемых стружек при шлифовании, количество срезов является основой для получения необходимых данных, позволяющих рассчитать показатели процесса обработки. Например, площадь и форма поперечного сечения срезаемых стружек во многом определяет силы, действующие на активные абразивные зерна со стороны шлифуемого материала [7–9]. Интегральные показатели процесса зависят от суммарного воздействия универсума вершин режущих абразивных зерен, одновременно находящихся в зоне контакта (ЗК) инструмента с заготовкой. Решение подобной задачи усложняется необходимостью рассмотрения и учета геометрических параметров ЗК шлифовального круга (ШК) с заготовкой [2, 5, 10], которые подвержены изменению. Кроме того, зерна, одновременно осуществляющие резание, находятся в различных стадиях внедрения в материал заготовки (начало резания, постепенное увеличение глубины резания и выход из контакта с заготовкой). Поэтому, активные зерна осуществляют резание с различными длинами и глубинами, что предопределяется степенью их перекрытия другими зернами, высотой расположения в объеме рабочего слоя, формой и размерами ЗК инструмента с заготовкой [6, 11]. Изменение формы РП инструмента, текущие ее состояния так же является значимым фактором, влияющим на показатели микрорезания вершинами абразивных зерен материала заготовки.

С учетом вышеизложенного, были сформулированы цель и задачи исследований.

Цель исследований: разработка методики для определения показателей микрорезания в ЗК инструмента с заготовкой.

Задачи исследований:

- проведение эксперимента с использованием разработанной компьютерной модели процесса шлифования для изучения параметров микровзаимодействия шлифовального круга с заготовкой;

- вывод зависимостей для расчета средних базовых показателей процесса шлифования;

- определение статистически распределения дискретных и интегральных параметров микрорезания в зоне контакта рабочей поверхности инструмента с заготовкой.

2. Методика проведения исследований

В ходе исследований было проведено изучение параметров микрорезания при взаимодействии ШК прямого профиля с заготовкой, работающего по схеме плоского многоходового шлифования с дискретной поперечной подачей с использованием разработанных средств и методик компьютерного моделирования. В частности, были использованы разработанные статистико-вероятностные модели рабочей поверхности инструмента и его кинематического взаимодействия с заготовкой [6]. Данные модели были созданы с использованием САПР «Т-Flex CAD 12» и позволяли задавать форму

вершин активных зерен, определять размеры сечений срезаемых стружек с учетом параметров элементов режима шлифования и характеристик инструмента.

Однако, в исследованиях ПШ необходимо учитывать и изменение формы РП, определять и задавать при моделировании текущие ее состояния, сформированные в процессе изнашивания, которые отличаются от начальных, полученных при правке правящим инструментом. Этот аспект изучался ранее в ходе проведения лабораторного физического эксперимента, в соответствии с разработанной методикой [5]. В частности, в ходе исследований были выявлено изменение формы профиля шлифовального круга при износе и влияние данного фактора на параметры ЗК инструмента с заготовкой (рис. 1, 2, 3).

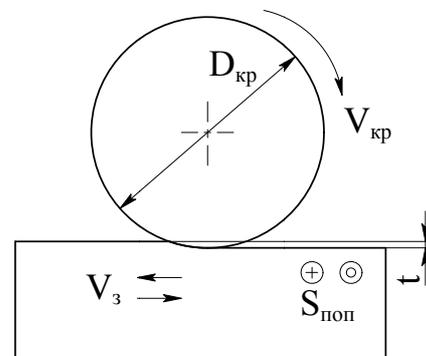


Рис. 1. Схема многоходового плоского шлифования кругом прямого профиля с осевой подачей: $D_{кр}$ – диаметр ШК, $V_{кр}$ – скорость вращения ШК, V_z – продольная подача заготовки, $S_{поп}$ – поперечная (осевая) подача, t – технологическая (назначенная) глубина шлифования

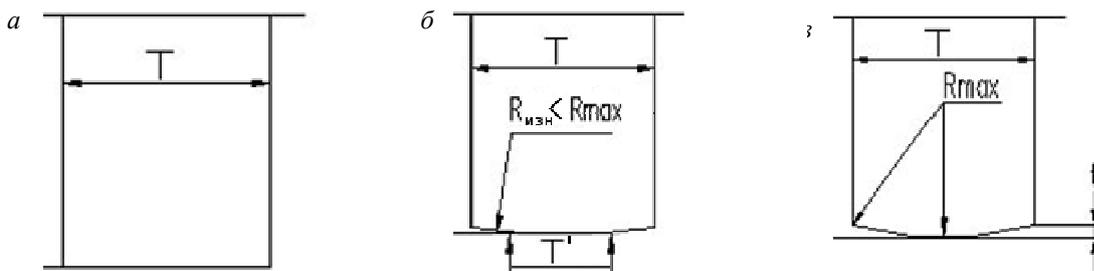


Рис. 2. Модель профиля изношенной РП (осевое сечение) шлифовального круга прямого профиля высотой T (длина прямолинейного участка профиля РП T' зависит от величины $R_{изн}$)

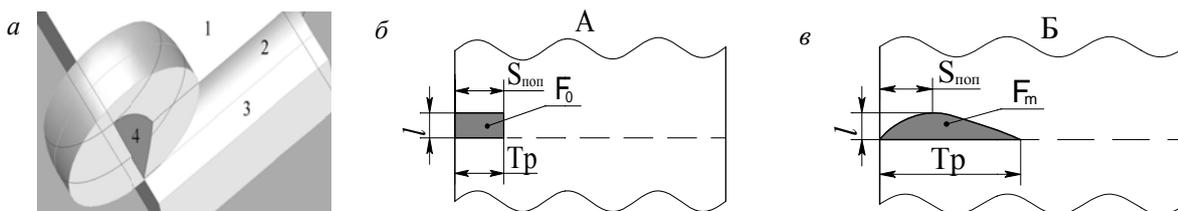


Рис. 3. Форма зоны контакта инструмента с заготовкой без износа (б) и с износом (в) РП ШК:

a – 3D-схема взаимодействия ШК с заготовкой (1 – шлифуемая поверхность, 2 – поверхность резания, 3 – шлифованная поверхность, 4 – поверхность ЗК ШК с заготовкой); b – вид А ЗК без износа РП и с износом РП ($в$, вид Б, виды изображены со стороны оси вращения ШК); F_0 – площадь контакта ШК и заготовки при $R_{изн} = 0$, F_m – текущая площадь ЗК, при имеющей износ профиле РП ШК ($R_{изн} = R_{max}$), l – длина ЗК (длина пути резания материала вершинами зерен), T_p – ширина ЗК

Вышеприведенные результаты исследований были использованы в дальнейшем для проведения компьютерного моделирования процесса шлифования [9, 11], расчетов и вывода математических зависимостей.

Компьютерное моделирование осуществлялось в следующем порядке. На первом этапе задавались исходные показатели элементов факторного пространства процесса плоского шлифования кругом прямого профиля (в качестве примера): диаметр – 300 мм, высота – 5 мм, средний размер абразивных зерен – 0,4 мм, номер структуры инструмента – 6. Постоянные режимы шлифования имели значения: глубина шлифования (технологическая) – 0,02 мм, поперечная подача – 2 мм/ход.

Осевое сечение профиля рабочей поверхности инструмента в начальный период работы описывалось прямой (износ отсутствует, $R_{изн} = 0$), а при наличии геометрического износа РП инструмента – дугой, имеющей (текущий) радиус

кривизны $R_{изн}$, который рассчитывался по известным значениям t и T (из геометрической схемы на рис. 2).

Степень износа профиля РП ШК определяли площадь и форму контакта инструмента с заготовкой в процессе шлифования в начале работы круга (F_0) и в дальнейшем, при изношенной рабочей поверхности ($F_{изн}$). Текущая площадь ЗК при наличии износа рабочей поверхности рассчитывалась по формуле [5]:

$$F_{изн} = F_0 \times \left(1 + \frac{0,12 \times T}{S_{нон}} \right).$$

В ходе моделирования, параметры микро-взаимодействия абразивных зерен в ЗК (форма, размеры поперечных сечений срезаемых стружек, плотность расположения и число активных зерен) определялись путем анализа полученных изображений (рис. 4) с использованием разработанной компьютерной программы кинематического моделирования процесса шлифования [6, 11].

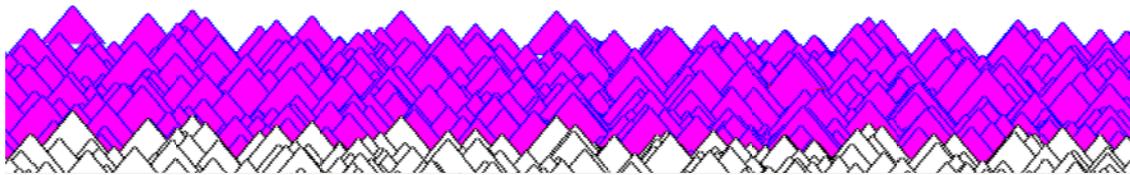


Рис. 4. Универсум изображений смоделированных поперечных сечений стружек, срезаемых вершинами активных зерен (глубина шлифования $t = 0,01$ мм, круговая подача заготовки $V_3 = 0,5$ м/с, скорость шлифования $V_{кр} = 35$ м/с, диаметр заготовки $d_3 = 0,6$ м, диаметр круга $D_{кр} = 0,9$ м; форма вершин зерен – конус с углом при вершине 160° (масштаб изображения по осям абсцисса / ордината – 3:1)

Определенные параметры микро-взаимодействия абразивных зерен с поверхностью заготовки (площади сечений срезаемых стружек) использовались в дальнейшем при определении силовых показателей процесса обработки по методике Е. П. Калинина [9]. Для определения режима работы инструмента, в расчетах использовали комплексный параметр γ , характеризующий удельную производительность (объем срезаемого материала единицей площади рабочей поверхности инструмента) [11]:

$$\gamma = \arctg(2 \times V_3 / V_{кр} \times (D_{кр} \times t)^{0,5}),$$

где t – технологическая (заданная вертикальная подача) глубина шлифования.

Параметр γ , как видно из представленной выше зависимости, учитывает элементы режим шлифования, геометрию РП инструмента. Для вычисления средних значений параметра γ_{cp} в ЗК инструмента с заготовкой, учитывающих износ его РП, использовались средние значения глубины шлифования t_{cp} определенные по формуле:

$$t_{cp} = 0,667 \cdot t \cdot \frac{F_0}{F_m}.$$

Анализ результатов исследования

Обработка полученных экспериментом результатов заключалась в проведении регрессионного и статистического анализа с целью оценки влияния изменения исследуемых факторов на показатели взаимодействия инструмента с заготовкой. Для статистического анализа полученных в результате компьютерного моделирования процесса шлифования данных использовался программный пакет STATISTICA 10 (моделирование и обработку полученных результатов осуществлял аспирант кафедры автоматизации производственных процессов И. П. Камкин). При проведении анализа, в качестве обобщенного фактора рассмотренных элементов процесса шлифования использовался комплексный коэффициент γ_{cp} . Ниже, в качестве примера, приведены полученные математические зависимости изученных параметров и графики их изменения (рис. 5).

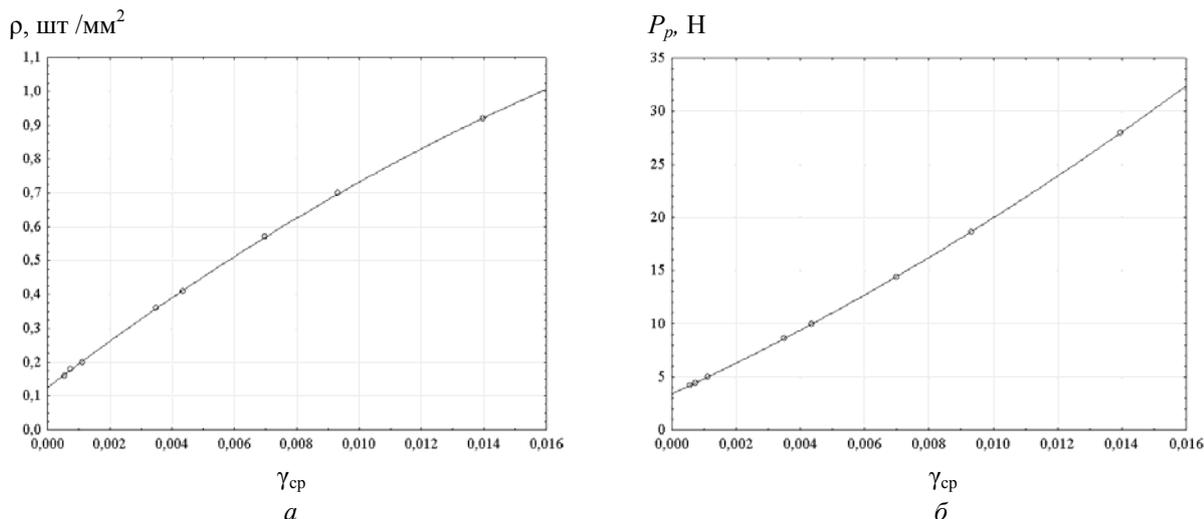


Рис. 5. Графики зависимостей средней плотности ρ вершин активных зерен в ЗК (а) и средних сил резания зернами P_p (б) от изменения параметра $\gamma_{ср}$

Аппроксимация проводилась с использованием полинома второго порядка. Были получены следующие зависимости исследуемых параметров от комплексного коэффициента $\gamma_{ср}$:

$$\rho = 0,125 + 70 \cdot \gamma + 936 \cdot \gamma^2$$

$$P_p = 3,38 + 1398 \cdot \gamma + 25987 \cdot \gamma^2$$

Ниже приведены результаты компьютерного моделирования статистики процесса микрорезания для конкретной экспериментальной точки. Параметры модели: диаметр круга

$D_{кр}=300$ мм; $T=20$ мм, технологическая глубина шлифования $t=0,01$ мм; скорость резания $V_p=40$ м/с; продольная подача $S_{np}=10$ м/мин, $S_{non}=3$ мм/ход, зернистость – F36, структура – 6. На рис. 6 изображены результаты моделирования - гистограммы вероятности распределения сечений стружек срезаемых вершинами активных абразивных зерен на имеющемся интервале изменения площадей (а) и соответствующая ей гистограмма распределения сил резания, действующая на единичные зерна (б).

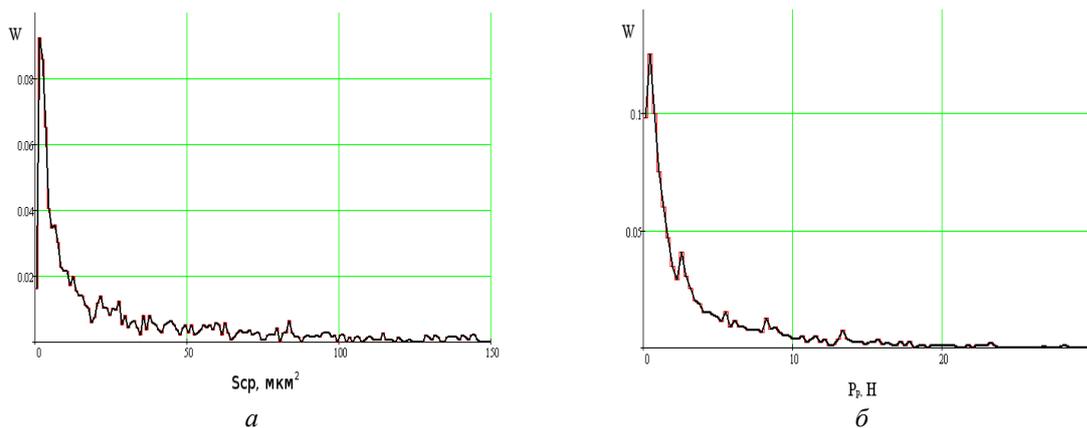


Рис. 6. Гистограммы распределения вероятности площадей сечений стружек $S_{ср}$ на всем интервале изменения площадей (а) и соответствующая ей гистограмма распределения вероятности силы резания P_p (б)

Выводы

В результате использования, при проведении исследования параметров микрорезания, комплекса имитационных компьютерных и ма-

тематических моделей инструмента и процесса абразивной обработки была достигнута основная цель – решено «основное уравнение шлифования», которое впервые сформулировал еще

в начале 20-го века известный американский ученый *Alden G. I.*: были определены площади и характер статистического распределения поперечных сечений стружек, срезаемых вершинами абразивных зерен, в привязке к характеристикам абразивного инструмента, геометрической модели зоны контакта рабочей поверхности инструмента с заготовкой. Для этого впервые предложено использование для конкретных условий осуществления процесса обработки скорректированных значений комплексного параметра $\gamma_{ср}$, характеризующего удельную производительность шлифования – объем срезаемого материала единицей площади рабочей поверхности инструмента [11], с учетом изменения геометрии формы изношенной в процессе работы РП инструмента и зоны контакта инструмента с заготовкой.

Таким образом, в результате исследований с применением изложенной в статье методики и полученных математических моделей, были определены дискретные и интегральные показатели процесса микрорезания при абразивной обработке, необходимые, например, для расчета оптимальной прочности закрепления абразивных зерен на РП ШК, режима изнашивания инструмента в процессе его работы и силовых показателей процесса шлифования.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

– спланирован и проведен компьютерный эксперимент по определению показателей микрорезания с применением статистико-вероятностной модели взаимодействия шлифовального круга с заготовкой;

– получены данные о параметрах микрорезания, с учетом неоднородности условий работы активных режущих кромок в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой;

– определены дискретные и интегральные параметры микрорезания активными абразивными зёрнами материала заготовки, зависимость изменения параметров от элементов режима обработки в конкретных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шульц, В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента / В. В. Шульц. – Л. : Машиностроение, 1990. – 208 с.
2. Салов, П. М. Повышение эффективности заточки, круглого и плоского шлифования с продольной подачей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Салов П. М. – Самара, 1998. – 32 с.
3. Переладов, А. Б. Изучение геометрических параметров поверхности контакта шлифовального круга с заготовкой для схем круглого и плоского шлифования с использованием твердотельного моделирования / А. Б. Переладов, И. В. Кожевников // Вестник Курганского университета. – Серия «Технические науки». – 2005. – Вып. 2. – С. 79–81.
4. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.
5. Переладов, А. Б. Экспериментальное изучение износа рабочей поверхности шлифовального круга / А. Б. Переладов, И. П. Камкин, А. В. Анохин // Известия высших учебных заведений «Машиностроение», № 11. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2013. – С. 70-74.
6. Переладов, А. Б. Моделирование процесса шлифования с использованием программного комплекса T-Flex / А. Б. Переладов, И. П. Камкин / Зауральский научный вестник. – Научно-инновационный журнал. – Вып. 1(3). – Курган : Изд-во Курганского областного союза ученых, 2013. – С. 30–33.
7. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, Ch. Guo. – New York: Industrial Press Inc., 2008. – 372 p.
8. Li, X. Modeling and simulation of grinding processes based on a virtual wheel model and microscopic interaction analysis: A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Manufacturing Engineering/ X. Li. – Worcester, 2010. – 145 p. URL: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-051710-102251/unrestricted/li.pdf>
9. Калинин, Е. П. Теория и практика управления производительностью абразивной обработки с учетом затупления инструмента : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Калинин Е. П. – Рыбинск. – 2006. – 34 с.
10. Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – К. : Наукова думка, 1978. – 208 с.
11. Переладов, А. Б. Повышение эффективности операций шлифования путем направленного регулирования параметров рабочего слоя абразивного инструмента : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Переладов А. Б. – Курган, 1998. – 150 с.

УДК 621.922

*А. Б. Переладов***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН
НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА****Курганский государственный университет**

E-mail: pe_lov@mail.ru

В статье описаны результаты исследований, проведенных с целью совершенствования модельных представлений о структуре абразивного инструмента на керамической связке и создания на их основе адекватных математических моделей для расчета его статических характеристик. С использованием геометрических, физических и компьютерных моделей было проведено изучение параметров закрепления абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента. В ходе исследований были определены координационное число абразивных зерен, образующих дисперсную систему абразивного инструмента (число контактов с соседними зернами), объем, форма и размеры мостиков связки, скрепляющих зерна). В результате моделирования получены сведения о среднем координационном числе зерен в дисперсной системе и по каждому зерну, размеры сечений единичных мостиков связки в зависимости от соотношений объемов зернистостей (для бифракционного состава шлифматериала в инструменте), размеров зерен и единичного объема мостика связки. Получены расчетные формулы для определения площади поперечных сечений мостиков, скрепляющих зерна, и средних значений прочности удержания зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента. Результаты исследований используются для проектирования структуры абразивного инструмента (расчета весовых и объемных компонентов формируемых заготовок), в том числе, со сложным зерновым составом составляющих его шлифматериалов, дисперсных технологических и структурных наполнителей.

Ключевые слова: абразивный инструмент, структура, компьютерное моделирование, мостик связки, дисперсная система, координационное число, зерно.

*A. B. Pereladov***STUDY OF DURABILITY OF ATTACHING THE ABRASIVE
GRAINS ON THE WORKING SURFACE OF THE TOOL****Kurgan state University**

The article describes the results of studies carried out to improve the model concepts of the structure of abrasive tools on ceramic bond and the creation, on their basis, adequate mathematical models for the calculation of its static characteristics. Using geometric, physical and computer models, the parameters of fixing abrasive grains on the working surface of the tool were studied. During researches was determined by the coordination number of the abrasive grains forming a disperse system of abrasive tools (the number of contacts with neighbouring grains), the volume, shape and dimensions of joints ligaments holding the grain). During the simulation, information about the average coordination number of grains in the dispersed system and for each grain, the size of the cross sections of single joints ligaments depending on the ratio of the volume of grit (bifractional composition of slipmaterial in the tool), grain size and unit volume of the bridge chords. Calculation formulas for determining the area of cross sections of bridges of bonding grain and average grain holding strength on the working surface of the abrasive tool are obtained. The research results are used to design the structure of the abrasive tool (calculation of weight and volume components of the formed blanks), including complex grain composition of its constituent grinding materials, dispersed technological and structural fillers.

Keywords: abrasive tool, structure, computer modeling, bridge of ligament, disperse system, coordination number, grain.

Введение

Совершенствование методик проектирования операций шлифования, создаваемых на основе использования достоверных математических моделей, позволяющих прогнозировать показатели процесса обработки и полученные качественные результаты, сегодня по-прежнему является актуальной научно-практической задачей. Одним из наиболее значимых элементов системы процесса шлифования является абразивный инструмент. Правильный и обоснован-

ный выбор (расчет) статических характеристик инструмента (зернистость шлифматериала, твердость, пористость и другие) во многом определяет возможность достижения требуемой производительности и показателей качества процесса обработки. Качественное проектирование инструмента с использованием численных расчетов, возможно только на основе адекватных модельных представлений о строении и параметрах структуры абразивного инструмента.

1. Изучение структурных характеристик абразивного инструмента

Одной из важнейших характеристик абразивного инструмента, изготовленных на керамических и органических связках, является прочность удержания абразивных зерен на его рабочей поверхности. Данный показатель во многом определяет допустимую производительность процесса обработки, режим работы инструмента (осыпание, самозатачивание, затупление) и связанные с ними выходные показатели: температуру шлифования, качество обработки, расход, стойкость и другие. Все абразивные зерна, находящиеся в объеме инструмента и на его рабочей поверхности, скреплены между собой определенным числом мостиков связки, которые имеют конкретные объем, форму и размеры. Эти характеристики, наряду с прочностью материала связки, являются основой расчета прочности закрепления зерен на рабочей поверхности инструмента. Чтобы создать наиболее адекватную модель закрепления зерен, необходимо учитывать вероятностную природу расположения в объеме абразивного пространства и на поверхности инструмента. Как и любая дисперсная система, абразивное пространство может быть охарактеризовано координационным числом (K_c) – средним числом контактов зерен с соседними зернами и у единичных зерен (K_c^I), которое зависит от объемного содержания материала зерен в объеме системы [1–4], ее плотности, а также процессов образования мостиков в контактах зерен, происходящих при смешивании, формовании и спекании инструмента.

Изготовление абразивного инструмента на керамических связках осуществляется в несколько этапов. Смешивание стандартной формовочной массы осуществляется последовательно: в абразивное зерно добавляется жидкое стекло (силикат), связка, декстрин, увлажнитель [5]. В результате смешивания и просеивания образуются гранулы из абразивных зерен, на поверхности которых достаточно равномерно распределены вышеуказанные компоненты.

При формовании заготовки инструмента происходит сближение зерен до появления между ними устойчивых контактов с образованием структурного каркаса инструмента (рис. 1). В процессе сушки окончательно формируется гетерогенная структура, компоненты которой имеют выраженные поверхности раздела. Из заготовки удаляется влага, зерна фиксируются

относительно друг друга, образуя достаточно прочную заготовку. При спекании, по мере повышения температуры, происходит дальнейшее испарение атмосферной влаги, частичное выгорание керамической связки (около 5 % по объему) [5], полное выгорание органических и других легко сгораемых компонентов. Далее происходит расплавление компонентов связки, которые обволакивают поверхность зерна, уменьшая диаметры гранул, и, затем, по мере повышения текучести, компоненты смешиваются и перетекают в места контакта зерен с образованием мостиков связки [2]. Форма и размеры мостиков определяются физическими явлениями на границе расплавленной связки с газовой фазой, связанные с искривлением ее поверхности. Искривление поверхности происходит в результате действия поверхностного натяжения жидкости, которое стремится сократить поверхность раздела и придать ограниченному объему связки форму, по возможности, минимальную поверхность. Такая форма отвечает минимуму поверхностной энергии жидкости и наиболее устойчивому равновесному ее состоянию. В случае небольших объемов и масс жидкой фазы, действие поверхностного натяжения компенсирует силу тяжести, которая, в таких случаях, практически не оказывает влияние на форму образующихся поверхностей [6].

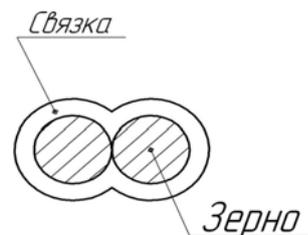


Рис. 1. Контакт между зёрнами, покрытыми связкой, до начала ее плавления

Форма профиля осевого сечения свободной поверхности мостика достаточно точно может быть описана дугой окружности, что согласуется с данными других исследователей [7]. Такое предположение подтверждается проведенным физическим экспериментом с использованием, в качестве модели дисперсной системы абразивного инструмента, смесь гранул не вспененного полистирола. В качестве связки применялось жидкое стекло (водный раствор силиката натрия). Гранулы смешивались с жидким стеклом и прессовались в пресс-форме в заданный объем. После высыхания образцов, образовавшиеся мостики связки фотографировались

с использованием оптической системы инструментального микроскопа. Фотография мостика представлена на рис. 2.

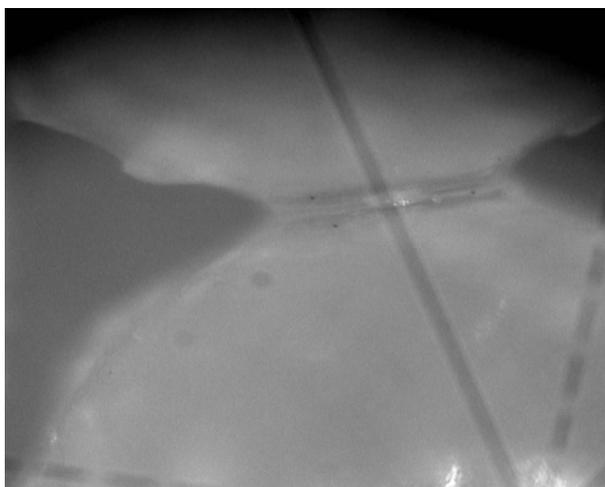


Рис. 2. Фотография мостика связки, скрепляющего гранулы полистирола физической модели дисперсной системы (объем материала гранул в единичном объеме смеси – 0,5; связки – 0,1)

В процессе выдержки заготовки инструмента при максимальной температуре спекания и ее остывании, так же возможно изменение геометрических размеров и формы мостиков связки, вследствие усадки заготовки инструмента под действием стягивающих сил поверхностного натяжения, вследствие чего зерна стараются изменить свое положение. Этому препятствуют связи с другими зернами и, при наличии достаточного числа прямых контактов «зерно-зерно», усадка практически отсутствует и, соответственно, отсутствует дальнейшее изменение размеров и формы образовавшихся мостиков. Таким образом, по завершении обжига, окончательно формируется структура инструмента, относительное расположение и геометрия образующих ее элементов.

Изготавливаемые абразивные инструменты, зачастую, имеют сложный зерновой состав или формируются с использованием неразрушающихся дисперсных структурных и технологических наполнителей. Поэтому на практике существует необходимость расчета многокомпонентных дисперсных систем, состоящих из зерен различных размеров. В пределах одной зернистости, абразивные зерна имеют соотношение размеров, определяемое их рассевом по ГОСТ 3647–80, которое, например, для предельной и мелкой фракций шлифзерна нормального рассева отличается более чем в два раза. Поэтому, при выборе наиболее корректной гео-

метрической модели мостиков, следует учитывать вероятность вариантов образования связей между дисперсными частицами, имеющими различные размеры (рис. 3).

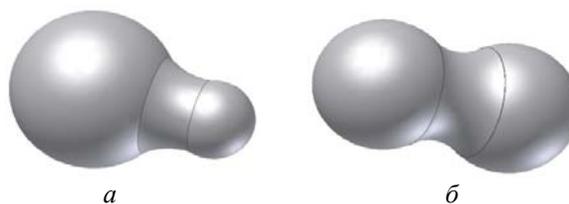


Рис. 3. Разработанные 3D модели мостиков связки для дисперсной системы из зерен, имеющих различный (а) и одинаковый (б) диаметры (форма зерен – шар)

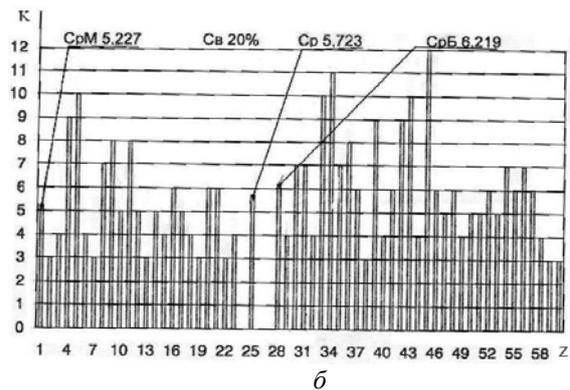
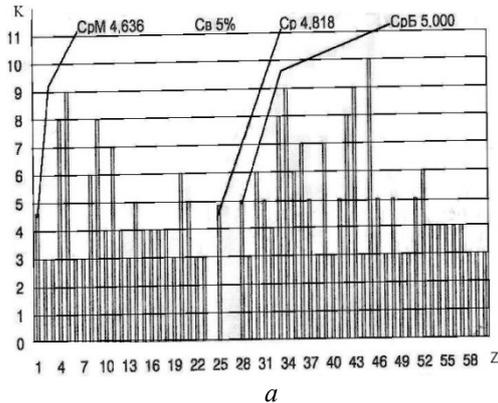
Из содержания работ, посвященных изучению реальных дисперсных систем [1–4, 8], известно, что подобные системы имеют микронеднородную организацию, обусловленную случайным распределением показателей составляющих ее структурных элементов (форма, размер, рассев, зерновой состав, свойства поверхности, другие показатели). Это предопределяет различие значений координационного числа для каждого зерна (K^l_i) и, соответственно, различное число скрепляющих их мостиков связки, что способствует образованию достаточно неоднородной стохастической структуры.

Учитывая вышесказанное, для определения показателя K^l_i , было решено использовать специально разработанную компьютерную программу, моделирующую стохастическую структуру абразивного инструмента [4]. Программа позволяет создавать 3-мерные вероятностные модели структуры дисперсных систем, имеющих непрерывный или разорванный зерновые гранулометрические составы (число зернистостей не ограничено), зерна которых имеют сферическую и/или эллипсоидную формы. Исходными данными для моделирования являются: объем модели инструмента, общий объем частиц (или их количество), объем связки, рассев зерен (ГОСТ 3647–80), коэффициент изометричности зерен, количество зернистостей. Основная цель работы моделирующей программы заключается в наполнении определенного объема структурными элементами (сферы) путем последовательного их размещения. С использованием генератора случайных чисел, задается диаметр очередного зерна и, при необходимости, коэффициент его изометричности. Статистика распределения размеров зерен (кривая рассева) в модели инструмента соответствует зерновому составу выбранной зернистости. Ре-

результатом работы программы является трехмерная модель упаковки зерен и рассчитанные параметры ее структуры: количество зерен (общее и по зернистостям), объем зерен (общий и по зернистостям), координационное число (K_u, K_u^l). Толщина слоя связки на зернах, при определении дополнительных контактов между гранулами, рассчитывалась программой с учетом общей площади поверхности зерен, объемных потерь связки при сушке и выгорании в процессе тер-

мообработки. Объем одного мостика связки определялся как отношение заданного общего объема связки ($V_{св}$) в объеме модели абразивного инструмента к координационному числу K_u .

На рис. 4 и 5 изображены примеры гистограмм распределения K_u^l для идентичных компьютерных моделей дисперсных структур, с заданным бифракционным (разорванным) составом, имеющих различное объемное содержание связки.



Соотношение средних диаметров зерен (сферы) – 1:1,5. Средние значения K_u для зерен соответственно меньшего (М), большего (Б) диаметров и общее их среднее (Ср)

Рис. 4. Примеры гистограмм распределения K_u^l в компьютерной модели дисперсной системы с разорванным зерновым составом и различным объемным содержанием связки: а – содержание связки 5 % по объему: 4,64 / 5,00 / 4,82; б – содержание связки 20 % по объему: 5,22 / 6,22 / 5,72

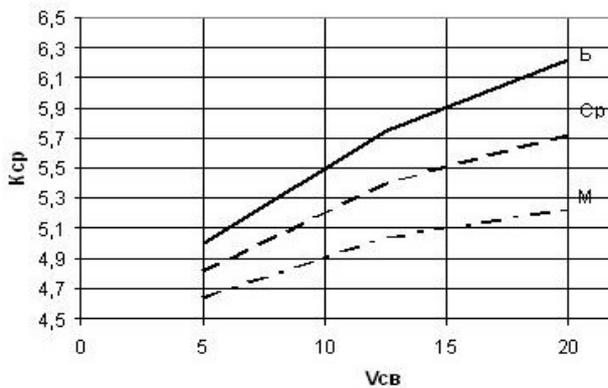


Рис. 5. Гистограмма изменения средних значений координационного числа K_{cp} от $V_{св}$ (объемные %) для модели дисперсной системы с разорванным зерновым составом

Моделирующая программа позволяет определять общее число контактов между частицами в исследуемом объеме дисперсной системы, неоднородность (пределы изменения значений) K_u^l и, соответственно, число мостиков связки и их объемы.

С использованием сведений о диаметрах контактирующих зерен, становится возможным определение минимальных (опасных) сечений (радиусов поперечных сечений) мостиков, в ко-

торых будут формироваться максимальные напряжения при силовых воздействиях на активные абразивные зерна, возникающие в процессе резания. В результате анализа разработанных геометрических моделей (рис. 6) была получена зависимость (1) для определения среднего радиуса мостика связки для шлифматериалов, имеющих нормальный рассев.

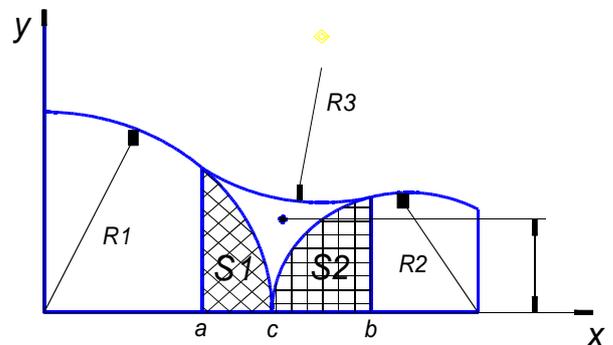


Рис. 6. Расчетная схема для определения наименьшего радиуса поперечного сечения мостика связки

$$R = V_{св}^{0,38} * \left[\frac{(K - \ln(V_{св}))}{\ln(V_{св})} \right], \quad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий соотношение радиусов R_1 и R_2 ($K=23,5-(R_2-R_1)*0,08$).

График зависимости (1) для определения среднего радиуса мостика связи приведен на рис. 7.

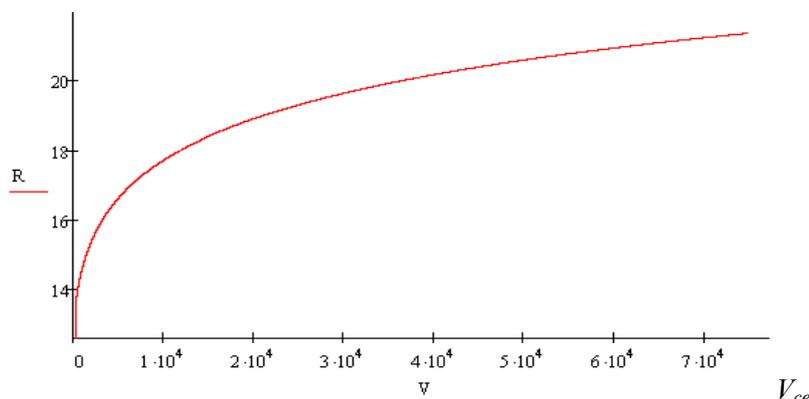


Рис. 7. График зависимости радиуса поперечного сечения мостика R от объемной доли связки в инструменте $V_{св}$

2. Определение прочности удержания абразивных зерен

На основе полученных геометрических данных о размерах сечений мостиков были осуществлены исследования по определению максимальной нагрузки на режущие зерна, находящиеся на рабочей поверхности инструмента, со стороны обрабатываемого материала, допускаемую прочностью их удержания. Максимальные (разрушающие) напряжения в мостиках, приводящие к удалению зерен, определялись с использованием разработанных компьютерных 3D моделей зерен и мостиков связки (рис. 8). Число мостиков изменялось от двух до

шести (половина от значений $K^l_{св}$, но не менее двух) с учетом вероятности возникновения того или иного числа контактов для каждого зерна [4]. Модель зерна нагружалась условной силой резания в предполагаемом направлении ее действия со стороны обрабатываемого материала, по мере возрастания которой, визуализировались линии равных значений предельных напряжений в сечениях мостиков, что соответствовало предельно допустимой силе резания, действующей на зерно. Для упрощения создания расчетной модели форма мостиков связки была принята цилиндрической, а их диаметры определялись индивидуально, по формуле (1).

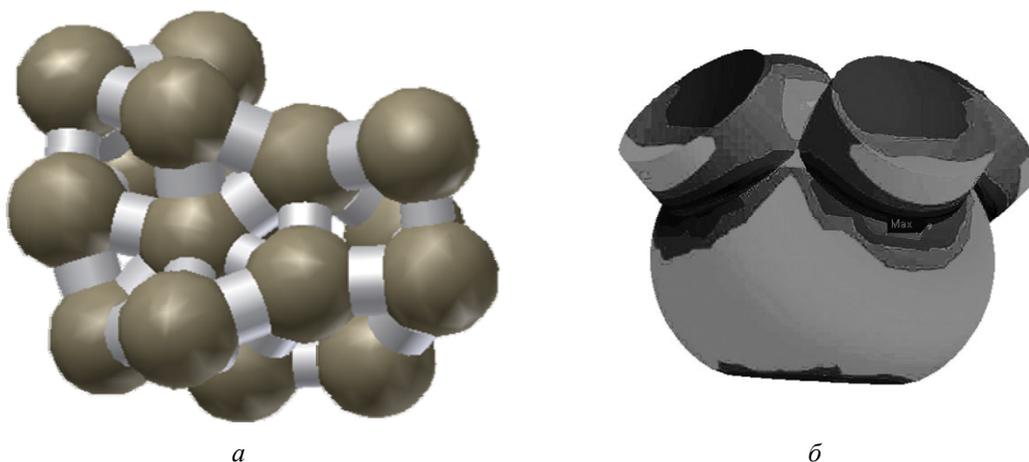


Рис. 8. Примеры изображений разработанных 3D модели структуры абразивного инструмента (а) и нагруженной модели зерна с четырьмя удерживающими ее мостиками связки на поверхности инструмента (б)

С использованием разработанной модели, были определены средние значения P_{y0} для дисперсной системы абразивного инструмента, со средними размерами зерен (d_3) 0,16 / 025 / 0,40 мм., объемным содержанием связки в еди-

ничном объеме инструмента ($K_{св}$) 0,06–0,14, шлифматериала (K_3) 0,38–0,50:

$$P_{y0} = 2,87 \cdot \sigma_p \cdot \left(\frac{\sigma_{сжс}}{\sigma_p} \right)^{0,6} \cdot K_{св}^{0,7} \cdot d_3^{2,0} / K_3^{0,6}, \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – прочность материала связки на сжатие (490 МПа), σ_p – прочность материала связки на растяжение (70 МПа) [5, 9].

Результаты расчета $P_{уд}$ по формуле (2) приведены в таблице.

Расчетные средние значения прочности удержания зерен $P_{уд}$ (н) для абразивного инструмента с различными структурой, зернистостью и объемным содержанием связки

$K_{св}, \%$	$d_3, \text{мм}$	K_3 , доля в единичном объеме инструмента						
		0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50
0,06	0,16	4,12	4,00	3,88	3,78	3,68	3,58	3,50
	0,25	10,06	9,76	9,48	9,22	8,97	8,75	8,54
	0,40	25,76	24,98	24,26	23,59	22,97	22,39	21,85
0,08	0,16	5,04	4,89	4,75	4,62	4,50	4,38	4,27
	0,25	12,31	11,94	11,59	11,27	10,98	10,70	10,44
	0,40	31,51	30,56	29,67	28,86	28,10	27,39	26,73
0,10	0,16	5,89	5,72	5,55	5,40	5,26	5,12	5,00
	0,25	14,39	13,95	13,55	13,18	12,83	12,51	12,21
	0,40	36,84	35,72	34,69	33,74	32,85	32,02	31,25
0,12	0,16	6,70	6,49	6,31	6,13	5,97	5,82	5,68
	0,25	16,35	15,85	15,40	14,97	14,58	14,21	13,87
	0,40	41,85	40,58	39,41	38,33	37,32	36,38	35,50
0,14	0,16	7,46	7,23	7,03	6,83	6,65	6,48	6,33
	0,25	18,21	17,66	17,15	16,68	16,34	15,83	15,45
	0,40	46,62	45,21	43,90	42,70	41,57	40,52	39,54

Выводы

По результатам исследований проведенных с использованием разработанных геометрических и компьютерных моделей элементов дисперсной системы абразивного инструмента можно сделать следующие выводы.

1. Проведенные исследования позволили изучить закономерность изменения числа и геометрических параметров мостиков связки, скрепляющих зерна в структуре абразивного инструмента, что позволило вывести формулу для расчета средней прочности удержания зерен на рабочей поверхности инструмента.

2. Использование результатов исследований позволит повысить качество проектирования и надежность получения требуемых статических характеристик структуры абразивного инструмента и режимов шлифования с обеспечением заданной производительности обработки.

3. Разработанная методика моделирования является универсальной и может быть применена для определения показателей других видов дисперсных систем, например, полимербетонов, керамических фильтров, порохов и других, состоящих из различных диспергированных материалов, имеющих сложный зерновой состав составляющих ее компонентов.

4. Полученные зависимости планируется использовать для совершенствования САПР

абразивного инструмента и шлифовальных операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаталова, И. Г. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов / И. Г. Шаталова. – М.: Наука, 1965. – 163 с.
2. Скороход, В. В. Физико-металлургические основы спекания порошков / В. В. Скороход, С. М. Солонин. – М.: Металлургия, 1984. – 159 с.
3. Попильский, Р. Я. Прессование керамических порошков / Р. Я. Попильский, Ф. В. Кондрашев. – М.: Металлургия, 1968. – 272 с.
4. Переладов, А. Б. Стохастическая модель структуры абразивного инструмента / А. Б. Переладов [и др.] // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолГТУ. – Волгоград, 2013. – Т. 10. – С. 52–56.
5. Любомудров, В. Н. Абразивные инструменты и их изготовление / В. Н. Любомудров [и др.]. – М. – Л.: Машгиз, 1953. – 376 с.
6. Химическая энциклопедия. Справочник. Электронный ресурс. http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_1536.html
7. Носов, Н. В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Носов Н. В. – Самара: 1997. – 452 с.
8. Островский, В. И. Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.
9. Переладов, А. Б. Повышение эффективности операций шлифования путем направленного регулирования параметров рабочего слоя абразивного инструмента: дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Переладов. – Курганский государственный университет. – Курган, 1998. – 150 с.

УДК 621.922.34

*О. И. Пушкарев, В. А. Носенко, С. П. Кузнецов***МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОВОДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ МИКРОРЕЗАНИЯ
МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЯ****Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**

E-mail: nosenko@volpi.ru

Методами микровдавливания и склерометрирования исследованы закономерности упругопластического деформирования алмазными инденторами с различными углами и формами передних граней в диапазоне нагрузок на индентор 0,10 ... 2,00 Н образцов инструментальных, нержавеющей, закаленных сталей, щелочно-галлоидных кристаллов и упругих материалов. Изучены три стадии процессов микрорезания: переход от микровдавливания к началу процесса царапания, переход к царапанию, установившийся процесс царапания. При этом определены фактические опорные площадки инденторов, нормальные напряжения и коэффициенты трения при контактном взаимодействии с испытуемыми материалами. Результаты исследований используются для сертификации качества алмазных порошков в доводочных процессах.

Ключевые слова: моделирование, доводочные процессы, микрорезание, микроиндентирование, микровдавливание, склерометрия, алмазные инденторы, порошки, передние грани, нормальные напряжения, коэффициент трения, сертификация качества.

*V. A. Nosenko, O. I. Pushkarev, S. P. Kuznetsov***MODELING FINISHING PROCESSES MICROTUNE
MATERIALS BY MICROINDENTATION****Volzhsy Polytechnical Institute (Branch) of Volgograd State Technical University**

The regularities of elastoplastic deformation by diamond indenters with different angles and shapes of the front faces in the range of loads on the indenter 0.10 ... 2.00 N of instrumental, stainless, hardened steels, alkali-galloid crystals and elastic materials were investigated by micro-pressing and sclerometry methods. Three stages of microcutting processes were studied: the transition from micro-pressing to the beginning of the scratching process, the transition to scratching, the steady process of scratching. In this case, the actual support areas of indentors, normal stresses and friction coefficients are determined for contact interaction with the test materials. The results of the research are used to certify the quality of diamond powders in the finishing processes.

Keywords: modeling, finishing processes, microcutting, microindentation, microextraction, sclerometry, diamond indentors, powders, front faces, normal stresses, coefficient of friction, certification of quality.

В многочисленных технологиях алмазно-абразивной обработки осуществляется интенсивное изнашивание обрабатываемых поверхностей материалов с обеспечением их качества по структурно-механическим характеристикам. Эти процессы во всем их многообразии являются следствием многократных механико-физико-химических взаимодействий трех участников: режущих частиц естественного или искусственного происхождения (активных), поверхности твердого тела (пассивного) и внешней среды (посредника). Главными участниками, несомненно, являются первые два. При этом, в их взаимодействии ведущая и определяющая роль принадлежит силовому (деформационному и адгезионному) взаимодействию пары: алмазные (абразивные) частицы – поверхность твердого тела [1–3].

Широкий спектр различных сочетаний свойств этих пар, а также геометрических форм и размеров режущих частиц приводит к необходимости моделирования и раздельного изу-

чения элементарных актов силового взаимодействия частицы с поверхностью материалов. При этом, наиболее адекватные модели дают методы микроиндентирования. Это микровдавливание осесимметричного индентора (сфера, конус, пирамида) и склерометрия: царапание индентором испытуемой поверхности.

Указанные методы обеспечивают высокую локальность внешнего деформационно-силового воздействия на испытуемую поверхность и значительную долю шарового тензора напряжений в этом воздействии, что позволяет проводить микромеханические испытания материалов любой степени твердости и хрупкости на малых площадках от 10 мкм.

Эксперименты проводили на специально разработанной установке. Для изучения механизма и основных закономерностей упругопластического деформирования при микрорезании алмазными инденторами исследованы процессы вдавливания, перехода от вдавливания к царапанию (начало царапания) и устано-

вившегося процесса царапания различных материалов инденторами с различными углами и формами передней грани в широком диапазоне нагрузок на индентор. Для этого использованы алмазные пирамиды разных типов: четырехгранные (Кнупа, Виккерса) и трехгранные (Берковича) с разными углами между гранью и осью пирамиды, а также сферические (алмазные и рубиновые) инденторы разных диаметров. Отрицательный передний угол при царапании варьировался при этом от 1° до 45° .

Все испытания проводили на специальном приборе для микромеханических испытаний при весьма малых скоростях микрорезания для исключения влияния температурного фактора на результаты испытаний [4]. Исследованы различные по физико-механическим свойствам материалы: отожженная сталь X18H9T, закаленная сталь У10, щелочно-гаплогидные кристаллы и другие материалы. Изучены основные закономерности механизма упруго-пластического деформирования материала при однократном царапании (вдавливании) алмазными инденторами с разными углами и формами передней грани (рис. 1–4). Силовые зависимости и их связь с геометрическими параметрами царапин (рис. 1) оказались качественно одинаковыми для различных материалов.

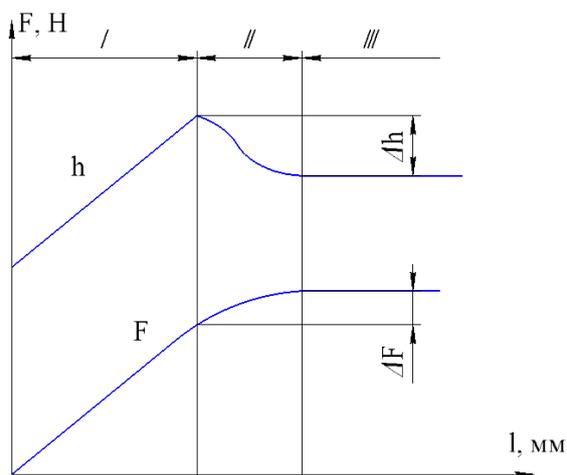


Рис. 1. Три стадии перехода от вдавливания к царапанию: I – переход от вдавливания к началу царапания; II – переходный процесс; III – установившийся процесс царапания

Установлена трехстадийность процесса перехода от вдавливания к царапанию, которая тем ярче выражена (по величинам ΔF , Δh), чем больше передний угол α индентора и выше способность испытуемого материала к относи-

тельному упрочнению. Оценена несущая роль навалов в процессе царапания. Определены условия, вызывающие различный характер образования царапины: пластический без разрушения материала, скалывания и диспергирования.

Установлено, что фактическая опорная площадь контакта значительно отличается от обычно подсчитываемой при склерометрических испытаниях по величине λ . Поэтому для определения напряжения на площадке контакта при микрорезании необходимо определять фактическую площадь контакта по концу царапины.

Это напряжение для данного испытуемого материала постоянно для любых инденторов с разными углами ($6-8^\circ < \alpha < 45^\circ$) и формами передней грани (рис. 2). Деформационное упрочнение материала реализуется в процессе перехода от вдавливания к царапанию (рис. 1), и поэтому в процессе установившегося царапания оно уже не проявляется.

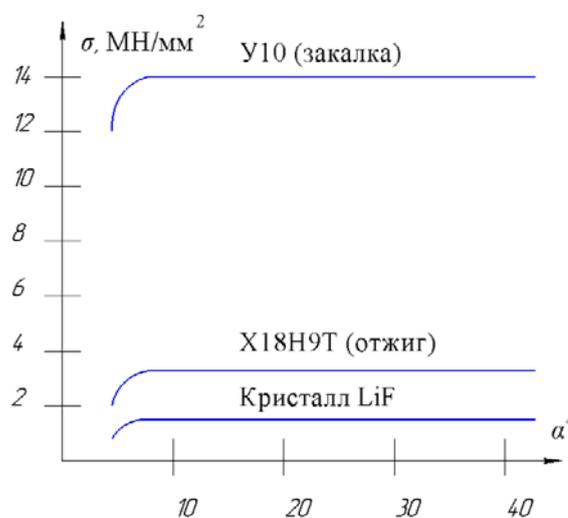


Рис. 2. Напряжение микрорезания инденторами с разными углами и формами передней грани

Это согласуется с общеизвестной точкой зрения Н. Н. Давиденкова на роль деформационного упрочнения материала при микрорезании.

Оценены силовые и энергетические затраты при царапании, связанные с упруго-пластическим деформированием материала и трением. На этой основе усилие микрорезания и работа образования царапины разделены на деформационную и адгезионную составляющие в зависимости от величины переднего угла царапающего индентора (рис. 3).

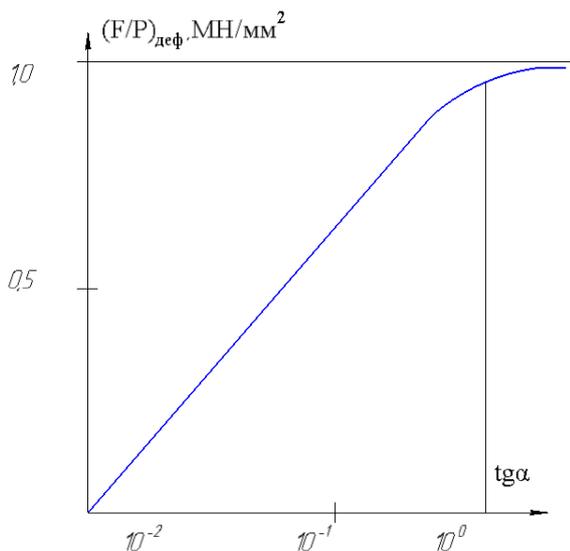


Рис. 3. Деформационная составляющая отношений $(F/P)_{\text{деф}}$ при царапании инденторами с разными углами и формами передней грани

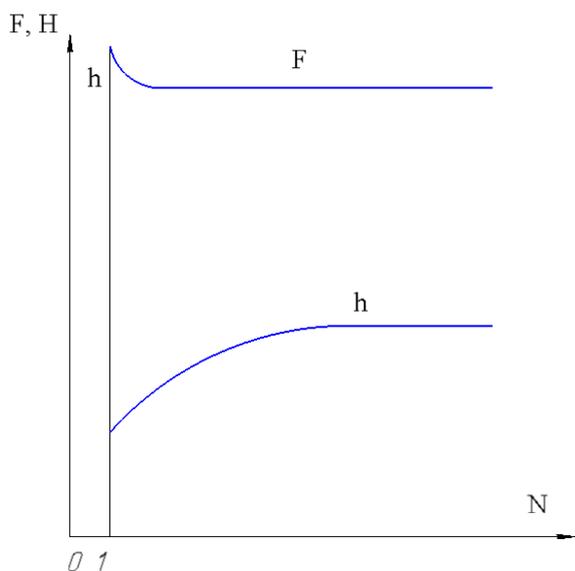


Рис. 4. Тангенсальное усилие микрорезания и глубина царапин в зависимости от числа царапаний по одному следу

Установлены основные закономерности механизма упруго-пластического деформирования и разрушения материала при многократном царапании (вдавливании) по одному следу алмазными инденторами с разными углами и формами

передней грани (рис. 3, 4). Силовые зависимости и их связь с геометрическими параметрами царапины при многократном царапании по одному следу (рис. 4) качественно одинаковы для различных материалов.

Получены и экспериментально проверены формулы для подсчета опорной площади контакта при многократном микрорезании по одному следу инденторами с различными формами передней грани.

Это дало возможность определять напряжение при любом последующем цикле микрорезания. Установлено, что это напряжение резко возрастает уже при первых 5–10 циклах микрорезания и может достигать значительной величины. Например, при многократном царапании стали X18H9T пирамидой Берковича гранью вперед напряжение микрорезания достигает 25 МН/мм^2 .

Деформационная составляющая $(F/P)_{\text{деф}}$ с увеличением числа циклов микрорезания для инденторов с постоянным передним углом (пирамиды Виккерса, Кнупа, Берковича, конус) измеряется незначительно, а с переменным углом (сфера) непрерывно и плавно уменьшается, т. к. с каждым циклом уменьшается передний угол α .

Результаты исследования используются для сертификации качества алмазно-абразивных порошков при подборе рациональных параметров обработки изделий и материалов различного назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Головин, Ю. И. Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – М. : Машиностроение. – 2009. – 312 с.
2. Бурлаченко, О. В. Рациональный подбор параметров алмазной доводки марганец-цинковых ферритов / О. В. Бурлаченко, О. И. Пушкарев, М. Н. Кислева // СТИН. – 2015. – № 4. – С. 38–40.
3. Пушкарев, О. И. Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства материалов / О. И. Пушкарев, О. Г. Кулик, Д. А. Никуко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83. – № 2. – С. 49–52.
4. Бердиков, В. Ф. Микротвердомер с автоматической записью диаграмм вдавливания и царапанием / В. Ф. Бердиков, О. И. Пушкарев, В. А. Назаренко // Заводская лаборатория. – 1980. – № 5. – С. 459–462.

УДК 621.048.21

*К. А. Репин***МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОСИЛОВОЙ ОБРАБОТКИ
МАЛОЖЕСТКИХ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ****Тольяттинский государственный университет**

E-mail: doghard@mail.ru

В современном машиностроении широкое применение нашел метод проката. Около 70 % заготовительного производства приходится на долю этого метода, поэтому актуален вопрос поиска новых, более совершенных методов технологии изготовления и контроля качества данного типа изделий.

Основной проблемой в производстве заготовок методом проката является коробление. Появление коробления обусловлено неравномерным распределением внутренних напряжений в объеме материала изделия. На формирование данного поля внутренних напряжений существенное влияние оказывает технологическая наследственность.

Соответственно разработка технологии снижения и равномерного распределения указанных напряжений, а также управления данными процессами позволит повысить качество данного типа изделий, а значит, и эксплуатационную надежность.

В данной статье рассматриваются особенности методики проведения эксперимента термосилового обработки нежестких деталей. Испытуемым материалом является нержавеющая сталь 12X18H10T, чаще других применяемая при изготовлении длинномерных мало жестких валов, используемых в нефтяной промышленности, судостроении и автомобилестроении. Представлены два технологических метода термосилового обработки длинномерных мало жестких деталей. Показаны зависимости и характер распределения внутренних напряжений при термосилового обработке длинномерных деталей. Приведены факторы, оказывающие влияние на распределение внутренних напряжений при термосилового обработке, а именно: температура, скорость деформации. Также приведен сравнительный анализ зависимости распределения остаточных напряжений от относительного удлинения длинномерных мало жестких деталей, учитывающий характерные изменения распределения остаточных напряжений от параметров температуры и скорости деформации. Выявлен способ термосилового обработки, при котором заготовка получает заданные физико-механические свойства и равнонапряженное состояние материала по сечению к длине детали.

Ключевые слова: термосилового обработка; мало жесткие детали; эксперимент.

*К. А. Репин***THE METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND COMPARATIVE
ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY THERMALLY ACTIVATED STRETCHING
OF LONG NON-RIGID PARTS****Togliatti State University**

In modern engineering the most widely used method of hire. About 70 % of blank production accounts for this method, therefore, the crucial issue is the search for new and more advanced methods of manufacturing technology and quality control of this type of products.

The main problem in the production of billets by the method of hire is warping. The occurrence of war page due to uneven distribution of internal stresses in the bulk material of the product. The formation of this field of internal stresses is significantly affected by technological heredity.

Accordingly, the development of technology to reduce and uniform distribution of these stresses, as well as data management processes will improve the quality of this type of products and hence the operational reliability.

This article discusses the features of the methodology of the experiment thermally activated stretching non-rigid parts. The test material is stainless steel 12X18H10T, the most commonly used in the manufacture of long non-rigid shafts used in the oil industry, shipbuilding and the automotive industry. Presents two technological method thermally activated stretching of long non-rigid details. Shows the dependencies and nature of distribution of internal stresses in thermally activated stretching processing of long parts. The factors influencing the distribution of internal stresses in thermally activated stretching treatment, namely temperature, strain rate. Also a comparative analysis of the dependence of the residual stresses distribution from the elongation of long non-rigid parts, taking into account the characteristic changes of the residual stresses distribution on the parameters of temperature and strain rate. Identified thermally activated stretching method of processing in which the work piece gets the specified physical and mechanical properties and is equal to stress state of the material in the cross section to the length of the part.

Keywords: thermally activated stretching, non-rigid parts, experiment.

Введение

В настоящее время уровень развития машиностроения характеризуется постоянным повы-

шением требований к качеству мало жестких деталей типа валов, одним из основных показателей которого является отсутствие коробления [1, 2, 3].

Коробление происходит в результате релаксации остаточных напряжений в материале детали возникающее еще при прокатке прутка, термической и механической обработке, т. е. вследствие технологической наследственности и несовместности пластических деформаций [4, 5, 6].

Кроме этого значительную роль в формировании поля внутренних напряжений играет структура материала. Например, отрицательное влияние на точность оказывает наличие в структуре сталей остаточного аустенита [7, 8, 9]. Если в процессе обработки образован остаточный аустенит, который с течением времени может постепенно превращаться в мартенсит, он вызывает изменение размеров готовых изделий, т. е. приводит к короблению маложестких деталей. Следовательно, для длинномерных ответственных деталей, подвергаемых термическому воздействию, которыми являются маложесткие валы, также необходимо учитывать влияние фазовых превращений [10, 11, 12].

Остаточные напряжения возникают нелинейно и структурные превращения в различных материалах для деталей типа маложестких валов имеют различный характер, поэтому необходимо проводить дополнительные исследования технологических режимов термосиловой обработки маложестких деталей [13, 14, 15].

Методика проведения исследований

Для сравнительного исследования технологических режимов термосиловой обработки были выбраны два технологических метода, а именно: в первом случае был взят образец (рис. 1, а), а во втором образец (рис. 1, б). Заготовками для изготовления образцов служат заготовки длиной – 140 мм и диаметром – 10 мм. Материал заготовок нержавеющей сталь 12Х18Н10Т. Химический состав приведен в таблице.

Химический состав исследованных сплавов

Сплав	Содержание химических элементов, масс. %								
	Углерод (С)	Кремний (Si)	Медь (Cu)	Марганец (Mn)	Никель (Ni)	Титан (Ti)	Фосфор (P)	Хром (Cr)	Сера (S)
Сталь 12Х18Н10Т	<0.12	<0.8	<0.30	<2.0	9.0–11.0	0.6–0.8	<0.035	17.0–19.0	<0.02

Различие методов обработки правкой состоит в том, что в первом случае правкой растяжением подвергается вся деталь, а во втором деталь делится на 5 равных участков и каждый из них подвергается правке растяжением поочередно [16, 17, 18].

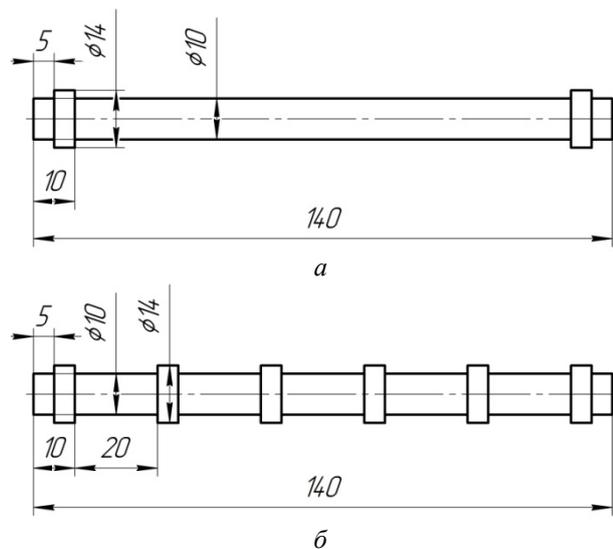


Рис. 1. Образец:

а – с одним участком; б – с разделением на участки

Изначально исследования проводятся в программе DEFORM, которая позволяет смоделировать термосиловую обработку и возникающее при этом распределение остаточных напряжений. Изменяемыми параметрами являются температура (20, 300, 600 °С), скорость деформации (1,3,6 мм/мин) и относительное удлинение (1, 2, 4 %). Затем, после моделирования термосиловой обработки в программе DEFORM, проводятся натурные испытания на одноосное растяжение на электромеханической машине Tinius Olsen.

Для проведения термосиловую обработку на машине Tinius Olsen была спроектирована и изготовлена универсальная технологическая оснастка (рис. 2, а), которая позволяет фиксировать детали по всей длине (рис. 2, б) и отдельно по участкам (рис. 2, в).

При проведении испытаний для каждого из материалов варьируются следующие параметры: скорость деформации 1–6 мм/мин; величина деформации 1–4 %.

Образцы изготавливаются из одной партии прутка. Заготовки образцов, имеющие трещины, расслоения, поверхностные дефекты в виде

инородных включений и механические повреждения к испытаниям не допускаются.

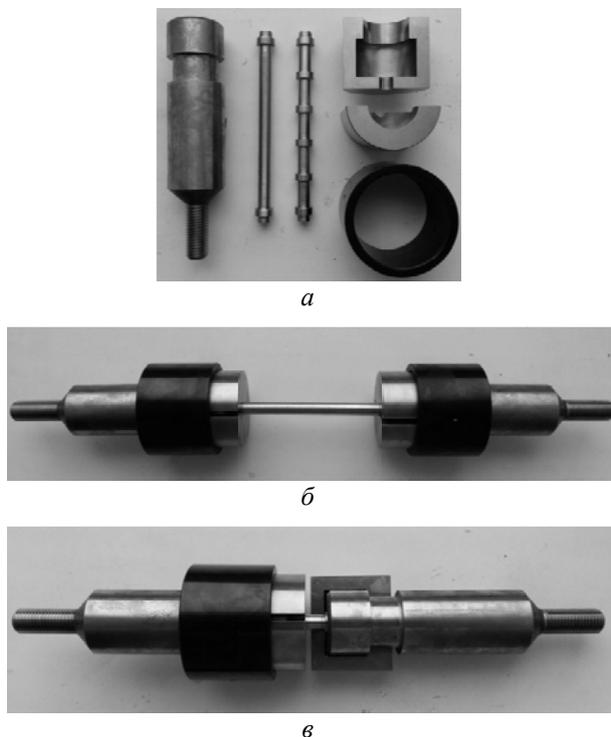


Рис. 2. Технологическая оснастка

Образцы необходимо изготавливать на токарно-винторезном станке. На каждом участке, подвергаемому термосиловой обработке, наносятся риски через каждые 5 мм шириной 0,5 мм на лазерном станке. Маркировка образцов производится с торца термостойкой краской после окончания обработки образца данного типа на токарном станке. Маркировка включает в себя две цифры, например 5/1. Первая цифра означает номер испытания, вторая номер образца данного типа. На немаркированном торце кернером наносятся риски через 90° в сечении и маркируются соответственно 0, 90, 180, 270. При транспортировке, измерении и т. д. необходимо предохранять образцы от ударов и воздействия температуры.

Перед началом испытаний требуется предварительно измерить геометрические параметры образцов, а именно:

- расстояние между соседними рисками в четырех сечениях через каждые 90° штангенциркулем Kraftool 34460-150 ШЦЦ – 1 (точность 0.01 мм);

- диаметр каждого интервала, на которые разделяется образец при помощи рисок, штан-

генциркулем Kraftool 34460-150 ШЦЦ – 1 (точность 0.01 мм).

Результаты исследований

В ходе моделирования процесса термосиловой обработки в программе DEFORM были выявлены зависимости воздействия параметров скорости, температуры и относительного удлинения на возникновение и формирование остаточных напряжений в деталях в сравниваемых технологических методах. Как оказалось, при правке растяжением повышение температуры, вне зависимости от скорости деформации и относительного удлинения, позволяет снизить необходимое усилие для растяжения, т. е. понизить предел прочности, поэтому в эксперименте на электромеханической машине Tinius Olsen целесообразно проводить термосиловую обработку при неизменной температуре 20 °С. Также было выяснено, что наиболее равномерное распределение остаточных напряжений формируется при скорости деформации 1 мм/мин и величине относительной деформации 2 %. При этом, в первом методе, когда растяжение правкой осуществлялось по всей длине детали, распределение остаточных напряжений было неоднородным во всех случаях – на начальном этапе при относительной деформации 1 % остаточные напряжения неоднородно формировались в поверхностном слое и в местах захвата оснастки (рис. 3, а), при увеличении относительной деформации до 4% остаточные напряжения непредсказуемо формировались на одном из участков детали и образовывалась так называемая блуждающая шейка (рис. 3, в). Во втором же случае, при последовательной правке растяжением по участкам, остаточные напряжения формировались предсказуемо и равномерно по всему объему детали, но наилучшее распределение остаточных напряжений оказалось при скорости 1 мм/мин и относительной деформации 2 %, что представлено на рис. 3, б. Стоит отметить, что программа DEFORM позволяет не только провести моделирование процесса упругопластической деформации с заданными параметрами, но также моделирует процесс релаксации после.

Таким образом, имеющиеся аппаратные средства позволяют провести исследования по выявлению оптимальных режимов термосиловой обработки [19, 20].

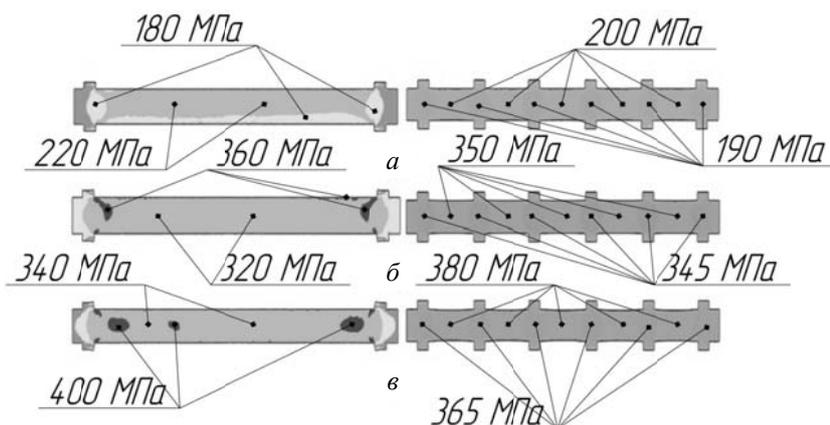


Рис. 3. Сравнение уровня напряжений при относительном удлинении:
а – 1 %; б – 2 %; в – 4 %

В дальнейшем, на основе проведенного моделирования процесса термосиловой обработки на ЭВМ, были проведены испытания на одноосное растяжение на электромеханической машине Tinius Olsen, которые подтвердили результаты моделирования процесса термосиловой обработки в программе DEFORM. В част-

ности, при одинаковых параметрах, а именно, при температуре 20 °С, скорости деформации 1 мм/мин и величине растяжения в 2 %, диаграммы зависимости усилия от относительного удлинения на образцах с одним участком имеют вид (рис. 4), что свидетельствует о неоднородном распределении остаточных напряжений.

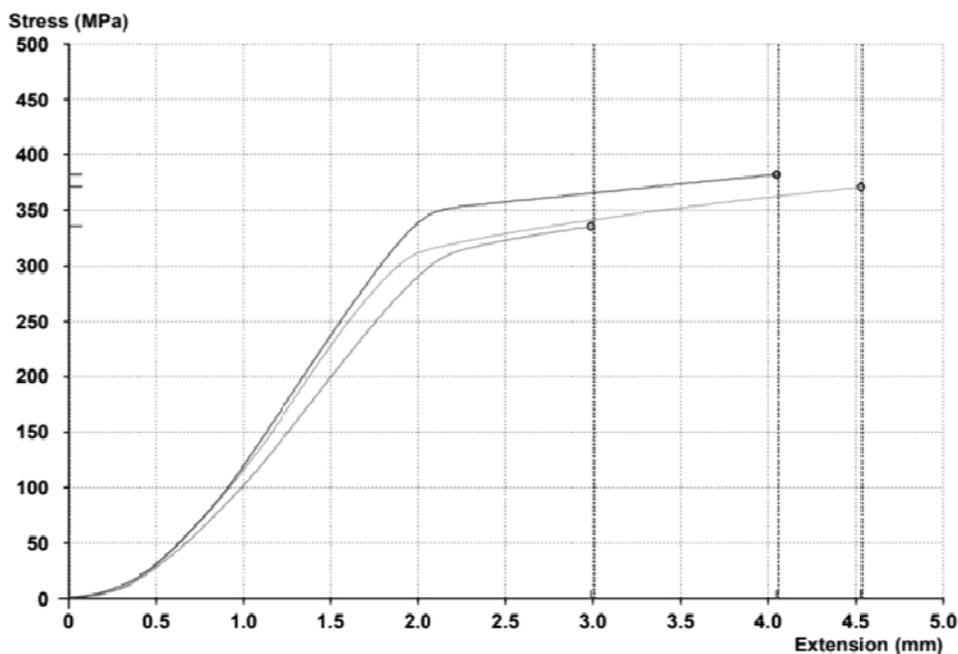


Рис. 4. Кривые растяжения образцов с одним участком

Диagramмы растяжений деталей, разделенных на участки, имеют однородный вид (рис. 5), что позволяет с уверенностью сказать, что предлагаемая технология способствует более равномерному распределению остаточных на-

пряжений, что в свою очередь позволит снизить влияние несовместности пластических деформаций на геометрическую стабильность деталей в процессе их изготовления и дальнейшей эксплуатации.

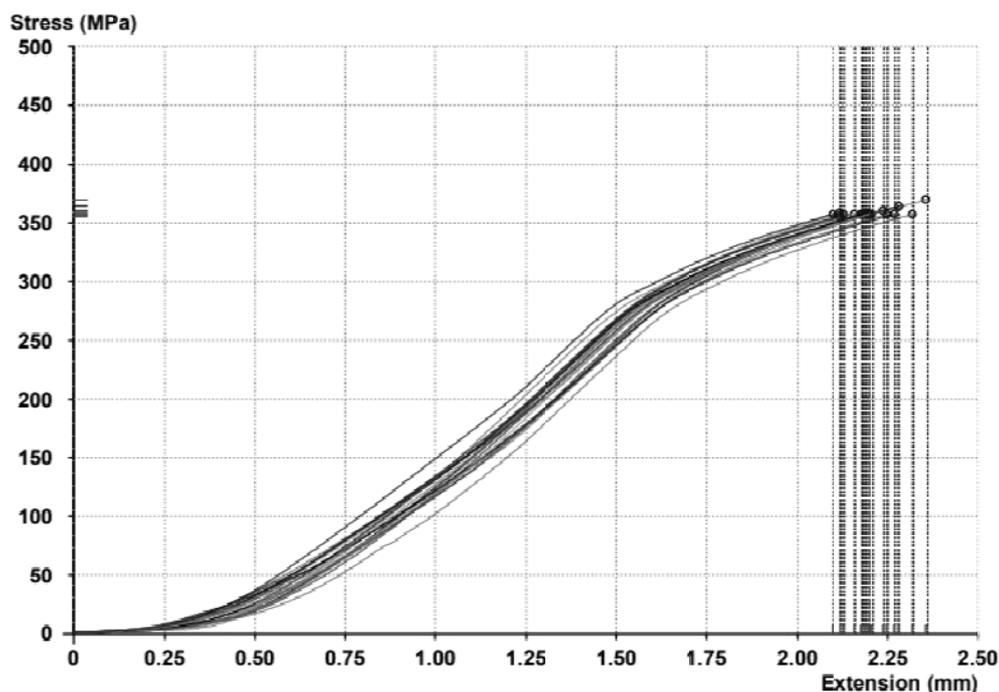


Рис. 5. Кривые растяжения образцов с участками

Основные результаты и выводы

Проведен сравнительный анализ двух технологических методов термосиловой обработки образцов конструкционной стали 12X18H10T с помощью программы DEFORM и электромеханической машины Tinius Olsen. Исследования показали, что метод разделения мало жесткой детали на равные участки с последующей поочередной термосиловой обработкой более предпочтителен с точки зрения распределения внутренних остаточных напряжений, что в свою очередь позволит повысить качество изготовления такого типа деталей и упростить их технологический процесс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Репин, К. А. Методика проведения экспериментальных исследований параметров обработки холодом, влияющей на эксплуатационную точность мало жестких валов / К. А. Репин // Известия ВолГТУ : научный журнал № 5 (184) / ВолГТУ. – Волгоград, 2016. – С. 39–42.
2. Воронов, Д. Ю. Преимущества термосиловой обработки при изготовлении мало жестких деталей типа «вал» над существующими технологиями / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев, К. А. Репин // Вестник НГИЭИ. Нижегородский государственный инженерно-экономический институт (Княгинино), 2015. – № 12 (55). – С. 21–28.
3. Воронов, Д. Ю. Система автоматического управления термосиловой обработкой мало жестких длинномерных валов / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев, К. А. Репин // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 2 (57). – С. 22–29.
4. Драчев, О. И. Патент № 2543029 от 9 сентября 2013 г. Способ стабилизации геометрических параметров маложе-

стных валов / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, К. А. Репин.

5. Воронов, Д. Ю. Патент № 2575510 от 5 марта 2014 г. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев, К. А. Репин.

6. Воронов, Д. Ю. Обзор существующих и перспективные тенденции развития технологий изготовления мало жестких валов / Д. Ю. Воронов, И. В. Шевелев, Н. Ю. Логинов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012». – Вып. 3. – Том 8. – Одесса : КУПРИЕНКО, 2012. – 96 с.

7. Драчев, О. И. Новые технологии термосиловой обработки мало жестких валов / О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, Д. А. Расторгуев // Известия ВолГТУ : междуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолГТУ. – Волгоград, 2004. – С. 32–35.

8. Расторгуев, Д. А. Патент № 2254383 от 19 декабря 2002. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов.

9. Куличкин, Н. В. Влияние поверхностного пластического деформирования на характеристики усталости круглых образцов, подвергнутых термомеханической правке / Н. В. Куличкин, Ю. В. Чеботарев // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 2. – С. 61–63.

10. Левашкин, Д. Г. Методологические аспекты обеспечения точности и жесткости реконфигурируемых производственных систем с применением автоматически сменных узлов / Д. Г. Левашкин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2014. – № 4 (30). – С. 30–36.

11. Rémi Husson, Cyrille Baudouin, Régis Bigot, Edoardo Sura. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. June 2014, Volume 72, Issue 9, pp 1455-1463.

12. Yong-Jin Choi, Sang-Kon Lee, In-Kyu Lee, Yong-Jae Cho, Jae-Wook Lee, Jung-Woo Cho, Myeong-Sik Jeong. Multi-stage forging process design of steering system output shaft for reduction of energy consumption. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. June 2015, Volume 16, Issue 7, pp 1455-1460.

13. A. N. Eraslan, W. Mack. A computational procedure for estimating residual stresses and secondary plastic flow limits in nonlinearly strain hardening rotating shafts. Forschung im Ingenieurwesen. March 2005, Volume 69, Issue 2, pp 65-75.

14. Tolga Akis, Ahmet N. Eraslan. Exact solution of rotating FGM shaft problem in the elastoplastic state of stress. Archive of Applied Mechanics. October 2007, Volume 77, Issue 10, pp 745-765.

15. G. Pantazopoulos, S. Papaefthymiou. Failure and Fracture Analysis of Austenitic Stainless Steel Marine Propeller Shaft. 30 September 2015, Journal of Failure Analysis and Prevention, pp 1-6.

16. A. Gruening, M. Lebsanft, B. Scholtes. Residual Stress State in Tools Used for Thermo-mechanical Metal Forming Processes. Engineering Applications of Residual Stress, Volume

8. Part of the series Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, pp 39-45, 25 May 2011.

17. Wei-jian Yu, Yan Zhang. Analysis on damage and rheological characteristics of deep surrounding rock of shaft engineering. Journal of Coal Science and Engineering (China). March 2010, Volume 16, Issue 1, pp 29-34.

18. Le Qin, HuiMin Xie, RongHua Zhu, Dan Wu, ZhiGang Che, ShiKun Zou. Study of the location of testing area in residual stress measurement by Moiré interferometry combined with hole-drilling method. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, April 2014, Volume 57, Issue 4, pp 708-715.

19. Juan Dong, Jeremy Epp, Alexandre da Silva Rocha, Rafael Menezes Nunes, Hans Werner Zoch. Investigation of the Influence Factors on Distortion in Induction-Hardened Steel Shafts Manufactured from Cold-Drawn Rod. Metallurgical and Materials Transactions A, pp 1-12, 25 November 2015.

20. Thomas Georg Karl Hirsch, Alexandre da Silva Rocha, Rafael Menezes Nunes. Distortion Analysis in the Manufacturing of Cold-Drawn and Induction-Hardened Components. Metallurgical and Materials Transactions A. December 2013, Volume 44, Issue 13, pp 5806-5816.

УДК 621.882.57

В. А. Санинский, В. Г. Малахов, А. В. Божков

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ПИНОЛЕЙ ПУТЕМ СОВМЕЩЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ И ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: saninv@rambler.ru

Представлены схемы совмещенных подшипниковых опор на подшипниках качения и газовых подшипниках. Применение предложенных схем позволит повысить нагрузку на подшипники промежуточной втулки шпиндельного узла пиноли (ШУП) и на их основе повысить эксплуатационные характеристики ШУП и расширить технологические возможности фрезерно-расточных специальных пинольных станков до уровня внутришлифовальных.

Ключевые слова: расчет, трение, газовые подшипники, шарикоподшипники, совмещение, шпиндельный узел, работоспособность, линейный контакт, площадка контакта, лунки.

V. A. Saninsky, V. G. Malakhov, A. V. Bozhkov

INCREASE OF THE WORK OF SPINDLE NUTS OF PINOLS BY THE COMBINATION OF GAS BEARINGS AND SLIDING BEARINGS

Volzhsy Polytechnical Institute (Branch) of Volgograd State Technical University

The schemes of combined bearings on bearings of rolling and gas bearings are presented. The application of the proposed schemes will allow to increase the load on the bearings of the intermediate bushings of the spindle pinole knife (SHUP), and on the basis of them increase the operational characteristics of the SHUP and expand the technological capabilities of the milling-boring special pinole machines to the level of in-grinding.

Keywords: calculation, friction, gas bearings, ball bearings, alignment, spindle unit, operability, line contact, contact area, well.

Актуальность

В настоящее время широко используется пинольные расточные и фрезерные металорежущие станки, компоновки которых могут использоваться как при проектировании головок для контурном фрезеровании методом винтовой интерполяции, глубоких отверстий (ГО)

(рис. 1), так и при внутреннем планетарном шлифовании [1]. Для осуществления планетарного движения режущего инструмента с борштангой, на промежуточной поворотной втулке пиноли, несущей шпиндель расточных [4] или фрезерных [5, 6] станков может применяется как низкоскоростная схема № 2 шпиндельного

узла на роликоподшипниках типа 3281000 [2], так и параллельная схема (рис. 2, а), предусматривающая применение газовых подшипников.

Такая схема позволит повысить нагрузку на подшипники промежуточной втулки заменить подшипники скольжения или шарикоподшипники на роликоподшипники и повысить жесткости и, соответственно, скорость вращения пиноли при использовании ее для внутришлифовального станка [1] (рис. 1). При этом будут учтены основные свойства бессепараторных подшипников – их способность работать при небольших скоростях [2].

Основная часть

Способ механической обработки ГО 1 в трубной заготовке (ТЗ) 2, при котором обработку осуществляют борштангой 3 с режущим инструментом 4 (например, фрезой или шлифовальным кругом) [2], расположенной на эксцентричных подшипниках скольжения 5 в пиноли 6 с режуще-дорнующими зубьями 7, которую базируют перед подачей рабочей среды в исходном положении во входном люнете 8 позволяет создать возможность механической обработки ГО заготовке 2. Перед обработкой заготовку 1 зажимают между внутренними торцами одинаковых по конструкции входного и выходного люнетов 9 соосно с ними и подают давление P краном 10 по каналу 11, выполненному вдоль поверхности отверстия входного люнета

9, создавая давление на пиноли 6, между быстросъемной резьбовой крышкой 12 (на байонерном соединении) и пинолью 6 так, что пиноль 6 играет роль поршня, перемещающегося в ГО заготовки 1. Давление P через дроссель 13 подается на турбины 14 вращения борштанги 3 и на турбину 15, круговой подачи (планетарного движения) борштанги 3. В результате осуществляют прямой рабочий ход борштанги 3 с осевой между крышкой 12 поступательной подачей S_p и вращательное движение V_6 , совмещенной с планетарным вращением (круговой подачей) $V_{кр}$ промежуточной втулки 16. При этом совмещают процессы вихрефрезерования ГО 1 режуще-деформирующего прошивания и дорнования последними зубьями прошивки 17. При этом продольную подачу S_p борштанги осуществляют от начала обработки заготовки 1 до перехода ее в выходной люнет 9, после чего выполняют обратный рабочий ход борштанги до возвращения ее в исходное.

Для возврата пиноли 6 в исходное положение кран 10 перекрывают, а кран 18 открывают и подают давление P в выходной люнет 9, заготовку раскрепляют, контролируют размер ГО и операцию растачивания повторяют. При осуществлении прямого рабочего хода промежуточная втулка 16 поворачивается на бессепараторных подшипниках 19 и 20 вокруг оси пиноли с круговой подачей $V_{кр}$, обеспечивая винтовую интерполяцию режущего инструмента 4.

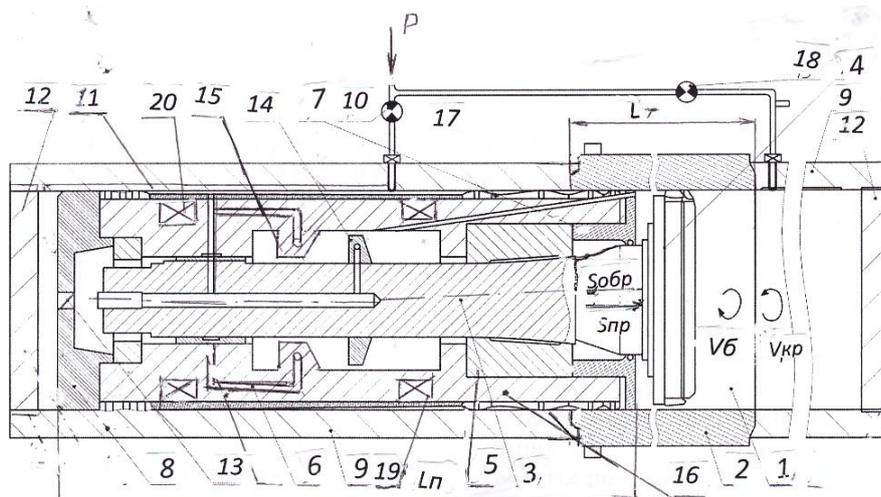


Рис. 1. Малогабаритный станок с режуще-деформирующей пинолью для вихрефрезерования или внутреннего шлифования методом винтовой интерполяции

Способ механической обработки ГО 1 в трубной заготовке (ТЗ) 2, при котором обработку осуществляют борштангой 3 с режущим инструментом 4 (например, фрезой [2, 5–8]), рас-

положенной на эксцентричных подшипниках скольжения 5 в пиноли 6, снабженной прошивкой с режуще-дорнующими зубьями 7, которую базируют перед подачей рабочей среды в ис-

ходном положении во входном люнете 8 позволяет создать возможность механической обработки ГО в заготовке 2. Перед обработкой заготовку 1 зажимают между внутренними торцами одинаковых по конструкции входного и выходного люнетов 9 соосно с ними и подают давление Р краном 10 по каналу 11, выполненному вдоль поверхности отверстия входного люнета 9, создавая давление на пиноли 6, между быстросъемной резьбовой крышкой 12 (на байонерном соединении) и пинолью 6 так, что пиноль 6 играет роль поршня, перемещающегося в ГО заготовки 1. Давление Р через дроссель 13 подается на турбины 14 вращения борштанги 3 и на турбину 15, круговой подачи (планетарного движения) борштанги 3. В результате осуществляют прямой рабочий ход борштанги 3 с осевой между крышкой 12 поступательной подачей S_p и вращательное движение V_6 , совмещенной с планетарным вращением (круговой подачей) $V_{п.в.}$ промежуточной втулки 16. При этом совмещают процессы вихрефрезерования ГО 1 режуще-деформирующего прошивания и дорнования последними зубьями прошивки 17. При этом продольную подачу S_p борштанги осуществляют от начала обработки заготовки 1 до перехода ее в выходной люнет 9, после чего выполняют обратный рабочий ход борштанги до возвращения ее в исходное. Для возврата пиноли 6 в исходное положение кран 10 перекрывают, а кран 18 открывают и подают давление Р в выходной люнет 9, заготовку раскрепляют, контролируют размер ГО и операцию растачивания повторяют. При осуществлении прямого рабочего хода промежуточная втулка 16 поворачивается на бесшарнирных подшипниках 19 и 20 вокруг оси пиноли с круговой подачей $V_{кр}$, обеспечивая винтовую интерполяцию режущего инструмента 4.

При проектировании бесшарнирных подшипников качения возникает задача сравнения долговечности и жесткости поверхностей контакта, например, при использовании в одном станке тихоходных роликоподшипников, имеющих способность работать на низких частотах вращения и выдерживать высокие нагрузки [2].

ШУП на подшипниках качения имеют ряд недостатков, один из которых обусловлен необходимостью одновременно обеспечивать высокие скорости вращения борштанги с режущим при невысоких усилиях резания абразивного инструмента, например, при использовании шлифовального круга и, с другой стороны, обеспечивать низкие скорости вращения промежуточной втулки, обеспечивающей планетарное движение борштанги с режущим инструментом в виде фрезы. Оба инструмента используются в пиноли при осуществлении метода винтовой интерполяции, поэтому ее конструкции ШУП должны обладать возможностью перестраиваться на нужные схемы низкоскоростных и высокоскоростных режимов работы режущего инструмента. Рекомендации справочника [2] и монографий [1, 3] позволяют назначать нужную схему расположения подшипников качения и их типы в зависимости от параметра $d_{пmax}$ шпинделя (борштанги) пиноли для расточки ГО в ТЗ [1] и глубоких прерывистых отверстий в корпусных деталях типа картеров ДВС [2].

Методика

Существует возможность повышения работоспособности высокоскоростных опор путем совмещения газовых подшипников с подшипниками качения [1] (рис. 2), например, путем применения в ШУП с вариантом раздельной или, параллельной совмещенной установки газового подшипника и подшипника качения.

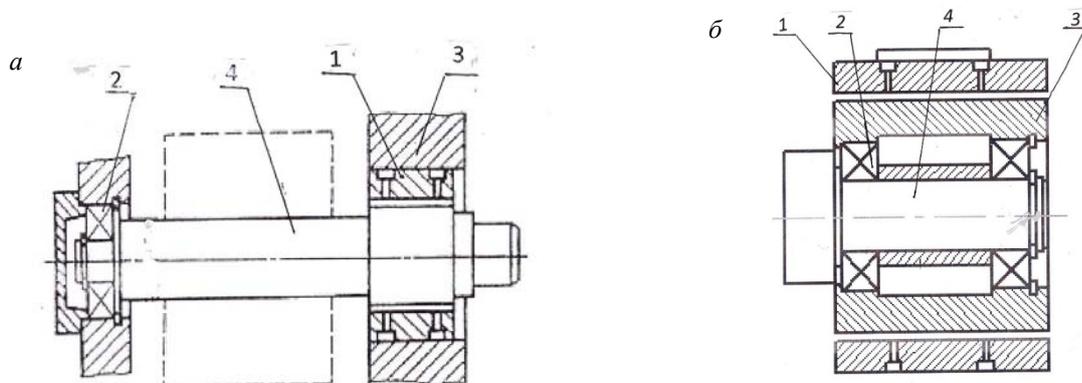


Рис. 2. Схемы совмещенной установки газового подшипника и подшипника качения: 1 – газовый подшипник; 2 – подшипник качения; 3 – корпус, 4 – шпиндель; а – раздельная; б – параллельная

Газовые подшипники изготавливают из материалов с относительно малой твердостью и имеющих возможности работы при высоких температурах. В случае с применением в ШУП раздельной схемы, борштанга задней ступенью устанавливается на радиально-упорном подшипнике, воспринимающем осевую нагрузку и лишь частично радиальную, а газовый подшипник устанавливают на переднем конце борштанги (рис. 2, а). Такая схема может быть разработана для ШУП по схеме, примененной

для газотурбинного двигателя [3] $N=22$ кВт; $n = 86000$ об/мин [3]. Положительные результаты такого применения возможно при правильном учете условий эксплуатации ШУП. Борштанга в этом случае своей более тяжелой передней частью, несущей режущий инструмент и воспринимающей на ней силы резания F и расположенная в зоне высоких температур, опирается на газовый подшипник. Соответствующие такой схеме характеристики ШУП представлены на рис. 3 и 4 [3].

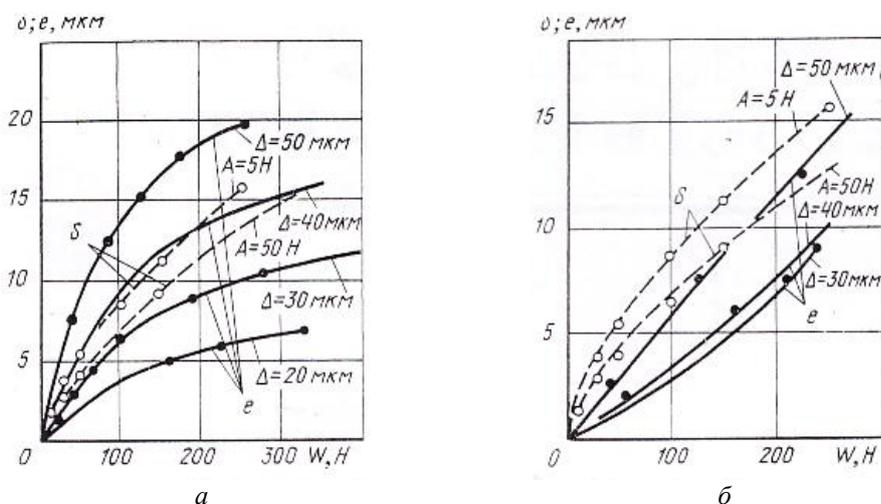


Рис. 3. Упругое смещение δ оси шарикоподшипника при различных нагрузках осевого преднатяга A и эксцентриситета e газодинамического (а) и газостатического (б) подшипника при различных значениях диаметрального зазора Δ в зависимости от радиальной нагрузки $W=F$

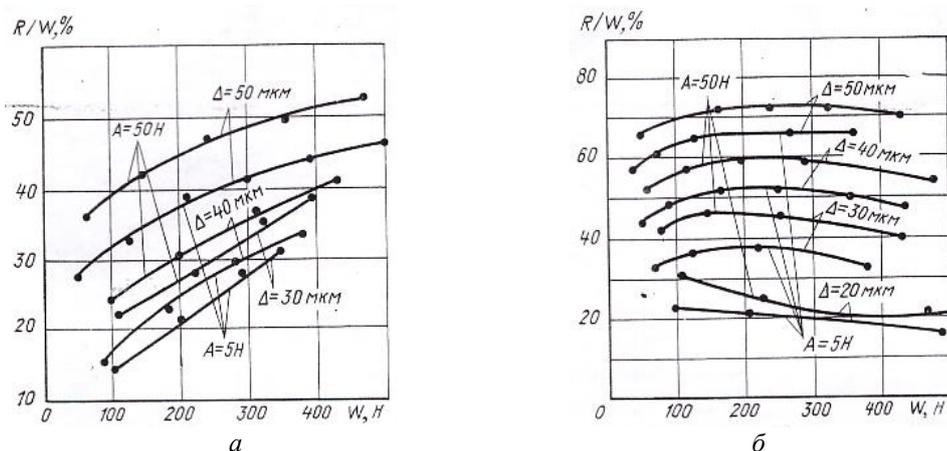


Рис. 4. Доля нагрузки R/W , воспринимаемой шарикоподшипником при параллельной его установке с газодинамическим (а) и газостатическим (б) подшипником, в зависимости от нагрузки W на узел при различных значениях осевого преднатяга A и диаметрального зазора Δ газового подшипника

Выводы

Для развития исследовательских работ [1] имеет важное значение совершенствование методики назначения роликоподшипниковых шпиндельных опор [2], на основе рекоменда-

ций, учитывающих возможность применения дополнительных схем совмещенной установки газового подшипника и подшипника качения. При удачном сочетании положительных свойств газовых подшипников и подшипников качения

можно создать возможности расширения технологических возможностей пинольных станков [4], повышения надежности и быстроходности шпиндельей, что имеет большое значение при использовании ШУП при планетарном внутреннем шлифовании ГО, в том числе в малогабаритных металлорежущих станках [5–8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санинский, В. А. Разработка и применение фрезерно-расточных станков с механизмом планетарного движения режущего инструмента : монография / В. А. Санинский; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2016. – 110 с.
2. Перель, Л. Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор : Справочник / Л. Я. Перель. – М. : Машиностроение, 1983. – 543 с., ил.
3. Пинегин, С. В. Возможности повышения работоспособности высокоскоростных опор путем совмещения газовых подшипников с подшипниками качения / С. В. Пинегин, А. В. Орлов, В. П. Перов / Вестник машиностроения, 1983. – № 3. – С. 11–13.
4. Смольников, Н. Я. Специальные станки для растачивания глубоких прерывистых отверстий шпинделями на выносных опорах : монография / Н. Я. Смольников, В. А. Санинский; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2004. – 176 с.
5. Пат. 2563401 РФ, МПК В23В35/00. Способ механической обработки глубокого отверстия в трубной заготовке / В. А. Санинский, В. В. Ананян, Е. Н. Осадченко, А. В. Санинский, Д. Н. Творогов; ВолгГТУ. – 2015.
6. А. с. 1212707 СССР, МПК В 23 В 41/00. Металло-режущий станок / В. А. Санинский. – 1986.
7. А. с. 1333475 СССР, МПК В 23 В 41/00. Металло-режущий станок / В. А. Санинский. – 1987
8. Пат. 2552616 РФ, МПК В23В41/00, В23Д79/00, В23В1/00, В23С3/00. Способ механической обработки глубокого отверстия в трубной заготовке / В. А. Санинский, В. В. Ананян, Е. Н. Осадченко, А. В. Санинский, Д. С. Михайлов; ВолгГТУ. – 2015.
9. П. м. 143938 РФ, МПК В23В41/02. Устройство для механической обработки глубоких отверстий / В. А. Санинский, В. В. Ананян, Е. Н. Осадченко, А. В. Санинский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014.

УДК 621.82

В. А. Санинский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова, В. Г. Карпов

РАСЧЕТЫ КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ ТОЧЕЧНОМ И ЛИНЕЙНОМ КОНТАКТЕ РОЛИКОВ И ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: saninv@rambler.ru

Представлен расчет контактной жесткости и долговечности при точечном и линейном контакте роликов и дорожек. Анализ расчетных формул доказывает возможность повышения контактной жесткости и долговечности роликовых подшипников качения за счет того, что перед операцией сборки у тел качения и дорожек качения предварительно определяют форму их погрешностей в продольном направлении и подбирают для сборки комплект деталей поверхности их контакта по признаку образования эквидистантных линий контакта после сборки [1–6].

Ключевые слова: расчет контактная жесткость, долговечность, точечный контакт, линейный контакт, ролики, подшипники, дорожки, усталостное разрушение.

V. A. Saninsky, K. V. Khudyakov, E. N. Smirnova, V. G. Karpov

CALCULATIONS OF CONTACT RIGIDITY AND DURABILITY FOR A POINT AND LINE CONTACT OF ROLLERS AND ROADS

Volzhsy Polytechnical Institute (Branch) of Volgograd State Technical University

The calculation of contact stiffness and durability at point and line contact of rollers and droplets is presented. The analysis of the calculated formulas proves the possibility of increasing the contact stiffness and durability of roller bearings due to the fact that before the assembly operation at the bodies of rolling and rolling tracks predetermined form of their errors in the longitudinal direction and selecting for assembly a set of parts of the surface of their contact on the basis of the formation of equidistant their lines contact after assembly [1–6].

Keywords: calculation of contact stiffness, durability, point contact, linear contact, rollers, bearings, thrush, fatigue failure.

Основная часть

При проектировании бесшарнирных подшипников качения [7] возникает задача расчета

долговечности и контактной жесткости. Так, если на шпинделе ведущего круга бесцентрово-шлифовального станка (рис. 1), традиционно

применяют несколько шарикоподшипников, и альтернативой такой конструкции может являться низкоскоростная схема № 2 шпиндельного узла (ШУ) на роликоподшипниках, имеющих параметры и характеристики типа 3281000, но собранные способом [2].

Такая схема позволит заменить несколько шарикоподшипников на роликоподшипники меньшего количества с повышением жесткости и, соответственно, долговечности шпинделей (рис. 1). При этом будут учтены основные свойства бессепараторных подшипников – способность работать на низких частотах вращения и выдерживать высокие нагрузки [7].

В патентах [3, 4, 5] представлены описания однорядных, двухрядных и трехрядных роликоподшипников, соответственно, с вариантами подобранных селективным способом [1] поверхностей контактов «конусообразность» – «обратная конусообразность». В дальнейшем будем такие подшипники, ряды которых расположены по радиусу, а не вдоль оси подшипника, предложено называть многорядными, в отличие от многорядных подшипников, ряды которых расположены только вдоль оси отверстия.

Целью данной работы является попытка

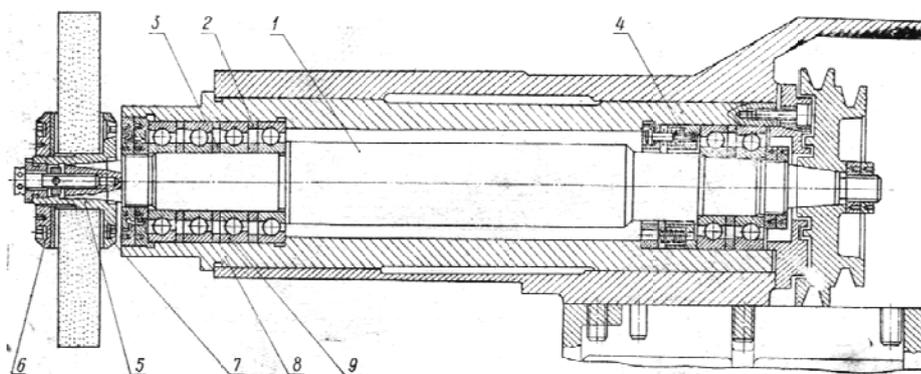


Рис. 1. Вид шпиндельного узла ведущего круга бесцентрово-шлифовального станка

Расчет поверхностей качения на усталостное разрушение.

В справочнике [7] приведены метод расчета динамической грузоподъемности и долговечности, которые применяются для стандартных типов подшипников качения 32118 [7] табл. 1 и 3182128 [7] табл. 3 как необходимые для расчетов геометрических характеристик аналогичных разрабатываемых подшипников [3, 4]. Для определения эксплуатационных характеристик разработанного подшипника рекомендуется следующая методика расчета на усталостное разрушение:

разработки методики идентифицированного расчета контактной жесткости и долговечности по схеме контакта роликов однорядного (одноярусного) бессепараторного подшипника [3].

На рис. 2 показана схема специального бессепараторного подшипника [3], спроектированного по типу 3182113. Особенностью схемы является намеренное увеличенное погрешностей формы тел качения и дорожек, показывающее точки их контакта при сборке комплектующих деталей, имеющих погрешность формы роликов варианта «конусообразности» – «обратная конусность». При этом достигнуто благоприятное расположение наружных поверхностей роликов относительно поверхности дорожек качения, имеющих специально подобранную для данной сборки форму гиперболоидов вращения. Контакт роликов с дорожками и между собой организован путем применения специального контр-шаблона [1] с зазором S между поверхностями, не превышающим пределов $0,003 \dots 0,006$ мм с учетом полей допусков ИТ поверхностей контакта – роликов и дорожек (рис. 2) [1, 7].

На рис. 3 показаны фронтальный вид подшипника и эпюра нагружения тел качения.

– соблюдается условие, что поверхности этих элементов соответствуют техническим требованиям ГОСТ 520–71;

– для доказательства того, что при расчете жесткости и долговечности разрабатываемых бессепараторных подшипников считать эти характеристики идентичными значениям геометрических параметров стандартных подшипников 32118 (аналогично двухрядного. 3182128).

– считать эквивалентными нагрузки стандартных подшипников S_0 и S 32118 и разрабатываемых и допустимость их применение для расчета жесткости спроектированных модернизированных подшипников [3–5].

– для отличия спроектированных роликоподшипников от стандартных 32118 добавлять к в конце стандартных обозначений условные индексы, соответствующие особенностям проектируемых подшипников С-специальные, БС-беспараторные; 1К-контакт «конусообразность» – «обратная конусообразность» [3]; 1Р-однорядные; 1Э-однорядные; (полная аббревиатура 32118 С БС 1К 1Р 1Э).

– расчеты количества роликов, размеров тел качения, наружного и внутреннего колец выполнять с максимальным приближением к рекомендациям стандартов и справочника [7].

Расчет количества роликов [7].

Для расчета используется формула, определяющая зависимость длины средней окружности $D_{ср}$ от номинальных диаметров роликов $d_{др}$ их количества Z и номинального диаметра роликов d_p при условии их беззазорного контакта. т. е. без учета минимально необходимого и достаточного для организации смазки между роликами и дорожками зазора $S_k = 0,003 \dots 0,006$ мм.

Для подшипника типа 32118 размеры даны в справочнике [7] см. табл. 1.

$D=140$ мм; $d=90$ мм; $D1=103$ мм; $B=24$ мм; $D1=127$ мм $Dw=12$ мм; $l=12$ мм; $Z=22$ шт/ (принято по результатам и расчетов $Z=27$ для бес-

сепараторного подшипника) $n=4000$ об/мин; $C=61300$ Н; $C_0=55200$ Н.

Диаметр окружности по центрам тел качения: $D_c = (D+d) / 2 = (140+90)/2 = 115$ (мм).

Расчетное число роликов без использования сепаратора: $Z_{б.с.} = D_c \pi / d_p = 115 \times 3,14 \times 12 = 30$.

Диаметр по бортам однобортных колец: $d_2 = d_1 + 0,38 d_p = 103 + 0,38 \cdot 12 = 107,56$ (мм). $D_2 = D_1 + 0,38 d_p = 127 + 0,38 \cdot 12 = 122,68$ (мм).

Для подшипника типа 32116 размеры даны в справочнике [7]: $D=125$ мм; $d=90$ мм; $D1=103$ мм; $B=24$ мм; $D1=127$ мм; $Dw=12$ мм; $l=12$ мм; $Z=20$ шт/ (принято $Z=27$ для беспараторного подшипника) $n=4000$ об/мин; $C=51300$ Н; $C_0=42600$ Н. По типу данного подшипника спроектирован подшипник 32116 С БС 1К1Р11ЭР имеющий размеры, указанные на рис. 4.

Такая схема контакта является благоприятной с точки зрения достижения наибольшей сопротивляемости разрушению дорожек и тел качения, вследствие организации линейной формы контакта их рабочих поверхностей 3 и 4 с равномерно ориентированными роликами 5 конусообразных форм погрешностей [1].

Расчет подшипников качения. Выполняют расчет подшипников на долговечность по усталостному выкрашиванию и на предотвращение возникновения пластических деформаций [8]. При постоянном режиме расчет подшипников ведут по эквивалентной динамической нагрузке с учетом характера и направления действующих сил. Принимают такую эквивалентную нагрузку, при которой обеспечивается та же долговечность подшипника, что и в действительных условиях нагружения.

Для радиальных и радиально-упорных (см. формулу (1), табл. 1).

где F_r, F_a – соответственно радиальная и осевая нагрузки на подшипник, Н; X, Y – коэффициенты соответственно радиальной и осевой

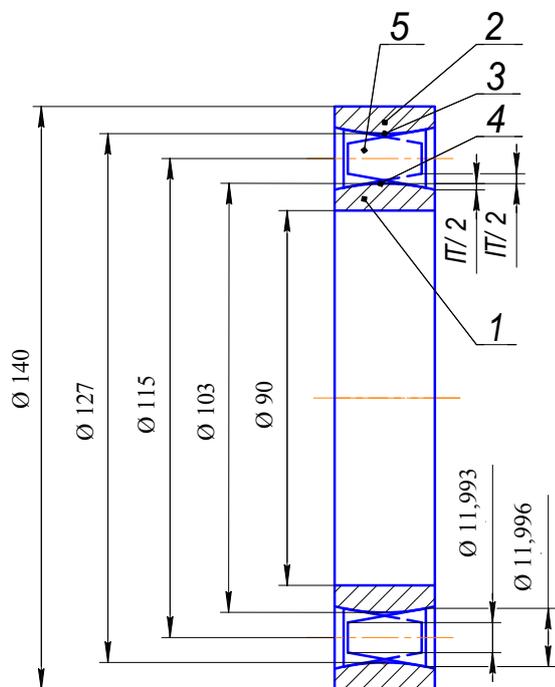


Рис. 2. Схема благоприятного расположения форм контакта тел и дорожек качения на поперечном сечении однорядного однорядного беспараторного подшипника [3]: 1 – внутреннее кольцо; 2 – наружное кольцо; 3 – дорожка качения на наружном кольце; 4 – дорожка качения на внутреннем кольце; 5 – тела качения, имеющие погрешности вида «конусность», контактирующие с внутренним кольцом

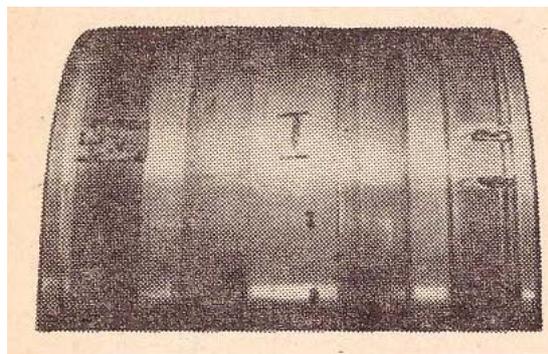


Рис. 3. Вид изношенной дорожки внутреннего кольца беспараторного роликоподшипника [7]

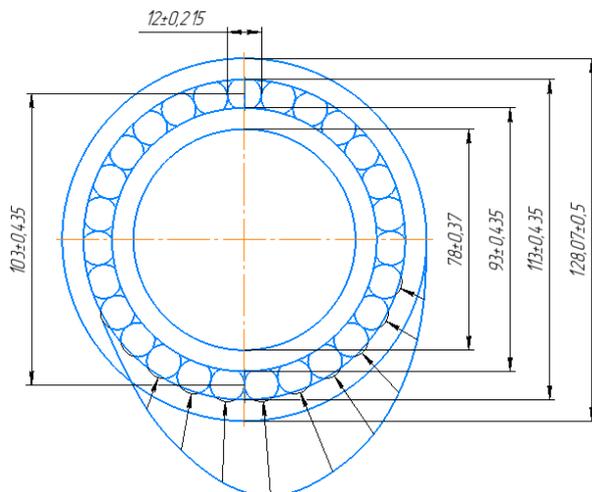


Рис. 4. Вид специального однорядного одноярусного бесепараторного подшипника с эпурой нагружения тел качения [7]

нагрузок; V – коэффициент вращения: при вращении внутреннего кольца $V = 1$, наружного – $V = 1,2$; K_σ – коэффициент безопасности: $K_\sigma = 1$ при спокойной нагрузке, $K_\sigma = 2,5 \dots 3$ при сильных ударах; K_T – температурный коэффициент,

при нагреве подшипникового узла до 125° $K_T = 1$.

Грузоподъемность подшипников характеризуется базовой динамической грузоподъемностью C и базовой статической грузоподъемностью C_0 [7].

Из условия, что половина тел качения не нагружена (верхняя часть подшипника), принимаем число роликов находящихся под нагрузкой равно $Z=13$.

Известна максимальная сила при которой не происходит пластических деформаций тел качения

Долговечность – параметр определяющий количественно срок службы подшипника.

рассчитывается по формуле 2 табл. 1: L_μ и L_v – соответственно долговечности вращающегося и неподвижного колец, млн. об.

где C – динамическая грузоподъемность подшипника; p – коэффициент зависящий от формы контакта дорожки и ролика, для точечного $p=3$, для линейного $p=3,3$; P – эквивалентная динамическая нагрузка.

Таблица 1

Данные и результаты качественного анализа аналитических зависимостей, используемых при расчете долговечности и контактной жесткости

Номер	Формулы для расчета долговечности
1	Для радиальных и радиально-упорных $P = (XV F_r + Y F_a) K_\sigma K_T$
2	По числу оборотов за время в часах $L = \left(\frac{C}{P}\right)^p$ млн. оборотов.
3	по рекомендациям [7] $L = (L_\mu^{-1,11} + L_v^{-1,11})^{-0,9}$,
4	при точечном контакте $L_\mu = \left(\frac{Q_{c\mu}}{Q_{e\mu}}\right)^3$, $L_v = \left(\frac{Q_{cv}}{Q_{ev}}\right)^3$;
5	при линейном контакте $L_\mu = \left(\frac{Q_{c\mu}}{Q_{e\mu}}\right)^4$, $L_v = \left(\frac{Q_{cv}}{Q_{ev}}\right)^4$;
6	Динамическая грузоподъемность контакта (Н): точечного контакта $Q_c = 98,1 \left(\frac{2R_w}{D_w} \frac{r}{r - R_w}\right)^{0,41} \frac{(1 \mp \gamma)^{1,39}}{(1 \pm \gamma)^{1/3}} \left(\frac{\gamma}{\cos \alpha}\right)^{0,3} D_w^{1,8} Z^{-1/3}$;
7	Грузоподъемность роликоподшипника (линейный контакт) $Q_c = 550 \lambda \frac{(1 \mp \gamma)^{1,39}}{(1 \pm \gamma)^{1/3}} \left(\frac{\gamma}{\cos \alpha}\right)^{2/9} D_w^{29/27} l_w^{7/8} Z^{-1/4}$;

При точечном контакте и при линейном контакте (табл. 1): $Q_{цн}$ и Q_{cv} – динамическая грузоподъемность контакта тел качения с вращающимся и неподвижным кольцами соответственно; $Q_{цн}$ и Q_{cv} – эквивалентная нагрузка в контакте тел качения с вращающимся и неподвижным кольцами соответственно.

В формулах и табл. 1 используются следующие зависимости и параметры подшипников:

где R_w и r – радиусы контура тела качения и дорожки качения соответственно в направле-

нии, перпендикулярном к направлению вращения, мм; D_w и l_w – диаметр и рабочая длина тел качения, мм; Z – число тел качения в одном ряду подшипника; α – угол контакта в подшипнике, град.; $\gamma = (D_w \cos \alpha) / D_0$; D_0 – диаметр подшипника.

Для близкого по размерам подшипника типа 3182118 размеры даны в справочнике [7] (табл. 6).

Для обеспечения максимальной унификации проектируемых подшипников стандартным предусмотрена их унификация (табл. 2).

Таблица 2

Параметры стандартных подшипников

Условное обозначение подшипников для типов		d	D	B	r	d1	D1	Ролики			Ориентировочные расчетные параметры			
								D_w	l	Z	C H	Co H	п жидкой смазки мин-1	Масса кг
32000	3118218	90	140	24	2,5	103	127	12	11	22	61300	52300	4000	1,30
	3182118 С БС 1К1Р11ЭР	90	140	27	2,5	103	127	12	12	27	111000	119000	4000	2.13

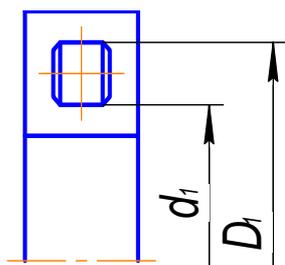


Рис. 5. Схема обозначения параметров подшипников: D_1 и d_1 – диаметры дорожек внешнего и внутреннего колец соответственно

Результаты расчетов и их анализ

1. Индивидуальный подбор в бесепараторном подшипнике качения сложнопрофильных в пределах допусков на изготовление погрешностей форм роликов, обеспечивающий благоприятное их сочетание с погрешностями дорожек качения колец типа гиперboloид вращения, при чередовании тел качения с погрешностями «конусообразность» и «обратная конусообразность» относительно друг друга, требует разработки специальной методики расчета.

2. Разработка и апробация такой методики создаст возможность внедрения в производство специальных унифицированных бесепараторных многорядных и многорядных бесепараторных подшипников с нормируемыми величинами контактной жесткости и долговечности за счет перехода от точечного контакта роликов с дорожками качения к близкому к линейному контакту.

3. Необходимыми и достаточным доказательствами того, что при расчете жесткости

и долговечности бесепараторных подшипников могут служить результаты анализа табл. 1 и 2, из которого следует, что геометрические параметры спроектированных и стандартных подшипников идентичны, а значит нагрузки Co и C эквивалентны и их можно применять для расчета характеристик спроектированных модернизированных подшипников [3–5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. RU 2016132018 А МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36 01.06.2017 : Способ повышения точности сборки... / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
2. Санинский, В. А. Способ сборки подшипников качения / В. А. Санинский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 49–52.
3. П. м. 171139 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
4. П. м. 171078 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
5. П. м. 171076 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C19/50, F16C33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
6. П. м. 171079 Российская Федерация, МПК F16C19/22, F16C 19/50, F16C 33/36. Подшипник качения / В. А. Санинский, Ю. Л. Чигиринский, К. В. Худяков, Е. Н. Смирнова ; ВолгГТУ. – 2017.
7. Перель, Л. Я. Подшипники качения. Расчет, проектирование и обслуживание опор : справочник / Л. Я. Перель. – М. : Машиностроение, 1983. – 543 с., ил.

УДК 621.9

*В. С. Селифонов, В. А. Хандожко, В. П. Матлахов***СТЕНД ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ И НАСТРОЙКИ СЕРВОПРИВОДОВ СТАНКОВ
С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ****Брянский государственный технический университет**

E-mail: msi@tu-bryansk.ru

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

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

*V. S. Selifonov, V. A. Khandozhko, V. P. Matlakhov***STAND FOR PARAMETERIZATION AND CONFIGURATION
OF THE SERVO DRIVES OF NC MACHINE TOOLS****Bryansk State Technical University**

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

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

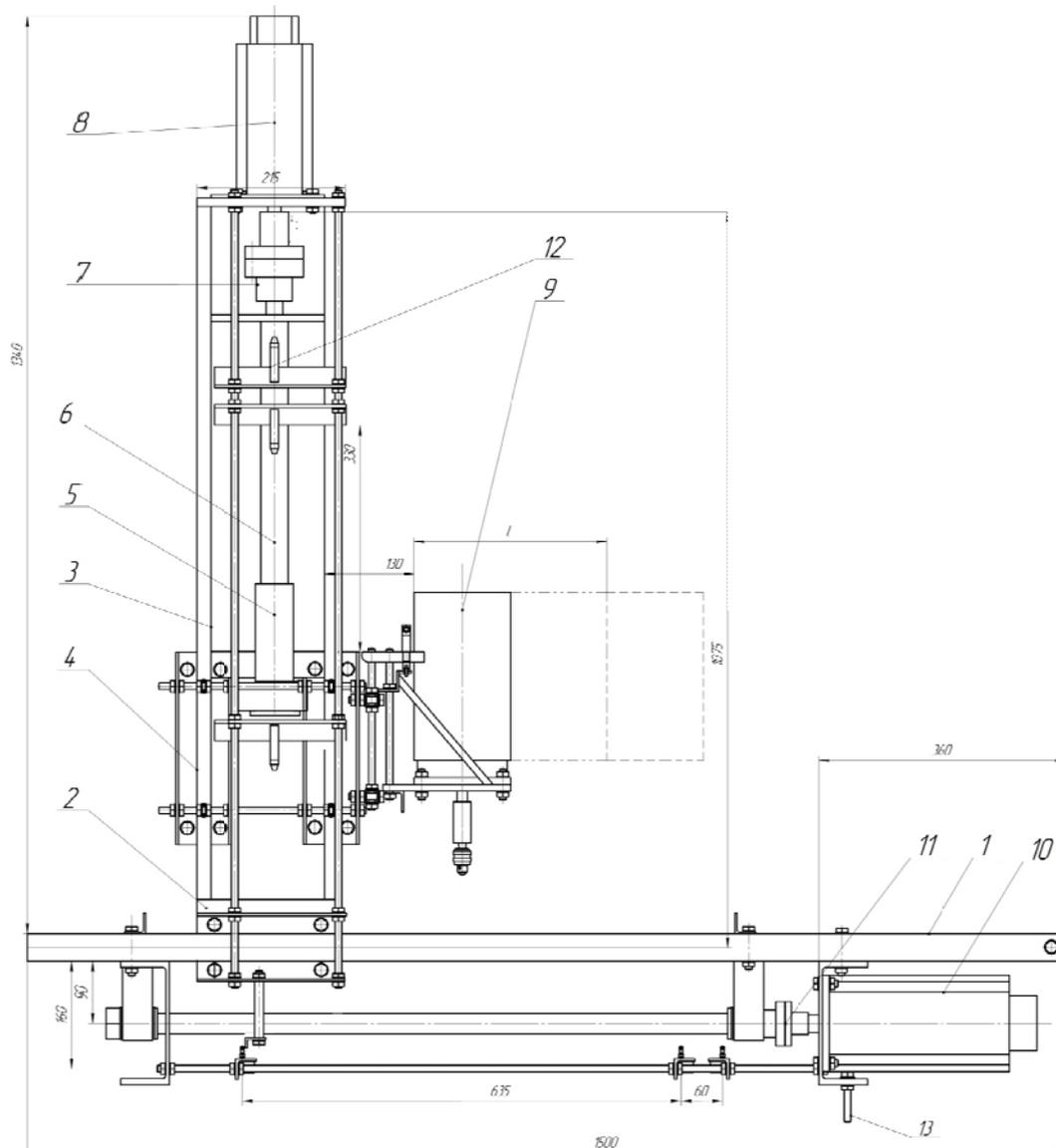
Современный станок с ЧПУ представляет собой сложную технологическую машину, включающую в себя механическую часть, электромеханическую, гидравлическую, пневматическую, а также систему управления. Наличие разнообразного оборудования в составе станка с ЧПУ предъявляет высокие требования к квалификации обслуживающего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

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

В лаборатории кафедр «МСИИ» и «АТС»

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

При проведении анализа прототипов станка [2, 3] была выбрана компоновка, общий вид которой представлен на рисунке. Конструкция стенда разработана наглядно, чтобы студент мог изучить составные узлы стенда, их установку на оборудовании. Стенд состоит из рамы нижней направляющей 1, которая механически соединена с основанием, выполненным из швеллера. По направляющим 1 в продольном направлении перемещается каретка привода оси X 2, на которой установлены вертикальные направляющие 3, по которым перемещается каретка привода оси Z 4 с направляющими продольного перемещения привода главного движения (ПГД). Перемещение рабочих органов осуществляется от вентильных серводвигателей модели КМ-11-06.0-020 и NYS-165L-20-16.0 Z (на рис. поз. 8 и 10). Крутящие моменты от данных двигателей передаются через муфты 7 и 11, соединяющие электродвигатели с ходовыми винтами данных приводов. ПГД данного станка включает в себя электродвигатель 9 модели МА 80 М Н1, на выходном валу которого закреплен патрон для осевых инструментов с цилиндрическим хвостовиком.



Общий вид станда:

1 – рама нижняя направляющая; 2 – каретка привода оси X; 3 – вертикальные направляющие; 4 – каретка привода оси Z; 5 – гайка; 6 – ходовой винт; 7 – муфта; 8 – электродвигатель вертикального перемещения; 9 – электродвигатель ПГД; 10 – вентильный серводвигатель; 11 – муфта; 12 – конечный выключатель; 13 – заземление

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

Система числового программного управления станда выполнена на базе отечественного УЧПУ фирмы «Балт-Систем» модели NC-310. Это система класса PCNC поддерживает стандартный G-код, язык программирования высо-

кого уровня GTL, визуальное программирование. Корректность технологической программы проверяется с помощью встроенной системы визуализации. Благодаря гибкости базового программного обеспечения УЧПУ: механизма персонализации (характеризации) и универсальности аппаратной части оно может быть подключено к любому станку. Наличие стандартных интерфейсов USB и Ethernet позволяет передавать технологическую программу, подготовленную в САМ-системе, с помощью FLASH-накопителя или с персонального компьютера. Стенд позволяет готовить технологическим программистам сверлильного, расточного и фрезерного оборудования.

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

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

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

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

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

Файл IOCFIL устанавливает связь сигналов программы логики станка с файлами характеристики. Программа логики через программный интерфейс PLC взаимодействует с аппа-

ратными выходами УЧПУ. Язык PLC реализует алгоритмы управления станком, такие как управление электроавтоматикой, блокировка перемещений при возникновении аварии, сигнализация состояния оборудования на пульте оператора.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

УДК 621.9.02-229

А. Б. Турыгин, А. В. Рожнов, И. П. Петрюк, И. С. Жуков
**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Костромская государственная сельскохозяйственная академия

E-mail: ipp2801@rambler.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса релаксации напряжений в соединениях с натягом с автофретированными охватывающими деталями в нормальных условиях при циклических нагрузках. В данной работе оценка процесса релаксации напряжений проводилась измерением уровня остаточных напряжений по эффекту Баркгаузена.

Объект исследований – прессовое соединение с предварительно деформированными (автофретированными) охватывающими деталями.

Была разработана методика определения уровня остаточных напряжений в соединениях с натягом с применением прибора, работающего на основе эффекта Баркгаузена. Проведены экспериментальные исследования процесса релаксации напряжений в соединениях с натягом с автофретированными охватывающими деталями в нормальных условиях при циклических нагрузках.

В работе проведена оценка влияния параметров соединения и числа циклов нагружения на процесс релаксации напряжений в соединениях с натягом с автофретированными охватывающими деталями в нормальных условиях при циклических нагрузках.

Ключевые слова: прессовое соединение, релаксация напряжений, циклические нагрузки.

A. B. Turygin, A. V. Rozhnov, I. P. Petryuk, I. S. Zhukov

OPERABILITY OF COMPONENTS OF PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Kostroma State Agricultural Academy

The results of experimental studies of stress relaxation process connections with a tightness with autofrettage female member in normal conditions when a cyclic load-ing. In this paper we estimate the stress relaxation process was carried out by measuring the level of residual stresses on the Barkhausen effect. One of the effective ways to improve the bearing capacity of press connections is to use autofrettage covering parts.

The object of research – forging a connection to the pre-deformed (autofrettage) covering parts.

The technique was developed determine the level of residual stress in the joints with interference with the use of the device, operating on the basis of the Barkhausen effect. Experimental researches of stress relaxation process in joints with interference with autofretched observations under normal conditions under cyclic loads are carried out.

According to the results of the pilot study, we can conclude that in the compounds with autofretched female member under cyclic loading under normal conditions there is a non- significant (less than 5%) decrease in the level of residual stresses.

The effect of the connection parameters and the number of loading cycles on the process of stress relaxation in joints with interference with autofretched female components under normal conditions under cyclic loads is estimated.

Keywords: press connection, stress relaxation, cyclic loads.

Введение

Соединения с натягом широко применяются в автотракторной технике в связи со способностью передавать значительные по величине нагрузки. В процессе работы сельскохозяйственных машинах большинство соединений с натягом испытывают нагрузки переменные во времени. При этом, один из факторов, влияющих на работоспособность и надежность соединения, является стабильность напряженного состояния во времени. Использование в них предварительно упруго-пластически деформированных (автофретированных) охватывающих деталей (АОД) позволяет увеличить контактное давление в соединении, тем самым, повышая их нагрузочную способность. Проведенные исследования [1–3] показали, что статическую прочность соединений вследствие применения АОД можно повысить практически в два раза при некотором увеличении усталостной прочности вала в зоне напрессовки. Поэтому вопрос определения релаксации напряжений в данных соединениях является актуальным.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

В данной работе оценка процесса релаксации напряжений проводилась измерением уровня остаточных напряжений по эффекту Баркгаузена. На стабильность напряженного состояния оказывает влияние ряд факторов. Одним из важных факторов является величина контактного давления P_k . При планировании эксперимента рассматривались два уровня данного фактора. Нижний уровень соответствовал предельному упругому состоянию. Применение в соединениях АОД позволяет повысить величину контактного давления. Поэтому верхний

уровень определялся из условия отсутствия вторичных пластических деформаций.

Другим фактором являлась жесткость охватываемой детали, которая оценивалась отношением наружного диаметра D к внутреннему d (рис. 1). Уровни варьирования фактора выбранны из наиболее часто применяемых на практике соотношений для соединений с натягом: $D/d = 1,5$ и $D/d = 2$.

Следующим фактором является число циклов нагружения N . Это обусловлено тем, что необходимо было исследовать, насколько изменяется уровень остаточных напряжений в соединении от начала нагружения до его разрушения. Поэтому было принято два уровня данного фактора: нижний соответствовал началу нагружения, то есть $N = 0$ циклов; верхний уровень определялся базовым числом циклов, принятых при испытании на усталость – $N = 2 \cdot 10^6$ циклов.

Следует отметить, что значительное влияние на процесс релаксации оказывает температурный фактор. Однако цель данного исследования заключалась в исследовании релаксационных процессов в высоконапряженных прессовых соединениях при комнатной температуре. Поэтому температура как фактор в данном эксперименте не рассматривалась.

На основании выбранных факторов и их уровней варьирования была построена матрица планирования трехфакторного эксперимента. Согласно данной матрице, было определено количество опытных образцов и проведено экспериментальное исследование.

Детали соединений были изготовлены из стали 40Х (ГОСТ 4543–71) с геометрическими параметрами согласно плану эксперимента (рис. 1).

Чистовая обработка посадочных поверхностей валов производилась шлифованием до получения шероховатости $6,5 R_a$. Посадочные поверхности втулки обрабатывались до шероховатости $10 R_a$. Такое сочетание обработки сопрягаемых поверхностей характерно для соединений с натягом, имеющих массовое применение.

Автофретирование втулок производилось при помощи пуансона с конусностью 1:50. Для оценки напряженно-деформированного состоя-

ния втулки при автофретировании контролировались: усилие упруго-пластического деформирования, изменение наружного диаметра.

Измерение размеров сопрягаемых поверхностей производилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В качестве истинного принималось среднее значение размера.

Сборка деталей в соединении производилась методом продольной запрессовки на гидравлическом прессе с измерением максимального усилия запрессовки.

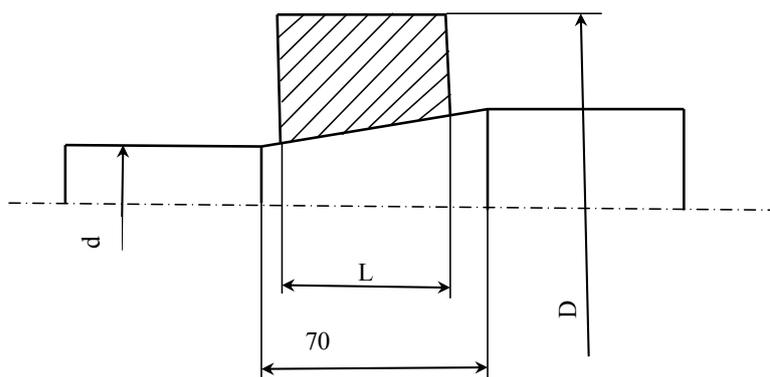


Рис. 1. Экспериментальный образец

Испытания проводились при нагружении образца чистым изгибом с вращением на универсальной испытательной машине МУИ-6000.

Для измерения уровня остаточных напряжений в соединении был использован датчик, работающий по эффекту Баркгаузена. На датчике установлены катушки для перемангничивания поверхностно слоя и чувствительный эле-

мент для измерения уровня шумов Баркгаузена. Прибором предусмотрено регулирование величины тока перемангничивания, поступающего на катушку датчика.

Остаточные напряжения определялись только на наружной поверхности втулки, так как расположить датчик в зоне контакта при данной конструкции образцов невозможно вследствие больших габаритов датчика (рис. 2).

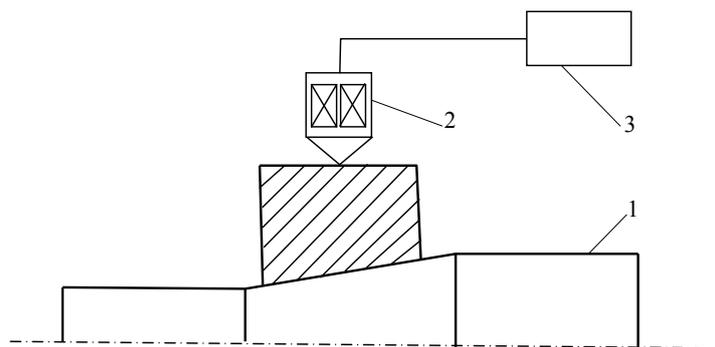


Рис. 2. Схема измерения остаточных напряжений:
1 – образец; 2 – датчик; 3 – блок измерения

Датчик устанавливался на образец, который устанавливался в шпинделях МУИ-6000. Показания регистрировались прибором. Исходя из данной схемы измерения уровня остаточных напряжений, была использована следующая

схема тарировки показаний датчика (рис. 3).

Коническое соединение втулки и вала с конусностью 1:50 позволяет путем осевого перемещения вала относительно втулки изменять величину контактного давления.

Запрессовка вала осуществлялась на прессе с контролем усилия запрессовки и осевого перемещения. Величина максимального значения P_k определялась из условий упругих деформаций деталей.

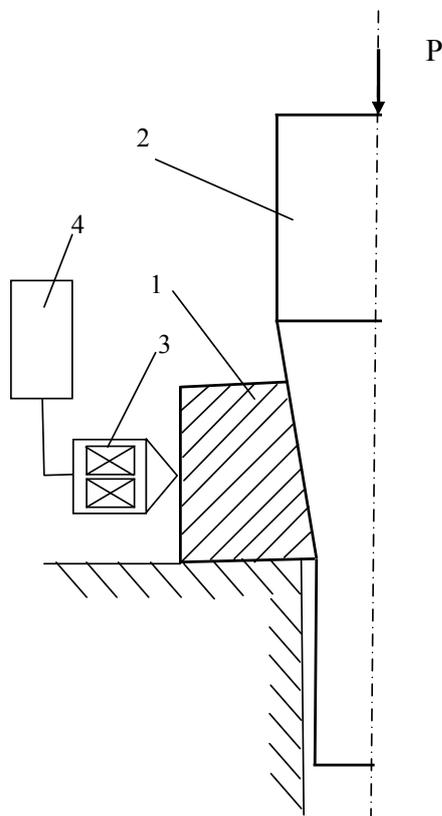


Рис. 3. Схема тарировки показаний датчика:
1 – втулка; 2 – вал; 3 – датчик; 4 – блок измерения

Результаты экспериментов показывают, что в соединениях с АОД в данных условиях процессы релаксации напряжений незначительны.

Регрессионный анализ позволил получить следующую аналитическую зависимость:

$$\Delta P_k = -62,07 + 0,25P_k + 100\left(\frac{D}{d}\right) - 0,2 \ln N$$

Адекватность данной модели проверялась по критерию Фишера при уровне значимости 0,05. Коэффициенты регрессии оценивались по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05.

Выводы

Разработанная методика с применением прибора, работающего по эффекту Баркгаузена, позволила экспериментально измерить уровень остаточных напряжений.

По результатам экспериментального исследования можно сделать вывод, что в соединениях с предварительно упруго-пластически деформированными (автофретированными) охватываемыми деталями при циклических нагрузках в нормальных условиях происходит незначительное (не более 5 %) уменьшение уровня остаточных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клековкин, В. С. Исследование напряженного состояния деталей в соединениях с автофретированной охватываемой деталью / В. С. Клековкин, И. В. Абрамов // Динамика и прочность механических систем : межвуз. сб. – Пермь, 1976. – Вып. 186. – С. 112–116.
2. Абрамов, И. В. Исследование прочности соединений с автофретированными охватываемыми деталями при переменных нагрузках / И. В. Абрамов, Ю. В. Турыгин, В. С. Клековкин // Теория машин металлургического и горного оборудования : прокатные, буровые и транспортные машины : межвуз. сб. – Свердловск, 1982. – С. 136–140.
3. Щенятский, А. В. Напряженно-деформированное состояние и несущая способность высокопрочных прессовых соединений / А. В. Щенятский, И. В. Абрамов, Ю. В. Турыгин // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2001. – № 4. – С. 11–15.

УДК 621.923

С. Б. Фам, О. А. Курсин, Ю. Л. Чигиринский, Н. И. Егоров, С. Ч. Као
ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ХОНИНГОВАНИЯ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ
ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Анализируется новый метод хонингования с опережающим пластическим деформированием, дающий повышение качества обработанной поверхности с максимальной производительностью изделий из низкоуглеродистых сталей.

Ключевые слова: хонингование, опережающее пластическое деформирование, качество поверхности, низкоуглеродистая сталь, абразивная обработка.

S. B. Fam, O. A. Kursin, Yu. L. Chigirinskij, N. I. Egorov, S.Ch. Kao

RESEARCH OF METHOD OF HONING WITH OUTFRONTING PLASTIC DEFORMATION IN THE PROCESSING OF BULKY PRODUCTS OF LOW CARBON STEELS

Volgograd State Technical University

The proposed new method of honing with advanced plastic deformation to improve the surface quality with maximum performance when honing products from low-carbon steels.

Keywords: honing, advanced plastic deformation, quality of a surface, low carbon steel, abrasive processing.

Среди методов финишной обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей ведущее место занимает хонингование. Этот метод получил широко применение в машиностроении при чистовой обработке внутренних поверхностей благодаря обеспечению высокой точности и качества поверхностей ответственных сопряжений [1].

На производстве, в частности на предприятиях «ВЗБТ», «Нефтемаш» и «Каустик» города Волгограда, при финишной абразивной обработке гидро-, пневмоцилиндров, цилиндров компрессоров из мягких низкоуглеродистых

морозостойких перлитных и нержавеющей аустенитных сталей не удается достичь высокого качества обработанной поверхности. При обработке подобных материалов абразивное зерно внедряется в заготовку на большую глубину, что увеличивает глубину риски-царапины и наплывы металла вдоль следа обработки. Все это увеличивает шероховатость получаемой поверхности, что видно из экспериментального графика [5], представленного на рис. 1. Поэтому для повышения качества поверхности необходимо повышать ее твердость перед обработкой.

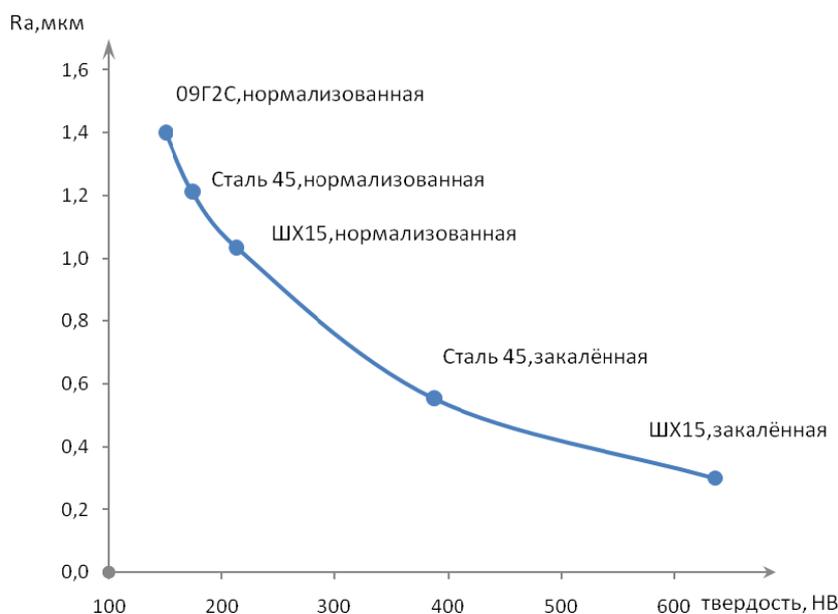


Рис. 1. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra обработанной поверхности от ее твердости при хонинговании сталей

К способам повышения твердости поверхности относятся: азотирование [2], цементация и нитроцементация, борирование [3], лазерное легирование поверхностного слоя [4], наводороживание [5]. Однако такие способы имеют общие недостатки: снижение коррозионной стойкости изделий вследствие выбивания атомов хрома атомами углерода или азота, и тепловые деформации вследствие нагрева изделий до температур 700–950 °С. Поэтому, в ряде случаев, в особенности при обработке крупно-

габаритных деталей, данные направления неприменимы.

Предлагается новый метод обработки – хонингование с опережающим пластическим деформированием. Метод хонингования с опережающим пластическим деформированием совмещает в себе два процесса – предварительное поверхностное пластическое деформирование и собственно хонингование. При этом, к моменту начала воздействия абразивного инструмента на материал срезаемого слоя, часть рабо-

ты, затрачиваемой на пластические деформации в процессе стружкообразования при обычном хонинговании, уже предварительно выполняется обкатным устройством [7]. В процессе обработки с опережающим пластическим деформированием абразивным инструментом совершается не вся работа, а только ее часть. Следовательно, снижается влияние неблагоприятных факторов процесса стружкообразования, уменьшаются нагрузки на абразивный инструмент. В результате повышаются качество и производительность обработки [6].

Исследовательским коллективом ВолГТУ (Д. В. Крайнев, А. Р. Ингеманссон, П. А. Норченко) [7, 8, 9, 10, 11] проведен широкий спектр исследований лезвийного резания с опережающим пластическим деформированием на сталях перлитного, аустенитного, мартен-

ситно-ферритного, мартенситного классов.

В нашей работе исследуется абразивная обработка хонингованием с ОПД низкоуглеродистой нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В результате пробных экспериментов были получены следующие результаты: на рис. 2, 3, 4 представлены профилограммы поверхностей, обработанных хонингованием при различном давлении опережающего пластического деформирования. Обработка хонингованием производилась при следующих режимах: $t = 1$ мин – время хонингования; $P_x = 0,4$ МПа – давление разжима брусков при хонинговании; $V_{в-п} = 8$ м/мин – скорость возвратно-поступательного движения хонинговальной головки; $V_{вр} = 50$ м/мин – скорость вращательного движения хонинговальной головки. Длина трассы интегрирования – 4 мм.

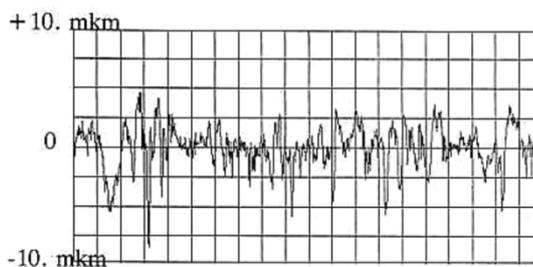


Рис. 2. Микропрофиль поверхности, полученной после хонингования стали 12Х18Н10Т ($R_a = 1,3$ мкм)

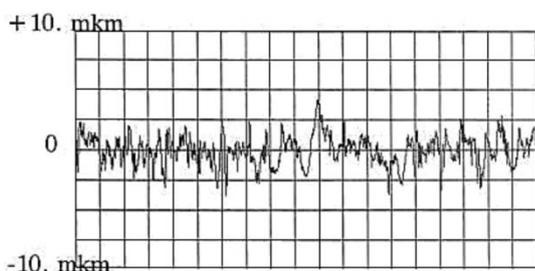


Рис. 3. Микропрофиль поверхности стали 12Х18Н10Т, после хонингования с ОПД, $P_{опд} = 23$ МПа ($R_a = 0,88$ мкм)

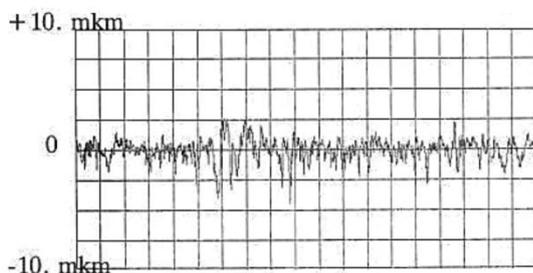


Рис. 4. Микропрофиль поверхности стали 12Х18Н10Т, после хонингования с ОПД, $P_{опд} = 36$ МПа ($R_a = 0,65$ мкм)

Из профилограмм видно, что повышение твердости обрабатываемой поверхности опережающим пластическим деформированием перед хонингованием позволяет уменьшить параметр шероховатости R_a до 50 %, повысить насыщенность металла в шероховатом слое и физико-

механические характеристики поверхности. Это может значительно увеличить срок службы изделия и его конкурентоспособность.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет эффективно работать при обработке изделий из «мягких» низкоуглеродистых сталей.

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. Курсин, О. А. Исследование путей повышения качества поверхностей изделий из низкоуглеродистых сталей при финишной абразивной обработке : монография / О. А. Курсин, А. Л. Плотников, С. Ч. Као, С. Б. Фам, Н. И. Егоров, М. Ю. Полянчикова ; ВолГТУ. – Волгоград : ВолГТУ, 2017. – 104 с.
6. Подураев, В. Н. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В. Н. Подураев, В. М. Ярославцев, Н. А. Ярославцева // Вестник машиностроения. – 1971. – № 4. – С. 64–65.
7. Полянчиков, Ю. Н. Положительное воздействие опережающего пластического деформирования на формирование шероховатости поверхности, обработанной резанием / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, А. Р. Ингеманссон, В. В. Амельченко, А. В. Раздоргин // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 6). – С. 41–43.
8. Полянчиков, Ю. Н. Получение оптимальных характеристик поверхностного слоя деталей при резании по методу с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, Г. В. Геронтиди, А. Р. Ингеманссон // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 5). – С. 31–33.
9. Полянчиков, Ю. Н. Улучшение параметров шероховатости при обработке резанием с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, А. Р. Ингеманссон // Вестник СГТУ. – 2010. – № 1. – С. 67–71.
10. Полянчиков, Ю. Н. Эффективность применения безвольфрамового твердого сплава ТН 20 при резании нержавеющей сталей с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, А. Р. Ингеманссон, С. О. Щедриков, А. С. Иночкин // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 6). – С. 43–45.
11. Пат. 2399460 РФ. МПК В 23 В 1/00. Способ обработки деталей резанием с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Полянчиков, П. А. Норченко, Д. В. Крайнев, А. Р. Ингеманссон, Л. А. Качалова, Л. С. Ангеловская; заявитель и патентообладатель ВолГТУ. – № 2009111702/02; заявл. 30.03.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. 6 с.

УДК 621.9.08

*Е. М. Фролов, В. Г. Гусев, Э. А. Корзун***ОСОБЕННОСТИ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ
МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: e_frolov@vstu.ru

Современные машиностроительные предприятия встречают препятствие в лице сложности получения оперативной информации из зоны резания о протекании процесса металлообработки. В статье рассматриваются особенности датчиков для промышленного применения, позволяющие решить проблему оперативного доступа к информации из зоны резания.

Ключевые слова: метод пробного прохода, термоЭДС, управление процессом металлообработки, станочные САПР, промышленные датчики.

*E. M. Frolov, V. G. Gusev, E. A. Korzun***FEATURES OF SENSORS FOR INDUSTRIAL APPLICATION OF METHODS
OF OPERATIONAL CONTROL AND CONTROL OF THE CUTTING PROCESS****Volgograd State Technical University**

Modern machine-building enterprises encounter an obstacle in the face of the difficulty of obtaining operational information from the cutting zone about the course of the metalworking process. The article deals with the features of sensors for industrial applications, which allow solving the problem of operative access to information from the cutting zone.

Keywords: trial passage method, thermoEMF, metalworking process control, machine CAD, industrial sensors.

Получение оперативной информации о протекании процесса резания позволяет своевременно выявлять ситуации, приводящие к по-

ломке не только обрабатываемого инструмента, но и станка. Для сбора информации применяются датчики промышленного назначения.

Датчики, встроенные в станок, применяются для измерения ключевых параметров обработки в режиме реального времени. Они обеспечивают оперативную информацию о ходе процесса обработки в целом, состоянии станка и инструмента.

Существует большое разнообразие датчиков для контроля параметров технологического процесса. Они могут применяться как по отдельности, так и в комбинации друг с другом. Датчики высоты используются в станках для контроля наличия и отслеживания перемещения деталей. Концевые датчики используются для определения начальных позиций по осям и ограничения перемещений рабочих органов станка. Оптические линейки применяются для измерения линейных размеров изделия. Датчики высоты инструмента используются для определения и калибровки положения режущего инструмента по оси Z на фрезерных станках. Датчики вибрации позволяют производить мониторинг и анализ параметров вибрации не только станка в целом, но и каждого инструмента в отдельности. Получение оперативных данных способствует своевременному выявлению ситуаций, приводящих к поломке инструмента и жизненно важных частей станка, что значительно снижает затраты на ремонт и обслуживание. Датчики сил резания, фиксируя колебания элементов упругой системы станка, позволяют получать оперативную информацию о состоянии обрабатываемой детали и инструмента.

Технологический процесс обработки детали на токарном станке предполагает работу датчиков в агрессивной среде и при высокой температуре. Поэтому для стабильной и длительной работы датчиков требуется их подбирать так, чтобы пределы температур для работы были больше, чем температура в зоне обработки. На параметры измерений влияют не только температура в зоне резания, но и жидкости, электромагнитные помехи, стружка, СОТС и др.

При выборе датчиков для эксплуатации в условиях воды и водных растворов следует отдавать предпочтение изделиям, предназначенным не только для работы под водой, но и в широком диапазоне температур и стойких к агрессивным растворам. Характерными признаками таких изделий являются корпус из нержавеющей стали, герметичное кабельное присоединение, применение материалов, сохраняющих эластичность в широком диапазоне температур, внутренние уплотнения заглушек,

возможность длительной эксплуатации в условиях влаги или погружения в воду.

Обеспечение работоспособности датчиков в условиях агрессивных сред осуществляется по двум направлениям. Во-первых, внешние элементы датчика (корпус, заглушки, элементы крепления и т.п.) изготавливаются с применением конструкционных материалов, стойких к агрессивным средам. Как правило, это нержавеющая сталь 12х18н10т, фторопласт-4, текаформ, керамика, стекло. Этот путь обеспечивает сохранность внешней оболочки датчика. Во-вторых, применением в качестве уплотняющего материала фторопласта, кислото- и щелочестойкой резины, специальных клеевых составов. Данные решения предотвращают негативное влияние агрессивных паров на элементы уплотнения.

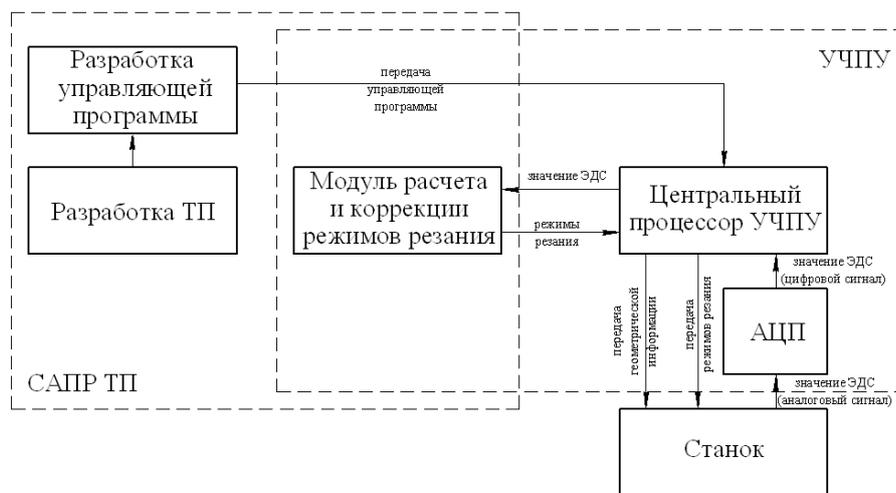
Для снижения негативного влияния электромагнитных помех не следует прокладывать сигнальные цепи датчиков вместе с силовыми цепями, питающими мощные потребители тока. Кабели и провода датчиков и соединителей не следует располагать в непосредственной близости от источников электромагнитных помех. При наличии источников кондуктивных помех следует применять экранирование кабелей и проводов питания датчиков. Методы экранирования сигнального провода выбираются в зависимости от путей прохождения помехи. Для устранения паразитной емкостной связи используют электростатический экран в виде проводящей трубки (чулка), охватывающей экранируемые провода, а для защиты от магнитного поля используют экран из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Для защиты от стружки и СОТС датчики выполняют в специальном закрытом корпусе, исключающем попадание посторонних веществ, влияющих на результаты измерения.

Одним из наиболее перспективных в плане промышленного применения методов контроля и оптимизации режимов резания токарной обработки является метод пробного прохода [2]. Он основывается на измерении величины термоЭДС пары инструмент (твердосплавный) – обрабатываемая деталь и использовании ее в качестве интегрального показателя условий протекания процесса резания. Сигнал термоЭДС, формирующийся в зоне резания, представляет ценность для автоматизированного расчета параметров обработки в связи с тем, что он является неотъемлемым спутником про-

цесса резания и имеет четкую корреляционную связь с физико-механическими свойствами контактной пары [3]. Имея электрическую природу, он доступен для регистрации средствами современных устройств ЧПУ без дополнительного преобразования и сложной обработки. При использовании сигнала термоЭДС отпадает необходимость в предварительных механических испытаниях сталей, с целью определения поправочных коэффициентов в формулах расчета режимов обработки. Описанные выше

особенности применения сигнала термоЭДС для управления процессом резания позволяют перенести модуль расчета режимов резания непосредственно в УЧПУ станка (схема представлена на рисунке) [5]. В этом случае «модуль расчета режимов резания» является как частью САПР ТП, так и частью УЧПУ, что позволяет оперативно и с достаточно высокой, для автоматизированного производственного процесса, степенью точности определять режимы текущего процесса обработки.



Структурная схема положения модуля расчета режимов резания в процессе разработки и осуществления ТП

В качестве базового для модуля расчета режимов резания, может быть выбран алгоритм, основанный на способе параметрической оптимизации режимов резания методом линейного программирования [1]. В качестве расчетного алгоритма может применяться симплекс-метод. Целевые функции могут быть различными и выбираться исходя из целей управления процессом обработки [4].

Для реализации описанного выше метода целесообразно использовать датчик, у которого измерительная и обрабатывающая (микроконтроллер) части разделены. Это позволит минимизировать количество изменений в конструкции инструмента и избежать необходимости герметизации большого количества блоков устройства и их соединений. На результаты измерения магнитоэлектрические помехи и агрессивная среда должны иметь незначительное влияние, поэтому использование герметично закрытого корпуса и исполнение конструкции из антикоррозионного материала является обязательным условием. Возможно размещение измерительного элемента в полостях инструмента.

Метод коррекции режимов резания по величине термоЭДС [7] имеет еще одну особенность – необходимость дополнительной электрической изоляции детали или резца. Применение для этого токонепроводящих прокладок снижает жесткость и виброустойчивость технологической системы. Изоляция требуется для того, чтобы избежать появления источников вторичных (паразитных) ЭДС, а также коротких (шунтирующих) электрических цепей при повторном контакте сходящей стружки с державкой. Анализ современных методик электроизоляции выявил возможность напыления на державку резца тонких коррозионностойких диэлектрических покрытий различных составов (например Al_2O_3), используя технологию плазменного напыления [6].

Результат работы датчиков промышленного назначения, исходя из вышперечисленного, будет зависеть от многих параметров, таких как температура, влажность, агрессивная среда и электромагнитные помехи. Поэтому, с целью повышения точности и достоверности результата, такие датчики должны разрабатываться из

антикоррозионного материала и исполняться в закрытом корпусе, исключая попадание посторонних веществ. Дополнительно может быть применена электрическая изоляция самой детали или обрабатывающего инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горанский, Г. К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г. К. Горанский, Е. А. Владимиров, Л. Н. Ламбин. – М. : Машиностроение, 1970. – 220 с.
2. Пат. 2063307 Российская Федерация, МКИ 6 В 23 В 25/06. Способ определения допустимой скорости резания при механической обработке детали твердосплавным инструментом / А. Л. Плотников ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 94010673/08 ; заявл. 29.03.1994 ; опубл. 10.07.1996, Бюл. № 19.
3. Плотников, А. Л. Исследование физической природы связи ЭДС естественной термодомы с режущими свойствами твердосплавных инструментов и использование

величины термоЭДС для управления процессом резания : автореф. дис. канд. техн. наук / Плотников А. Л.. – Тбилиси, 1982. – 20 с.

4. Свид. о гос. регистрации № 2009615674 от 12.10.2009 РФ. Оптимизация режимов резания трех стадий токарной обработки : программа для ЭВМ / Е. М. Фролов, А. Л. Плотников ; ВолгГТУ. – 2009.

5. Фролов, Е. М. Повышение надежности определения режимов резания в САПР ТП механической обработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Фролов Е. М. – Волгоград, 2009. – 17 с.

6. Фролов, Е. М. Адаптация метода управления режимами резания к промышленным условиям / Е. М. Фролов, Э. А. Корзун, Ж. С. Тихонова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (212) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 53–55.

7. Фролов, Е. М. Зависимость для автоматизированного определения скорости резания в условиях черного точения / Е. М. Фролов, А. Л. Плотников // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 7). – С. 53–55.

УДК 621.923.7

О. В. Бурлаченко¹, М. Н. Киселева²

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРИТОВ ПРИ ДОВОДКЕ

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Волгоградский государственный технический университет,
Себряковский филиал

E-mail: kiseleva-marina_@mail.ru

Показана возможность повышения интегральных характеристик качества ферритов в процессах их механической и физико-технической обработки.

Ключевые слова: доводка, алмазные микропорошки, полирующая способность, качество обрабатываемой поверхности, показатель хрупкости.

O. V. Burlachenko¹, M. N. Kiseleva²

ENSURING THE QUALITY OF THE SURFACE OF THE FERRITES WITH FINISHING

¹ Volgograd state technical University

² Volgograd state technical University, Sebryakovsky branch

The possibility of improving the integral characteristics of the quality of ferrites in the process of their mechanical and physical-technical processing is shown.

Keywords: finishing, diamond micropowders, polishing ability, quality of the treated surface, brittleness index.

Постоянные магниты являются неотъемлемым элементом многих магнитоэлектрических машин, аппаратов и приборов, выпускаемых электротехнической, радиотехнической, приборостроительной и другими отраслями промышленности.

Особенностью магнитомягких ферритов является их высокая твердость, хрупкость, низкая механическая прочность, склонность к сколам и трещинам. При получении материалов с заданными магнитными свойствами предъявляют-

ся более жесткие требования к исходному сырью в отношении его химической чистоты, степени дисперсности и химической активности.

Механическая обработка ферритов весьма затруднительна. Исключить же механическую обработку из процесса изготовления деталей из ферритов невозможно по причине значительной усадки изделий после термообработки. В результате геометрические отклонения по форме и размерам ферритовых деталей приводит к появлению зазоров в готовых изделиях и, как след-

ствие, значительному ухудшению магнитных свойств. Полирование является дополнительной технологической операцией, позволяющей повысить качество поверхности ферритов.

В процессах доводки большое влияние на качество полированной поверхности оказывает однородность состава серийно выпускаемых алмазных микропорошков. Однако, как правило, они содержат значительную долю разно-размерных частиц, что отрицательно сказывается на конечных результатах процесса обработки.

Наличие от 3 до 10 % крупных частиц, превышающих размер основной фракции в 1,5–2,0 раза, обуславливает возникновение микроцарапин на полируемых поверхностях, что недопустимо для ферритов и приводит к их отбраковке. Большое же количество мелких частиц (> 10 %) приводит к появлению на обрабатываемой поверхности характерного микро-рельефа в виде ряби и значительному снижению производительности обработки.

Для исключения крупных и мелких частиц авторы использовали экспериментальные порошки производства Института сверхтвердых материалов Украинской академии наук из синтетических алмазов, разделенных с помощью мембранных фильтров на отдельные фракции, из которых затем изготавливались алмазные пасты [1]. Их полирующую способность оценивали методом регистрации рассеянного светового потока, отраженного от полированной поверхности, через равные промежутки времени. Наилучшей полирующей способностью, в сравнении с серийными пастами, обладают порошки, не имеющие в своем составе крупных и мелких частиц. При этом, допустимая шероховатость $R_a = 0,06 \dots 0,08$ мкм обеспечивается за время обработки 25 минут алмазными пастами зернистостей M14/7 (рис. 1).

Таким образом, варьируя зерновой состав, можно достичь оптимального съема припуска и обеспечить качество обработанной поверхности.

Наряду со степенью полированности ферритов, большое влияние на электрофизические характеристики поверхности оказывает их склонность к хрупкому разрушению при финишной обработке, что в значительной степени предопределяется в процессах физико-технической обработки изделий, в частности, при горячем прессовании заготовок.

При этом, для автоматизированного контроля качества ферритов наиболее целесообразно использовать микромеханические методы

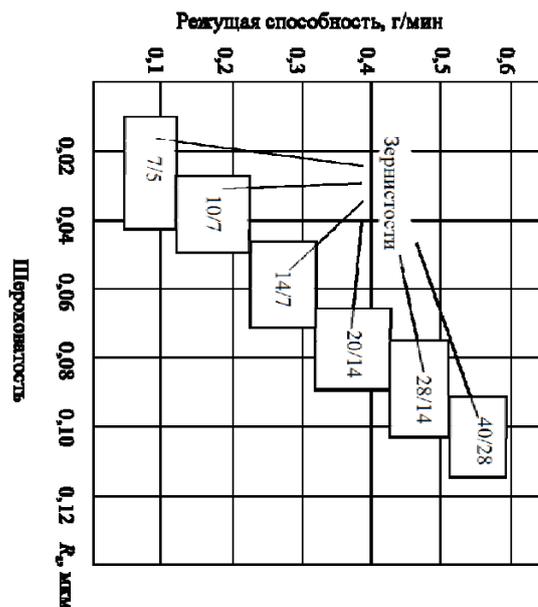


Рис. 1. Диаграмма для оценки параметров шероховатости ферритов при обработке в зависимости от зернистости и режущей способности алмазных микропорошков

испытаний, например, по диаграмме микровдавливания. Она позволяет определить энергетический вклад обратимого упругого и остаточного микропластического деформирования, связанного с генерированием и перемещением дислокаций и тепловой диссипацией введенной в материал энергии, и таким образом оценить его склонность к хрупкому разрушению. В соответствии с современной теорией разрушения энергия упругой деформации, введенная в материал, при определенных условиях релаксирует путем зарождения и развития трещин. Напротив, энергия, затраченная на остаточную микропластическую деформацию, подвергаясь диссипации, тормозит развитие хрупких трещин. Процессы микропластической деформации, протекающие в окрестностях трещин, снижают хрупкость и повышают вязкость разрушения материала [2]. Поэтому отношение площадей диаграммы микровдавливания A_y и $A_{пл}$, соответствующих затратам энергии на упругое и пластическое деформирование при микровдавливании χ , может рассматриваться как безразмерный фактор хрупкости.

Применяя критерий меры хрупкости χ (коэффициент вариации 0,05), проведены эксперименты по технологическому совершенствованию качества ферритов. Установлено, что как для поликристаллов горячепрессованных образцов, так и для монокристаллов, величина χ в значительной степени зависит от параметров технологии их изготовления (рис. 2).

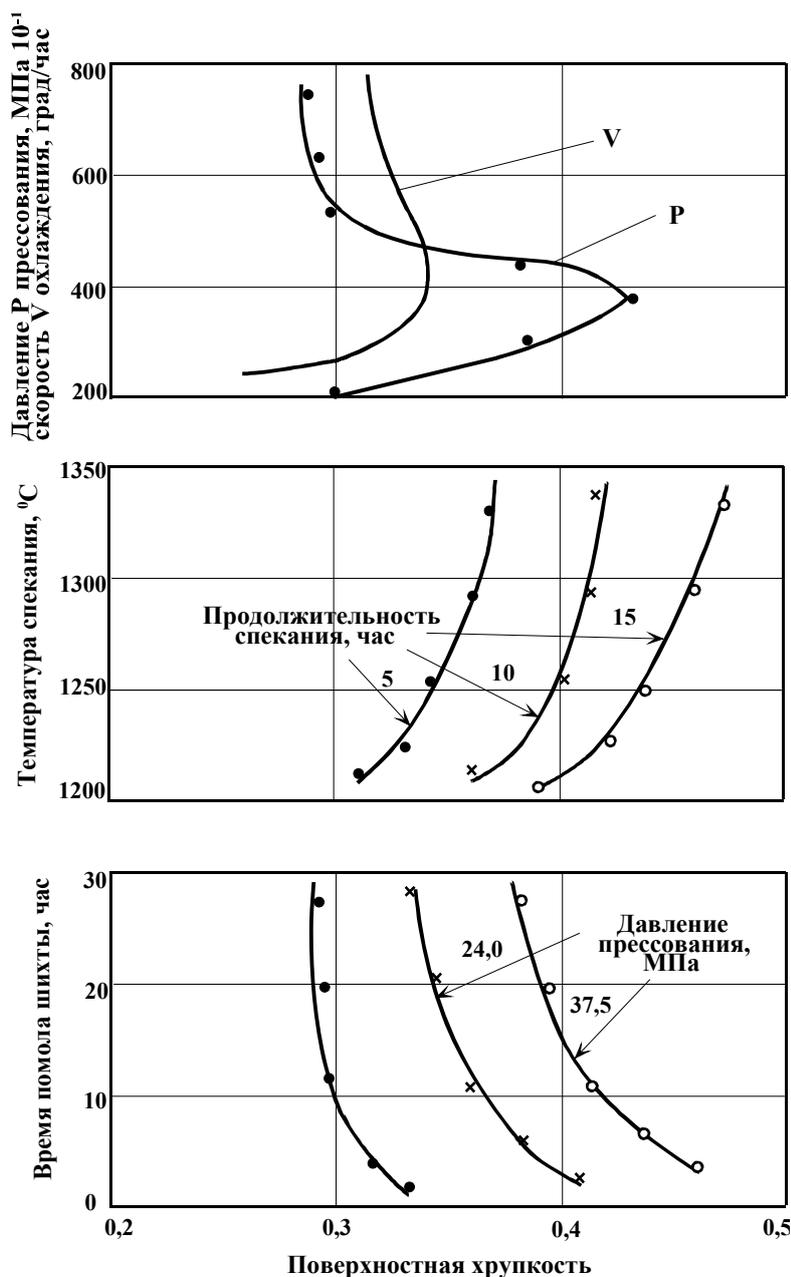


Рис. 2. Зависимость поверхностной хрупкости горячепрессованных ферритов от технологических факторов

При изменении давления прессования и скорости охлаждения горячепрессованных ферритов в пределах, соответственно, 20–80 МПа и 200–780 град/ч, их поверхностная хрупкость возрастает, а затем падает. Минимальное значение χ достигается при параметрах 75 МПа и 280 град/ч. Продолжительность и температура спекания, а также время помола шихты также оказывает влияние на показатель хрупкости ферритов. Минимальное значение χ достигается при продолжительности спекания

5 ч, температуре спекания 1330 °С и времени помола шихты 27 ч [2].

Таким образом, показана возможность применения узкоклассифицированных алмазных порошков, не имеющих в своем составе крупных и мелких частиц, с целью достижения рационального съема припуска при доводке ферритов и обеспечить качество обработки по критериям степени полированности и поверхностной хрупкости ферритов. В результате проведенных исследований установлено, что

количество микроцарапин и микротрещин в поверхностных объемах ферритовых деталей уменьшилось в 3 раза, тем самым показана возможность повышения интегральных характеристик качества ферритов в процессах их механической и физико-технической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Киселева, М. Н.* Хрупкие свойства и обрабатываемость ферритовых материалов при доводочных операциях / М. Н. Киселева, О. В. Бурлаченко // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009 : сб. ст. Международной науч.-техн. конф. ; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т ; ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. – С. 17–19.
2. *Бурлаченко, О. В.* Повышение качества горячепрессованных марганец-цинковых ферритов по критерию их поверхностной хрупкости / О. В. Бурлаченко, М. Н. Киселева // Инженерные проблемы современного материаловедения : сб. науч. тр. – Волжский : ВИСТех, 2009. – С. 114–119.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.867.8

А. В. Ваганов, А. Е. Жупииков, Д. В. Сотников, А. М. Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДЕРЖАНИЯ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМЫХ ГИБКИХ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ВАКУУМНЫМИ ЗАХВАТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ*

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведено исследование процесса автоматического захвата и удержания гибких контейнеров из воздухопроницаемых материалов с помощью вакуума для их последующего открытия и наполнения сыпучим материалом. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования влияния количества вакуумных захватов на вероятность захвата и удержания гибкого контейнера. Экспериментально определена степень вакуума, необходимая для надежного удержания пустого гибкого контейнера из полипропилена. Полученные результаты подтверждают возможность использования вакуумных захватных устройств для автоматического манипулирования гибким контейнером из воздухопроницаемых материалов при его наполнении сыпучими продуктами.

Ключевые слова: вакуумный захват; гибкий контейнер; воздухопроницаемый; расфасовка; сыпучий материал.

A. V. Vaganov, A. E. Zhupikov, D. V. Sotnikov, A. M. Makarov

RESEARCH OF THE PROCESS OF HOLDING AIR-PERMEABLE FLEXIBLE CONTAINERS FOR FREE-FLOWING MATERIALS BY VACUUM CAPTURING DEVICES

Volgograd State Technical University

The process of automatic capture and retention of flexible containers from air-permeable materials with the help of a vacuum for their subsequent opening and filling with bulk material was carried out. An experimental setup for investigating the influence of the number of vacuum grippers on the probability of capture and retention of a flexible container was developed and fabricated. Experimentally indicated degree of vacuum, necessary to reliably hold an empty flexible container of polypropylene. The obtained results confirm the possibility of using vacuum gripping devices for automatic manipulation of a flexible container of air-permeable materials while filling it with bulk products.

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

Keywords: vacuum gripper, flexible container, air-permeable, prepackage, free-flowing material.

В настоящее время одной из важнейших с точки зрения повышения эффективности расфасовочного производства является задача автоматического манипулирования расфасовочной тарой. Если такой тарой являются воздухопроницаемые гибкие контейнеры (ГК) для сыпучих материалов (СМ), то задача включает в себя следующий комплекс операций: захват ГК из стопы, его открытие и удержание при наполнении, передача наполненного ГК на конвейер для его транспорти-

ровки в зону закупоривания (прошивки, проклейки и т. д.). Одним из важных является процесс надежного удержания закрытого или открытого гибкого контейнера на позиции наполнения.

Для решения этой задачи могут использоваться различные захватные устройства, в том числе вакуумные захватные устройства (ВЗУ), описание конструкций которых, результаты математического и компьютерного моделирования их работы представлены в [1–9].

© Ваганов А. В., Жупииков А. Е., Сотников Д. В., Макаров А. М., 2018

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

Устройство [7–8] позволяет осуществлять полный цикл операций по манипулированию гибким контейнером при расфасовке СМ в автоматическом режиме с помощью двух вакуумных захватных устройств.

Для экспериментального исследования данного устройства разработана и изготовлена экспериментальная установка (структурная схема представлена на рис. 1, а внешний вид с захваченным и удерживаемым гибким контейнером на рис. 2), позволяющая исследовать вероятность захвата и удержания гибкого контейнера из воздухопроницаемого материала (полипропиленовой нити) в вертикальном положении при разном количестве вакуумных захватных устройств и различной степени вакуума.

Система управления установкой построена на программируемом логическом контроллере (ПЛК) *FX-3U* и средствах автоматизации компании *Mitsubishi Electric* и пневматических средствах автоматизации компании *Camozzi*. Для автоматизации проведения эксперимента и обработки результатов используется микроконтроллер *Arduino UNO*, связанный с ПЛК через плату согласования на базе транзисторной логики, преобразующей сигналы с выходов микроконтроллера 5В в сигналы напряжением 24В, подаваемые на ПЛК, который управляет электрическими пневмораспределителями, один из которых воздействует на пневмоцилиндр, перемещающий вакуумный захват, а второй подключает или отключает ВЗУ от источника вакуума.

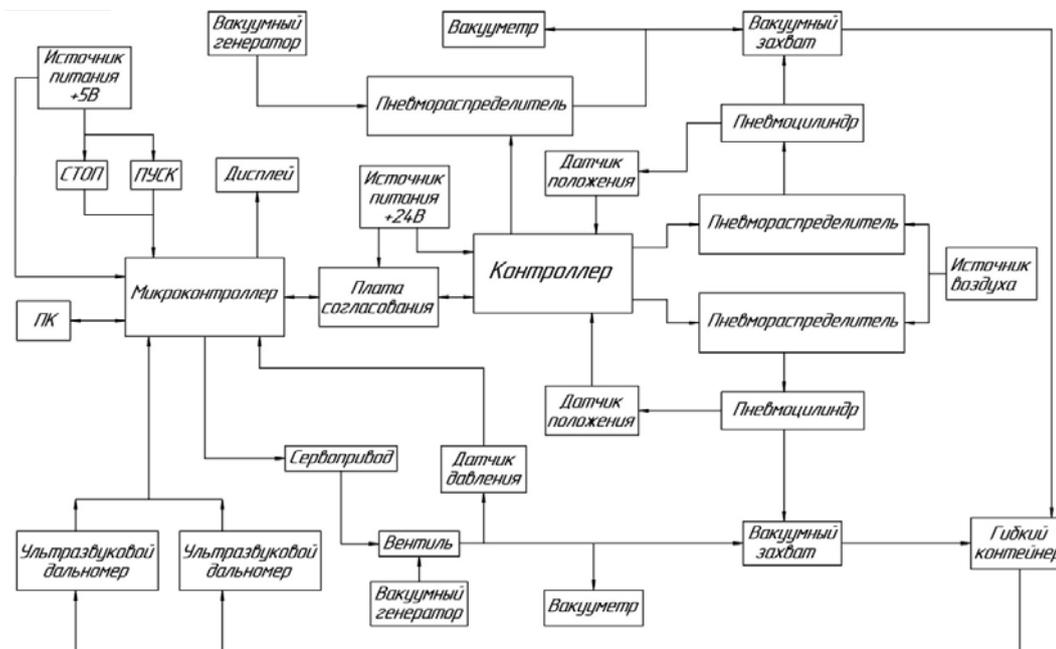


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

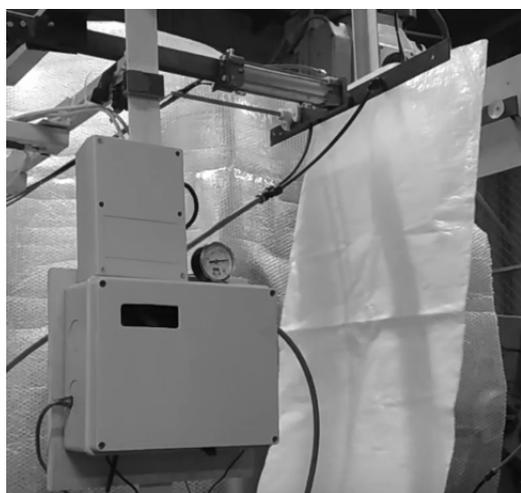


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Экспериментальная установка также содержит второе ВЗУ, работающее по тому же принципу, но оно не использовалось в данном эксперименте.

Ультразвуковой датчик, определяющий расстояние до гибкого контейнера, позволяет судить об успешном или неуспешном его захвате и удержании. Вакуумная машина создает требуемый вакуум, степень которого измеряется датчиком давления, связанным с микроконтроллером, и отображается на вакуумметре для визуального контроля. Степень вакуума регулируется сервоприводом, осуществляющим поворот дроссельного регулирующего органа на заданный угол. На дисплей выводится информация о текущем уровне вакуума, общем коли-

честве проведенных экспериментов и количестве удачных из них. Информация с микроконтроллера передается на персональный компьютер через порт *USB* (виртуальный *COM*-порт).

В микроконтроллер загружена программа, позволяющая выполнять серии экспериментов по 100 опытов для различной степени вакуума в автоматическом режиме. После запуска программы нажатием кнопки “Пуск” микроконтроллер с определенной периодичностью подает сигналы, которые через плату согласования поступают на ПЛК, и пневмораспределитель управляет возвратно-поступательным движением штока пневмоцилиндра с закрепленным на нем ВЗУ. Факт удачного захвата и удержания гибкого контейнера фиксируется ультразвуковыми датчиками расстояния и выводится

на дисплей. После проведения серии из 100 опытов сервопривод воздействует на регулирующий орган, увеличивая степень вакуума, и серия опытов повторяется.

Если после окончания серии опытов вероятность захвата составит 100% (все удачные захваты), эксперимент прекращается. При этом результаты опытов передаются на компьютер для последующей их обработки в *Microsoft Excel*.

Были проведены экспериментальные исследования для вакуумных устройств, содержащих 2, 3, 4 и 5 вакуумных захватов диаметром 50 мм.

В таблице представлены обработанные результаты эксперимента, при этом в каждой ячейке указано давление (кПа) и вероятность удержания ГК в процентах.

Результаты эксперимента по захвату и удержанию ГК в вертикальном положении

2 ЗУ		3 ЗУ		4 ЗУ	5 ЗУ
01010	10001	10101	01110	11011	11111
-10 (100%)	-10 (25%)	-10 (0%)	-10 (75%)	-10 (25%)	-10 (25%)
	-12 (50%)	-12 (0%)	-12 (100%)	-12 (50%)	-12 (50%)
	-14 (50%)	-14 (0%)		-14 (75%)	-14 (50%)
	-16 (50%)	-16 (25%)		-16 (100%)	-16 (50%)
	-18 (50%)	-18 (25%)			-18 (75%)
	-20 (50%)	-20 (25%)			-20 (75%)
	-22 (75%)	-22 (50%)			-22 (100%)
	-24 (100%)	-24 (75%)			
		-26 (100%)			

Примечание: символ 0 – ЗУ не подключено, символ 1 – подключено.

По обработанным данным, полученным в ходе эксперимента, построены графики зависимости вероятности захвата ГК от степени вакуума, создаваемого в вакуумных захватных

устройствах с учетом количества вакуумных захватов. Результаты эксперимента для захватного устройства при захвате и удержании ГК с 2, 3, 4 и 5 ЗУ диаметром 50 мм представлены на рис. 3.

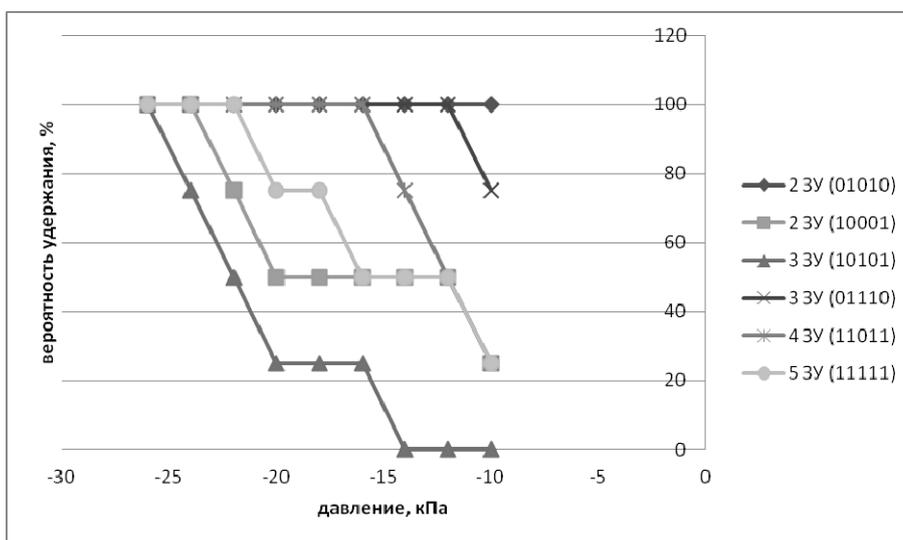


Рис. 3. Результаты экспериментов с 2, 3, 4 и 5 вакуумными захватами диаметром 50 мм

Наименьший вакуум, требуемый для надежного удержания гибкого контейнера, реализуется при двух и трех ЗУ, при условии, что ЗУ должны находиться как можно ближе к центру горловины ГК.

При двух ЗУ, расположенных по схеме $\textcircled{0} \textcircled{1} \textcircled{0} \textcircled{1} \textcircled{0}$, надежное удержание ГК осуществляется уже при -10 кПа.

При трех ЗУ, расположенных по схеме $\textcircled{0} \textcircled{1} \textcircled{1} \textcircled{1} \textcircled{0}$, надежное удержание ГК осуществляется при -12 кПа.

Таким образом, для воздухопроницаемых полипропиленовых ГК вероятность их надежного захвата и удержания увеличивается при уменьшении количества вакуумных захватов (если они расположены ближе к центру горловины закрытого контейнера), при этом надежный захват и удержание ГК в вертикальном положении осуществляются с меньшей степенью вакуума.

Полученные результаты подтверждают возможность использования вакуумных захватных устройств для автоматического манипулирования гибким контейнером из воздухопроницаемых материалов при его наполнении сыпучими продуктами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование процесса автоматического захвата воздухопроницаемых гибких контейнеров с помощью вакуума при расфасовке сыпучих материалов [Электронный ресурс] / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, О. В. Мушкин, М. А. Лапиков // Пром-Инжиниринг : тр. III междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург – г. Челябинск – г. Новочеркасск – г. Владивосток, 16-19 мая 2017 г.) / отв. ред.: А.А. Радионов ; ФГАОУ ВО ЮрГУ. – Челябинск, 2017. – С. 212–217. – Режим доступа : <http://icie-rus.org/issues/ICIE-2017RU.pdf>.
2. 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.
3. Макаров, А. М. Исследование устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, А. С. Сергеев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 114–117.
4. Макаров, А. М. Автоматизация процесса наполнения мягкой расфасовочной тары сыпучим материалом / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев // Современные проблемы науки и образования, 2011. – № 6; Режим доступа : www.science-education.ru/100-5113
5. Макаров, А. М. Автоматизация наполнения гибких контейнеров сыпучими продуктами / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, Е. Г. Крылов // СТИН, 2014. – № 4. – С. 37–40.
6. Математическое и компьютерное моделирование автоматического захвата гибкого контейнера с помощью вакуума / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, О. В. Мушкин, М. А. Лапиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 14 (193) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 63–66.
7. П. м. 155000 РФ, МПК В65В5/00, В65В7/02. Устройство для автоматического раскрытия, удержания и закрытия гибких контейнеров / А. М. Макаров, М. Г. Кристаль, А. А. Ковалев, Д. А. Сулейманов ; ВолгГТУ. – 2015.
8. Разработка устройства для автоматического раскрытия, удержания и закрытия гибких контейнеров с помощью вакуумных захватов / А. А. Ковалев, А. М. Макаров, М. Г. Кристаль, М. А. Лапиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 53–56.
9. Modelling and research of automated devices for handling of flexible containers during filling with free-flowing products [Электронный ресурс] / А.М. Makarov, Yu.P. Serdobintsev, O.V. Mushkin, M.A. Lapikov // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (St. Petersburg, Russia, 24-26 May 2017) : Conference Proceedings / ed. by S. Shaposhnikov. – [Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)], 2017. – P. 281-283. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970561.

УДК 681.51.621.65.02

Д. П. Гаврилов, В. Г. Барabanов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Проведен анализ методов и средств обеспечения информационной безопасности в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП). Рассмотрены виды несанкционированных воздействий на промышленные сети. Подобраны современные средства обеспечения информационной безопасности для внедрения новой системы автоматизации на производство.

Ключевые слова: информационная безопасность, промышленные сети, коммутатор, интерфейс, протокол.

D. P. Gavrilov, V. G. Barabanov

ENSURING INFORMATION SECURITY IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Volgograd State Technical University

The analysis of methods and means of information security in automated process control systems (APCS). The types of unauthorized impacts on industrial networks are considered. The modern means of information security provision for the introduction of a new automation system for production are selected.

Keywords: information security, industrial networks, switchboard, interface, protocol.

Современные системы АСУ ТП имеют множество уязвимых мест, которые необходимо принимать во внимание. Рассмотрим специфику систем информационной безопасности в АСУ ТП.

Промышленные решения должны быть не обслуживаемыми, устанавливаться один раз; обновление ПО, плановые перезагрузки и прочие сервисные действия не должны быть предусмотрены [1]. Промышленные системы работают круглые сутки без перерыва и должны обеспечивать безотказную работу. Квалификация обслуживающего персонала в области информационных технологий не всегда достаточна для правильной настройки и обслуживания сетевого оборудования [2].

Обеспечение информационной безопасности в АСУТП является актуальной задачей для современных промышленных предприятий. На крупных заводах недопустимы отказы оборудования, связанные с несанкционированными подключениями к сети предприятия сторонних лиц.

Правильный подбор и конфигурация сетевого оборудования позволяет повысить информационную безопасность предприятия. Немаловажной особенностью защиты сети АСУ ТП является возможность установки оборудования защиты в существующую сеть без изменения ее архитектуры [3].

Так для насосной станции МУП «Городской водоканал г. Волгограда» было подобрано и внедрено в эксплуатацию комплект сетевого

оборудования компании Phoenix Contact: маршрутизаторы mGuard и промышленные коммутаторы FL SWITCH SMCS.

Рассмотрим угрозы в промышленных сетях, источники их возникновения и возможные последствия. Промышленные Ethernet сети используются на всех уровнях АСУ ТП: как на уровне связи систем управления между собой (средний уровень), на уровне коммуникации со СКАДА-системами (верхний уровень), так и на уровне распределенной автоматизации (нижний уровень). Сеть любого уровня может нести в себе угрозу безопасности технологического процесса. Поэтому необходимо обеспечивать защиту на всех уровнях АСУ ТП [4].

К основным угрозам сетевой безопасности относятся:

- сетевой шторм — лавинообразный рост широко вещательного или многоадресного трафика;
- DDoS-атака — бомбардировка отдельных устройств сети большим количеством ICMP-пакетов (например, ping) или подключение к устройству с большой частотой в малый промежуток времени [5];
- неавторизованный доступ к контроллеру и сети управления – возможность передачи команд управления и доступ к программированию или параметрированию контроллера;
- защита удаленного доступа к системе через сети с низким уровнем доверия, например через сеть Internet.



Рассмотрим способы защиты системы автоматизации от неавторизованного доступа. Необходимо разделить сети верхнего, среднего и нижнего уровней межсетевыми экранами (представлен на рисунке). Также для обеспечения максимальной информационной безопасности межсетевой экран следует установить на Ethernet-интерфейсы управляющего контроллера. Таким образом, мы ограничиваем доступ к локальным системам управления из внешних сетей и защищаем контроллер [6, 7]. Для получения доступа к данным системы, передачи команд или программированию системы в межсетевом экране настраиваются на правила доступа.

Рассмотренное современное оборудование позволяет обеспечить информационную безопасность для крупной насосной станции МУП «Городской водоканал г. Волгограда».

Информационная безопасность АСУ ТП – это новая и перспективная тенденция в современных системах автоматизации. Внедрение систем защиты – это инвестирование в безопасность людей, экологию и защиту от финансовых потерь из-за сбоев в работе сетевой инфраструктуры или неавторизованного доступа к системам управления [8].

УДК 621.31

П. В. Дикарев, А. М. Макаров, И. В. Волков, А. А. Яковлев
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
МОБИЛЬНОЙ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

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

Разработано устройство, в котором для получения тепловой энергии используется побочная энергия, вырабатываемая при получении электроэнергии, а вырабатываемая электроэнергия с помощью адаптивной системы управления перераспределяется на дополнительный нагрев воды при отсутствии необходимости ее использования внешними потребителями. Для экспериментального исследования разработанного устройства спроектирован и изготовлен опытный образец, состоящий из бензинового электрогенератора, теплообменника, ТЭНа, насосов, а также системы управления на базе микроконтроллера и датчиков. Произведена предварительная оценка работоспособности разработанной установки, а также исследовано влияние различных факторов на эффективность нагрева воды.

Ключевые слова: когенерация, мобильная установка, нагрев воды, тепловая энергия, регулирование, водоснабжение, электроснабжение, микроконтроллер.

P. V. Dikarev, A. M. Makarov, I. V. Volkov, A. A. Yakovlev
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AUTOMATED
MOBILE COGENERATION DEVICE
Volgograd State Technical University

A device has been developed where the collateral energy, which is developed when receiving electric power, is used for obtaining thermal energy, with the electric power produced being redistributed for additional water heating by means of an adaptive control system in the absence of need for the use thereof by external consumers. A prototype is designed and made for the pilot study of the device developed, which consists of a gasoline electric generator, a heat exchanger, a TEH (thermal electric heater), and pumps, as well as a control system on the basis of a microcontroller and sensors. The forward estimate of the operability of the plant developed has been carried out and also the influence of various factors on the efficiency of water heating has been investigated.

Keywords: cogeneration, mobile device, heating water, thermal energy, regulation, water-supply, power-supply, microcontroller.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабаш, А. В.* Информационная безопасность. Лабораторный практикум : учеб. пособие / А. В. Бабаш, Е. К. Баранова, Ю. Н. Мельников. – М. : КноРус, 2013. – 136 с.
2. *Гафнер, В. В.* Информационная безопасность : учеб. пособие / В. В. Гафнер. – Рн/Д : Феникс, 2010. – 324 с.
3. *Петров, С. В.* Информационная безопасность : учеб. пособие / С. В. Петров, И. П. Слинькова, В. В. Гафнер. – М. : АРТА, 2012. – 296 с.
4. *Семенов, В. А.* Информационная безопасность : учеб. пособие / В. А. Семенов. – М. : МГИУ, 2010. – 277 с.
5. *Шаньгин, В. Ф.* Информационная безопасность компьютерных систем и сетей : учеб. пособие / В. Ф. Шаньгин. – М. : ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 416 с.
6. *Барabanov, В. Г.* Использование программного комплекса CoDeSys для разработки системы автоматического управления насосной установкой с применением преобразователя частоты / В. Г. Барabanov, Д. П. Гаврилов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 103–105.
7. *Гаврилов, Д. П.* Разработка системы управления криогенным насосным агрегатом / Д. П. Гаврилов, В. Г. Барabanov // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 (207) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 51–53.
8. *Гаврилов, Д. П.* Разработка и исследование системы управления насосной установкой / Д. П. Гаврилов, В. Г. Барabanov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 11–19.

Введение

В настоящее время существует множество способов нагрева воды и передачи ее потребителю. Наибольшее распространение получили автоматические системы горячего водоснабжения, когенерационные установки, автономные газовые, бензиновые, дизельные и электрические нагреватели, а также системы, в которых используется нагревание паром. Большинство из этих устройств невозможно использовать нестационарно. Для получения теплоэнергии в нестационарных условиях можно применить принцип когенерации. Когенерационные установки позволяют использовать в качестве источника дополнительной энергии совокупную тепловую энергию двигателя внутреннего сгорания (ДВС) автомобиля или электростанции с возможностью получать электроэнергию [1].

Когенерация – это объединенный процесс производства электрической и тепловой энергии внутри одного устройства – когенерационной установки (КУ). Тепловая энергия вырабатывается за счет использования тепловых потерь (использование тепла охлаждающей жидкости, смазочного масла, сжатой газовой

смеси и выхлопных угарных газов) первичного приводного двигателя [2].

Сейчас у бензиновых когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания коэффициент использования теплоты сгорания топлива составляет около 87 % и только 13 % теплоты теряется при производстве. По сравнению с отдельной генерацией того же количества электрической и тепловой энергии, экономия топлива в когенерационных установках достигает 40 % [3].

Для практического использования принципа когенерации для нестационарного получения и использования тепловой и электрической энергии разработана и исследована автоматизированная мобильная когенерационная установка [4, 5].

Материалы и методы исследования

Мобильная когенерационная энергоустановка [4] содержит преобразователь прямого цикла – двигатель 1 с электрогенератором 2 на одном валу, теплообменник-утилизатор 3 тепла отработанных газов двигателя, вязанный с двигателем 1 магистралью отработанных газов 4 (рис. 1).

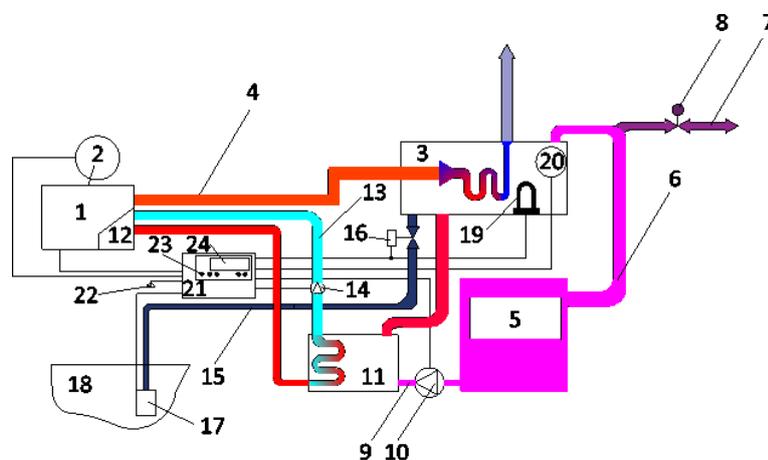


Рис. 1. Функциональная схема мобильной когенерационной установки

Система внешнего теплоснабжения 5 с потребителями тепла, выполненная, например, в виде радиатора или дополнительного накопителя воды связана с теплообменником-утилизатором 3 линией подачи горячей воды 6 с дополнительной линией 7 с вентилем 8 для непосредственной подачи горячей воды потребителю, а также линией охлажденной воды 9 с циркуляционным насосом 10, которая проходит через теплообменник-охладитель 11, связанный с рубашкой охлаждения двигателя 12 магистралью охлаждающей жидкости 13 с дополнитель-

ным циркуляционным насосом 14. Линия подачи холодной воды 15 с регулирующим клапаном 16 связывает теплообменник-утилизатор 3 с насосом 17, установленном в водоеме или накопителе холодной воды 18. Внутри теплообменника-утилизатора 3 установлен электрический нагревательный элемент 19 и датчик температуры 20, связанные с микропроцессорным блоком управления 21, с которым также связаны электрогенератор 2, циркуляционный насос 10, дополнительный циркуляционный насос 14, регулирующий клапан 16, насос 17, электриче-

ский нагревательный элемент 19 и розетка 22. Микропроцессорный блок управления 21 также содержит устройство ввода информации

Для оценки работоспособности разработанной конструкции и влияния различных факторов на эффективность нагрева воды разработана экспериментальная установка (рис. 2). Она включает

бензиновую электростанцию 1 *Huter HT1000L*, пластинчатый теплообменник 2 из нержавеющей стали, блок управления 3 на базе микроконтроллера, емкость с водой 4, нагревательный элемент (ТЭН) 5 с регулируемой мощностью, насос циркуляционный 6 *U119*, датчики расхода воды 7 *OF201*, датчики температуры 8 *DS18B20*.

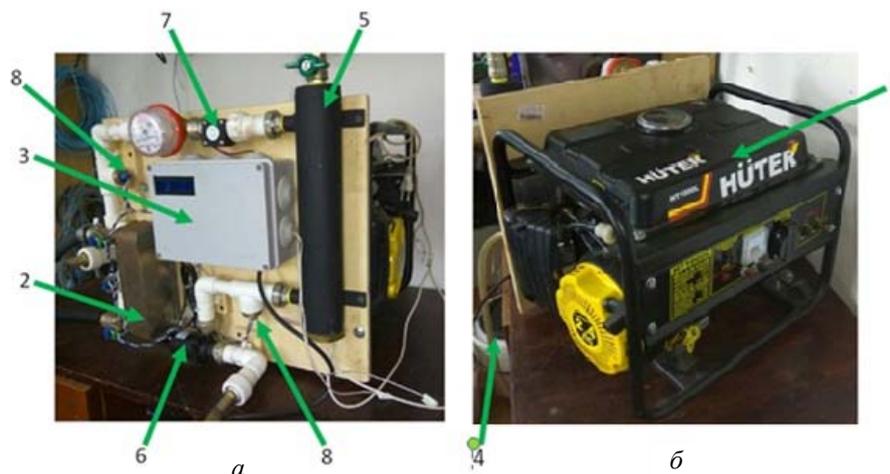


Рис. 2. Экспериментальная установка:
а – вид спереди; б – вид сзади

Система способна вырабатывать тепловую энергию для нагрева воды и электрическую энергию мощностью до 1000 Вт, которая может использоваться как в качестве дополнительного источника тепловой энергии (для повышения общего КПД системы), так и для нужд потребителей.

Результаты и их обсуждение

Для оценки работоспособности разработанного устройства были проведены серии опытов по нагреву воды. Средний расход топлива (бензина) при этом составил около 0,4 л/ч.

По результатам эксперимента построены зависимости температуры на выходе теплообменника (вода, подаваемая потребителю) от времени (рис. 3).

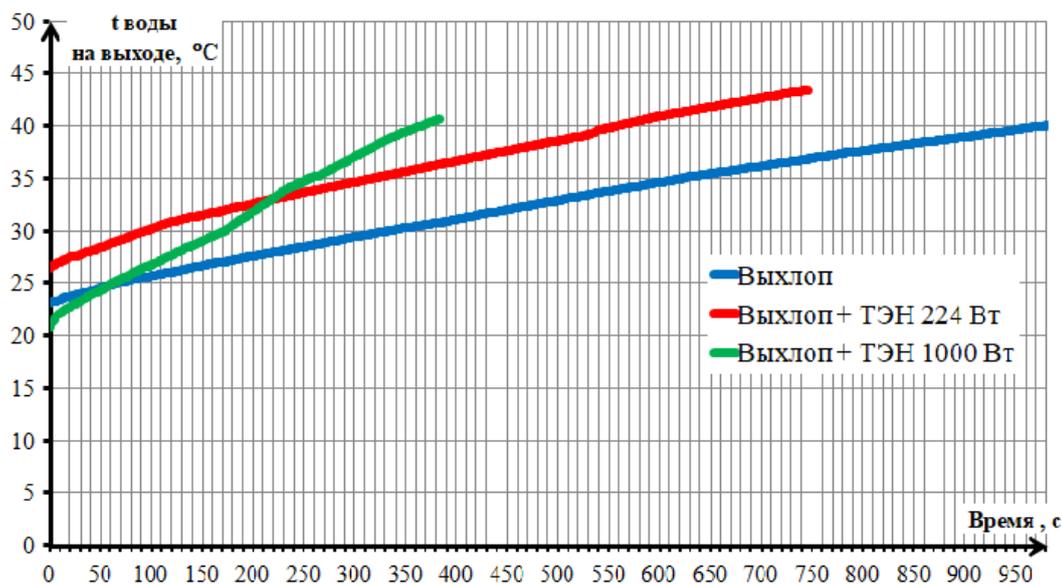


Рис. 3. Графики зависимости температуры воды на выходе теплообменника от времени

Результаты эксперимента показали, что при нагреве воды от 20 до 40 градусов Цельсия время нагрева составило:

- при нагреве только выхлопными газами (синий график) – 16 мин;
- при нагреве с ТЭНом 224 Вт (красный график) – 10 мин;
- при нагреве с ТЭНом 1000 Вт (зеленый график) – 6 мин.

Таким образом, время нагрева при введении дополнительного источника тепла, такого как ТЭН мощностью 1000 Вт, уменьшилось в 2,67 раза.

Выводы

Для более эффективного получения тепловой и электрической энергии в нестационарных условиях разработана конструкция мобильной когенерационной установки, которая позволяет повысить коэффициент полезного действия получения тепловой энергии, так как для этой цели кроме энергии отработанных газов и охлаждающей жидкости используются излишки вырабатываемой электрической энергии. При этом управление установкой осуществляется от микропроцессорного блока управления, это позволяет задавать различные режимы работы установки в зависимости от вида и объема потребляемой энергии и эффективно контролировать их, управляя установкой в автоматическом режиме. Все это повышает КПД и эффективность установки в целом.

Кроме того, установка может быть выполнена достаточно компактной и оборудована дополнительной линией для непрерывной подачи горячей и холодной воды потребителю. Это повысит универсальность установки и позволит

использовать ее в виде дополнительного источника электрической и тепловой энергии (например, при перебоях в подаче энергии или при нестационарном использовании).

Разработанное компактное мобильное устройство может найти практическое применение для электроснабжения, нагрева и накопления тепловой воды, а также подачи холодной и горячей воды потребителю в «полевых» условиях благодаря своей компактности и высокой мобильности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дикарев, П. В. Разработка и исследование компактной мобильной когенерационной установки / П. В. Дикарев, А. М. Макаров, И. В. Волков // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. матер. III Поволжской науч.-практ. конф. (г. Казань, 7–8 декабря 2017 г.). В 2 т. Т. 2 / редкол.: Э. Ю. Абдуллазянов (гл. ред.) [и др.]; ФГБОУ ВО «Казанский гос. энергетический ун-т». – Казань, 2017. – С. 103–105.
2. Гольдинер, А. Я. Газопоршневые электроагрегаты / А. Я. Гольдинер, М. И. Цыркин, В. В. Бондаренко. – СПб. : Галерея Принт. 2006. – 240 с.
3. Сивухин, Д. В. Термодинамика и молекулярная физика. Том II / Д. В. Сивухин // Общий курс физики. В 5т. – 5-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
4. Мобильная когенерационная установка : п. м. № 174173 Рос. Федерация : МПК F02G 5/04 / А. М. Макаров, И. В. Волков, В. В. Лазарев, П. В. Дикарев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). – № 2017100482 № заявл. 09.01.2017 ; опубл. 05.10.2017 Бюл. № 28. – 9 с.
5. Компактная автономная когенерационная установка с микропроцессорной системой управления / П. В. Дикарев, А. М. Макаров, И. В. Волков, В. В. Лазарев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (187) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 72–74.

УДК 621.165.29

С. А. Дружинин, В. Г. Барabanов

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УТЕЧКИ В БЫТОВЫХ ГАЗОВЫХ ПРИБОРАХ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В ходе работы проведен анализ систем контроля герметичности: промышленных стационарных, промышленных переносных, а также портативных устройств, используемых для контроля герметичности и тестирования. На основе выбранного прототипа была разработана структурная схема устройства контроля герметичности, а также система управления, построенная на базе микроконтроллера.

Ключевые слова: течеискатель, газоанализатор, микроконтроллер.

S. A. Druzhinin, V. G. Barabanov

DEVELOPMENT OF DEVICE FOR CONTROLLING LEAKS IN HOUSEHOLD GAS APPLIANCES

Volgograd State Technical University

In the course of the work, the analysis of leak testing systems was carried out: industrial stationary, industrial portable, as well as portable devices used for leak testing and leak testing. On the basis of the chosen prototype, a structural diagram of the tightness control device was developed, as well as a control system based on a microcontroller.

Keywords: gas leak detector, gas detector, a microcontroller.

Контроль герметичности является неотъемлемой частью испытаний аппаратов, работающих под вакуумом или избыточным давлением.

При вводе в эксплуатацию внутридомового газового оборудования (далее по тексту ВДГО) сотрудниками ЖКХ обычно проводится контроль соединений с помощью обмыливания. Данный метод прост и удобен, однако не позволяет оценить загазованность помещения, при этом чувствительность метода составляет $7 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

Поэтому для таких работ следует использовать газоанализатор, который является универсальным средством, как для поиска течи, так и для обнаружения газа в воздухе без остановки работы оборудования. Чувствительность данного метода $10^{-7} \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$ [1].

Разрабатываемое авторами устройство кон-

троля утечки (рис. 1) обладает следующими характеристиками:

- малые габариты;
- возможность работы от батареи и сетевого адаптера;
- принудительный отбор пробы посредством встроенного микрокомпрессора;
- возможность одновременного детектирования двух основных газов, которые могут присутствовать в помещениях с ВДГО, а именно угарный газ (СО) и метан (СН₄);
- гибкость и универсальность системы управления, состоящая в том, что проектируемое устройство возможно снабдить любыми датчиками газов и, изменяя программу, получить газоанализатор, который может детектировать газы, как в бытовых помещениях, так и в производственных.

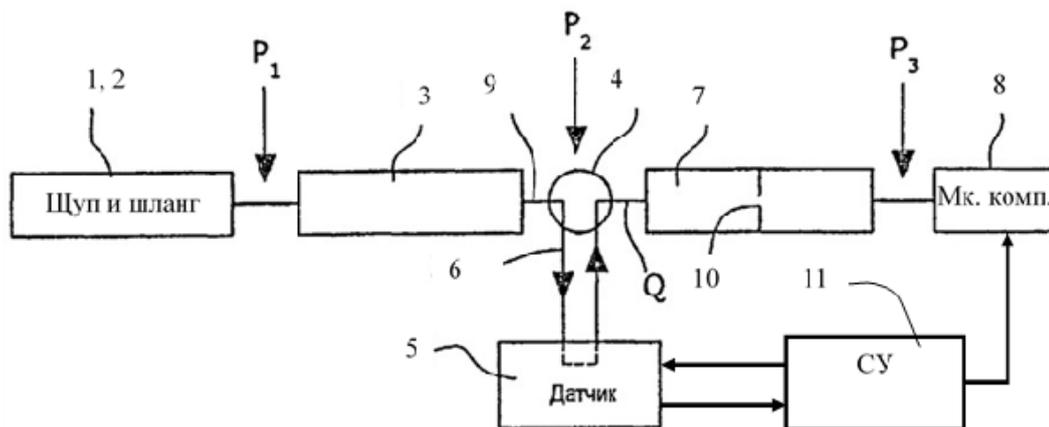


Рис. 1. Структурная схема системы

Устройство содержит щуп 1, соединенный шлангом 2 через дроссель 3 с точкой распределения 4, и датчиком тестового газа 5. К точке распределения воздух подводится посредством канала 10. От точки распределения 4 к датчику 5 тестового газа ведет канал 6. При этом дроссель 7 выполнен в виде диафрагмы с круглым отверстием 10. Проводимость диафрагмы подобрана таким образом, что падение давления на диафрагме больше $P_2 / 2$, где P_2 – промежуточное давление в точке распределения. Отбор пробы осуществляется принудительно с помощью микрокомпрессора 8 [2]. Управление устройством и сбор сигнала осуществляется системой управления 11.

Благодаря использованию дросселя с круглым отверстием получаем течеискатель, работающий методом щупа, чувствительность которого мало зависит от колебаний давления от-

качивания пробного воздуха микрокомпрессором [2].

На рисунке указаны давления: P_1 – давление при котором происходит забор пробного воздуха, P_2 – давление в точке распределения, стабилизированное с помощью дросселя с круглым сужением, P_3 – давление всасывания микрокомпрессора, Q поток (объемный расход) подаваемого воздуха. Для физической реализации устройства необходимо предусмотреть: чувствительные элементы, органы управления, дисплейный модуль, а так же внешние элементы типа щупа для подвода пробы, разъемов для подключения питания и т. п.

Структурная схема управления разрабатываемым устройством представлена на рис. 2.

Микроконтроллер в проектируемом устройстве выполняет роль управляющего устройства. Основная задача микроконтроллера – генери-

руя сигналы управления по заданной программе, открывать транзисторы, работающие в ре-

жиме ключа, которые подключают к источнику питания те или иные устройства.

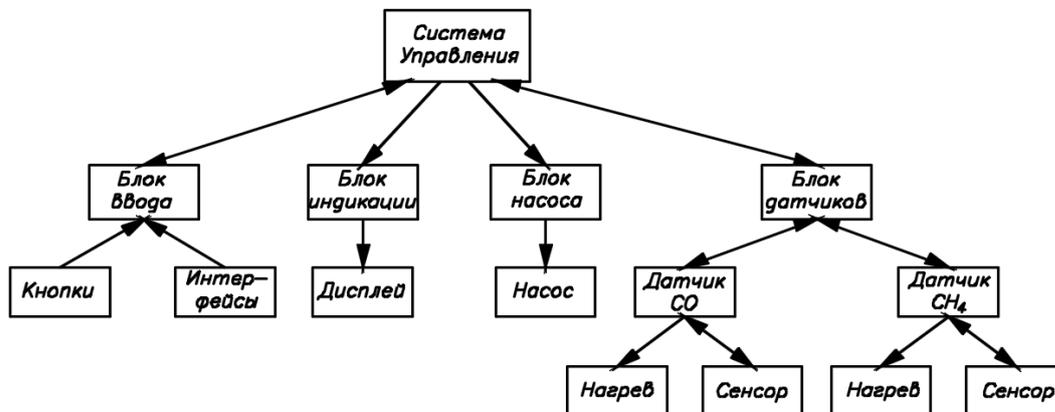


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Схема управления представлена на рис. 3 [4, 5].

При поступлении сигнала на базу транзистора VT2 он открывается, и подключает к питанию обогреватели датчиков R_{H1} и R_{H2} соответственно. Подогрев датчиков осуществляется в течении времени от 40 до 60 секунд. После подогрева датчиков, открывается транзистор VT3, подключая датчик TGS2611 к питанию, а VT2 закрывается, отключая подогреватель. Датчики изменяют свое электрическое сопротивление пропорционально концентрации измеряемых газов.

При необходимости повторного замера, цикл повторяется.

Для отображения информации используется дисплей с параллельным управлением. Дисплей позволит расширить функциональные возможности устройства, так как при его использовании возможна качественная визуализация происходящего процесса замера.

Для управления устройством используются кнопки. Для сохранения малых габаритов необходимо выбирать их наименьшего размера, однако предусмотреть то, что нажатие на них должно быть тактильно ощущаемым в теплой одежде.

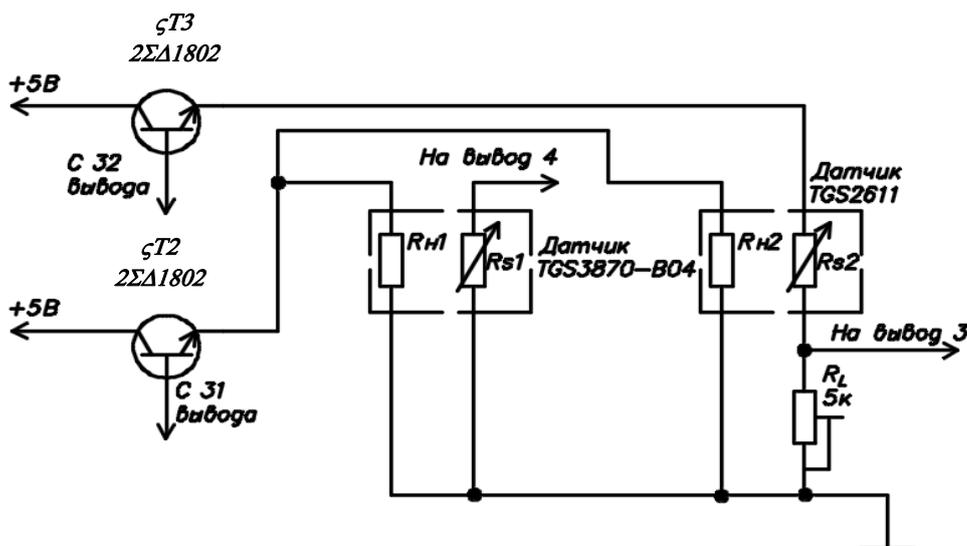


Рис. 3. Схема управления датчиками

Кнопки, подключаясь к входам микроконтроллера могут подавать высокий или низкий уровень сигнала. Так как устройство предпола-

гается простым, то нет необходимости подключать большое количество кнопок. Предлагается использовать пять кнопок, выполняющих функ-

ции: «Замер», «Отмена», «Меню», «Вверх», «Вниз», «Включить/Выключить»

У микроконтроллера задействованы не все его возможные функции, однако в дальнейшем этот потенциал можно использовать для расширения функционала устройства и улучшения его характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 24054–80. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования (с Изменением N 1)

2. Течеискатель для работы методом шупа: пат. 2523070 Рос. Федерация: МПК G01M3/04, G01M3/20 / Даниель Ветциг; заявитель и патентообладатель ИН-ФИКОН ГМБХ. –

№ 2011138067/28; ; заявл. 05.02.2010; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

3. ЧИП и ДИП Электронные компоненты и приборы [Электронный ресурс]: ЗАО «ЧИП и ДИП» – Приборы, Радиодетали и Электронные компоненты: chipdip.ru, 2018. – Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/product/at91sam7s256-au-001>

4. Сенсоры и блоки датчиков для приборов газового анализа [Электронный ресурс]: ООО «АналитТеплоКонтроль»: sensorgas.ru, 2018. – Режим доступа: <http://www.sensorgas.ru/tgs3870-b04-sensor-ugarnogo-gaza-poluprovodnikovyj.html>

5. Сенсоры и блоки датчиков для приборов газового анализа [Электронный ресурс]: ООО «АналитТеплоКонтроль»: sensorgas.ru, 2018. – Режим доступа: <http://www.sensorgas.ru/tgs2612-sensor-gorjuchih-gazov-poluprovodnikovyj.html>

УДК 62-589.2

Е. Г. Крылов, А. М. Макаров, А. А. Яковлев, Н. В. Козловцева

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ШАРИКОВИНТОВЫХ ПЕРЕДАЧ МЕХАТРОННЫХ УЗЛОВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В статье приведена методика проектирования шариковинтовых передач мехатронных узлов рабочих органов автоматизированного оборудования. Представлены базовые расчетные зависимости, на основе которых разработано программное обеспечение для автоматизированного проектирования шариковинтовых передач.

Ключевые слова: механизм точных перемещений, шариковинтовая передача, привод подачи, автоматизированное оборудование.

E. G. Krylov, A. M. Makarov, A. A. Yakovlev, N. V. Kozlovtsseva

AUTOMATION OF MECHATRONIC UNIT'S BALLSCREW DRIVE PARAMETERS CALCULATION

Volgograd State Technical University

The article describes the method of designing ball screw drives for mechatronic units of the automated equipment working bodies. Basic calculation dependencies are presented, with reference to which software for automated design of ball screw drives has been developed.

Keywords: mechanism of precise movements, ball screw drive, coordinate drive system automated equipment.

На сегодняшний день задачи повышения эффективности отечественного производства за счет разработки и внедрения инноваций решаются достаточно медленно. Одним из наиболее важных направлений целесообразного использования творческого, технического и технологического потенциала в деятельности проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих фирм является комплексная автоматизация и информатизация технической поддержки работы оборудования и специалистов.

При разработке прецизионной техники особое значение приобретают вопросы точности позиционирования исполнительных механизмов и узлов оборудования [1, 2]. Для обеспечения за-

данного уровня качества изделий и сокращения сроков подготовки технологических процессов перспективным является применение проблемно-ориентированного подхода, основу которого составляет систематизированная и формализованная информация, учитывающая требования к технологической системе, современные методы проектирования объектов и процессов, критерии выбора качественных решений и возможность формирования общей стратегии технологической подготовки производства при множестве изменяемых параметров [3, 4].

Одним из ключевых факторов, влияющих на точность автоматизированного оборудования, такого как обрабатывающие центры, про-

мышленные роботы, 3D-принтеры, является стабильная работа привода подачи, который выполняет две функции: осуществляет движение формообразования исполнительного органа в соответствии с управляющей программой, и преобразует вращательное движение вала электродвигателя в поступательное движение механизма точных перемещений.

Конечным звеном привода подачи является тяговое устройство, в качестве которого для прямолинейных перемещений применяют шариковинтовую передачу (ШВП). Передача состоит из винта 1, гайки 2, комплекта шариков 3 и устройства 4 для возврата тел качения (рис. 1). Канал, соединяющий первый и последний (или промежуточный) витки гайки, обеспечивает возможность непрерывной циркуляции тел качения.

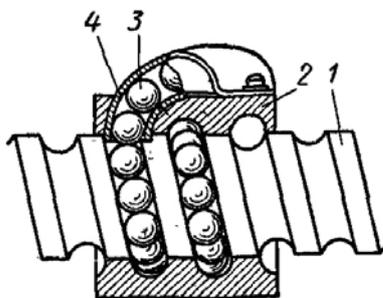


Рис. 1. Схема шариковинтовой передачи

Преимуществами ШВП являются:

- высокая точность и равномерность поступательного движения с сохранением стабильности этих параметров в процессе эксплуатации;
- высокий КПД;
- низкий коэффициент трения;
- стабильная работа в широком диапазоне температур.

В процессе эксплуатации ШВП выходит из строя в результате усталости поверхностных слоев шариков, гайки и винта, потери устойчивости винта, износа элементов, что в итоге приводит к снижению точности перемещений исполнительного органа оборудования. Для повышения долговечности ШВП необходимо при ее проектировании использовать системный подход, включающий выбор критериев стабильной работы и их проверку по результатам расчетов.

Как правило, исходными данными для проектного расчета передачи являются длина винта, способ установки винта на опорах (конструкция опор) и осевая нагрузка на передачу [5]. Осевые нагрузки задаются для различных операций, выполняемых на оборудовании, а также

для разных элементов цикла обработки (быстрого и рабочих ходов исполнительного органа). По результатам проектного расчета определяются значения таких параметров ШВП как диаметр шариков, шаг резьбы винта, средний диаметр резьбы винта, число шариков в рабочей части резьбы, КПД. В качестве критериев для стабильной работы ШВП примем обеспечение требуемой прочности, устойчивости, жесткости, грузоподъемности и долговечности.

После определения геометрических параметров элементов ШВП проверяют на прочность ходовые винты по приведенному напряжению σ с учетом работы винта на сжатие (растяжение) и кручение по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{F}{S}\right)^2 + 3\left(\frac{M}{W_p}\right)^2} \leq [\sigma_p], \text{ МПа,}$$

где F – осевая нагрузка на передачу; S – площадь поперечного сечения по внутреннему диаметру; M – момент, скручивающий винт; W_p – момент сопротивления по внутреннему диаметру; $[\sigma_p]$ – допускаемое напряжение материала винта на растяжение.

Проверочный расчет ШВП на устойчивость проводят по критической осевой нагрузке F_{\max} (наибольшему тяговому усилию) по формуле:

$$F_{\max} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \text{ Н,}$$

где E – модуль упругости материала винта; I – момент инерции сечения винта; μ – коэффициент, зависящий от характера закрепления концов винта; l – расстояние между опорами передачи.

Проверочный расчет ШВП на жесткость выполняют из условия обеспечения жесткости привода, которая связана с жесткостью шариковинтового механизма j_m , винта j_v и его опор j_o зависимостью

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_m} + \frac{1}{j_v} + \frac{1}{j_o}, \text{ Н/мкм.}$$

Далее ШВП проверяют на грузоподъемность C_0 . Это предельно допустимая осевая нагрузка на винт, в результате действия которой возникает общая остаточная деформация тел качения, гайки и винта в наиболее нагруженной зоне контакта, равная 0,0001 диаметра тела качения

$$C_0 = P z_p m \sin \alpha \cos \psi, \text{ Н,}$$

где P – предельно допустимая статическая нагрузка на один шарик; m – число витков в од-

ной замкнутой рабочей цепочке; z_p – расчетное число шариков в одном витке резьбы; ψ – угол подъема винтовой линии на среднем диаметре резьбы; α – угол контакта шарика с винтом и гайкой.

Проверочный расчет ШВП на долговечность (по выносливости рабочих поверхностей) сводится к вычислению коэффициента долговечности K_d исходя из расчетного срока службы передачи

$$K_d = 0,28 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{n_{\max} + n_{\min}}{2}\right) \cdot C_i},$$

где n_{\max} (n_{\min}) – максимальная и минимальная частота вращения винта, об/мин; C_i – условное число циклов нагружения за один оборот винта.

На основе приведенной методики с целью сокращения времени на проектирование ШВП и исключения возникновения ошибок в выполнении проектного и проверочных расчетов разработано программное обеспечение в среде *Delphi*.

На рис. 2 показано главное окно программы [6]. В качестве начальных данных используются значения осевой нагрузки F , длины винта l и коэффициента μ , учитывающего способ установки винта на опорах. После окончания заполнения полей ввода следует нажать кнопку «Начать» и программа выполняет все необходимые вычисления. Результат помещен на панель, расположенную ниже. При нажатии кнопки «Сменить материал» происходит смена материалов винта и гайки, содержащихся в базе данных программы, и расчеты выполняются заново. При нажатии кнопки «Ввести другие значения» поля ввода обнуляются.

На основе полученных результатов можно оценить выбранную схему профиля резьбы ШВП с нанесенными на ней основными геометрическими параметрами, расчетные значения этих параметров и результат выполнения проверок по критериям обеспечения стабильной работы передачи.

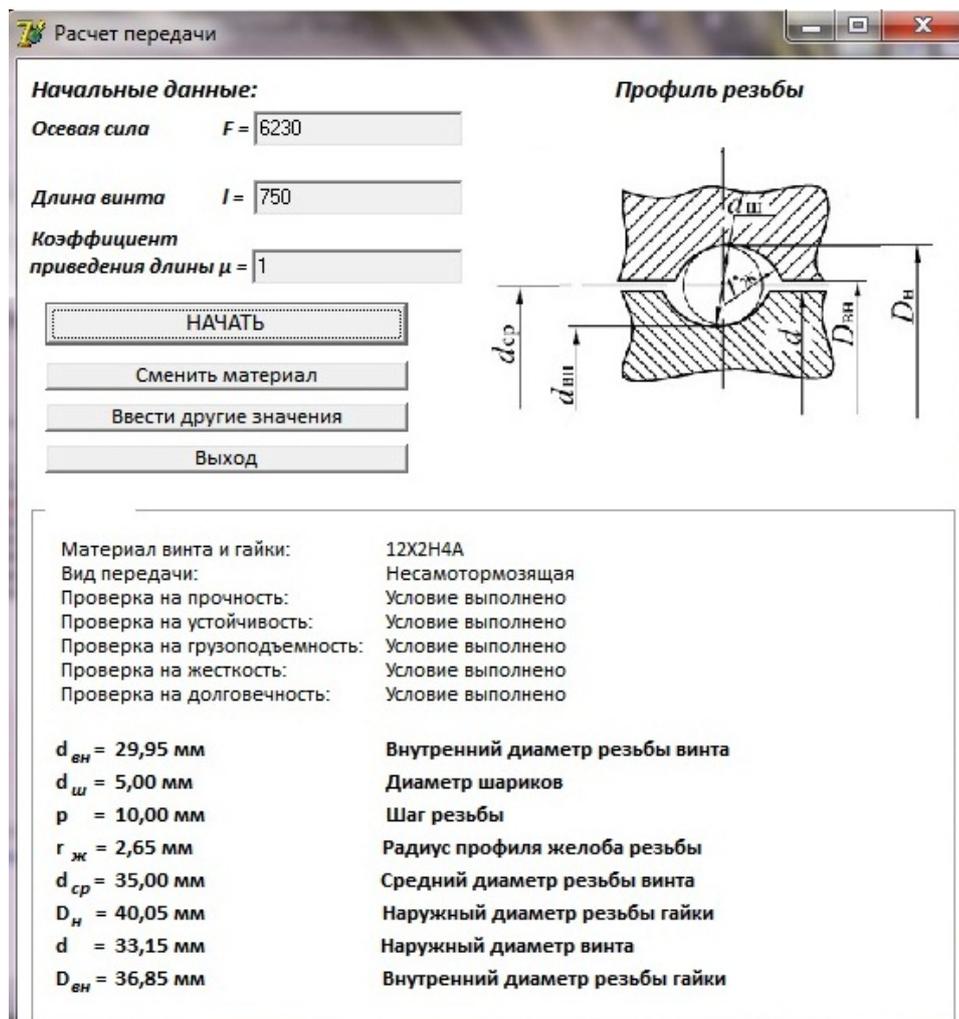


Рис. 2. Главное окно программы с результатами расчета

Программа может быть использована как подсистема АСТПП и в учебных целях при подготовке курсовых и выпускных квалификационных работ по направлениям подготовки бакалавров 15.03.04 и 15.03.05.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы точности и эффективности современных металлорежущих станков / В. В. Бушуев, А. П. Кузнецов, Ф. С. Сабиров [и др.] // СТИН. – 2016. – № 2. – С. 6–16.
2. Повышение точности обработки тел вращения на станках с ЧПУ / А. В. Капитанов, Е. Г. Крылов, А. М. Макаров, Н. В. Козловцева // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. – Волгоград, 2018. – № 2 (212). – С. 67–69.

3. 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.

4. Сердобинцев, Ю. П. Problem-oriented approach to improving tool operation at machining centers / Ю. П. Сердобинцев, Е. Г. Крылов // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35, No. 9. – С. 693–695.

5. Крылов, Е. Г. Расчет управляющих программ и проектирование механизмов и узлов станков с программным управлением : учеб. пособие / Е. Г. Крылов, А. Л. Плотиных; ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 95 с.

6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013618746 РФ от 17.09.2013. Расчет и выбор основных параметров узлов в бесступенчатых приводах передачи / С. С. Распертова, Е. Г. Крылов; ВолгГТУ. – 2013.

УДК 621.867.8

А. М. Макаров, О. В. Мушкин, А. В. Ваганов, А. Е. Жупиков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ МОДУЛЬНОГО ВАКУУМНОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГИБКИХ КОНТЕЙНЕРОВ*

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Для повышения эффективности процесса манипулирования воздухопроницаемым гибким контейнером при его наполнении сыпучим материалом спроектировано и изготовлено методом аддитивных технологий вакуумное захватное устройство. Оно имеет модульную структуру, при этом каждый модуль содержит хаотично или упорядоченно расположенные на его рабочей поверхности вакуумные камеры, связанные с источником вакуума. Наличие большого числа небольших по размеру вакуумных камер позволяет минимизировать утечки воздуха через поры и отверстия на поверхности горловины гибкого контейнера, что снижает энергетические затраты процесса манипулирования воздухопроницаемой тарой при ее наполнении.

Ключевые слова: гибкий контейнер; воздухопроницаемость; вакуумный захват; аддитивные технологии; расфасовка; сыпучий материал.

A. M. Makarov, O. V. Mushkin, A. V. Vaganov, A. E. Zhupikov

USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR DESIGNING AND MANUFACTURING A MODULAR VACUUM GRIPPING DEVICE FOR FLEXIBLE CONTAINERS

Volgograd State Technical University

For increase in efficiency of process of manipulation of an air-permeable flexible container at his filling bulk has designed and manufactured by method of additive technologies the vacuum gripping device. It has modular structure: at the same time each module contains chaotically or ordered the vacuum chambers located on his working surface connected with a vacuum source. Existence of a large number of vacuum chambers, small by the size, allows to minimize leak of air through a pores and openings on the surface of a mouth of a flexible container that reduces power expenses of process of manipulation of an air-permeable boxing at its filling.

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

Keywords: flexible container; air permeability; vacuum capture; additive technologies; packaging; free-flowing material.

Введение

Для решения задачи автоматического манипулирования расфасовочной тарой типа гибких контейнеров (ГК) из воздухопроницаемых ма-

териалов могут использоваться различные захватные устройства, в том числе вакуумные захватные устройства (ВЗУ), описание конструкций которых, результаты математического

© Макаров А. М., Мушкин О. В., Ваганов А. В., Жупиков А. Е., 2018

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

и компьютерного моделирования их работы представлены в [1–5].

Устройство [5] позволяет осуществлять полный цикл операций по манипулированию гибким контейнером при расфасовке сыпучих материалов в автоматическом режиме с помощью двух вакуумных захватных устройств. Однако в случае, если гибкий контейнер изготовлен из воздухопроницаемого материала, эффективность его захвата, раскрытия и удержания при наполнении снижается, так как при наличии вакуумных камер достаточно большого размера при их взаимодействии с материалом ГК возникают значительные утечки воздуха. Это снижает энергоэффективность и надежность захвата и удержания гибкого контейнера при транспортировке и наполнении, и повышает вероятность неправильного открытия и удержания тары, что

может привести к браку в процессе расфасовки, потере части сыпучего материала, повышенному пылевыведению, а также снижению производительности процесса в целом. Существующие ВЗУ, например, описанные в [6–7], также не позволяют решить эту задачу.

Материалы и методы исследования

Для повышения эффективности процесса манипулирования гибким контейнером из воздухопроницаемого материала разработано вакуумное захватное устройство, имеющее модульную структуру (рис. 1) и содержащее корпус 1 с системой внутренних разветвленных каналов 2, связанных с источником вакуума (не показан) через отверстия 3 и выполненных с возможностью независимого подключения к источнику вакуума каждого модуля (секции).

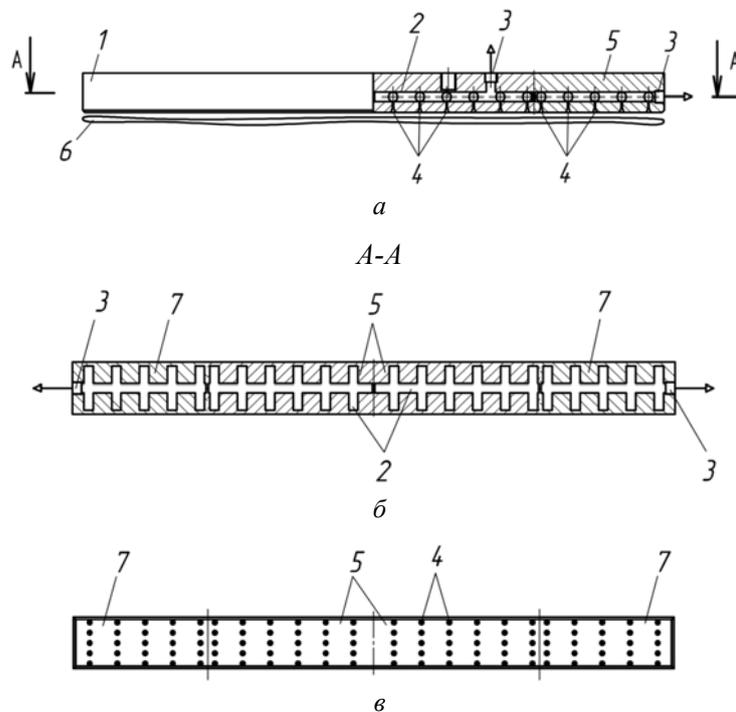


Рис. 1. Вакуумное захватное устройство:
а – главный вид; б – разрез А-А на главном виде; в – вид с рабочей поверхности (вид снизу)

На рабочей (нижней) поверхности секций система внутренних разветвленных каналов 2 открывается вакуумными камерами 4, выполненными в виде усеченных конусов, ориентированных своим большим основанием к рабочей поверхности и расположенных упорядоченно или хаотично по всей рабочей поверхности ВЗУ.

При этом суммарные линейные размеры центральных секций 5 ВЗУ составляют не менее половины ширины гибкого контейнера б. А раз-

меры крайних секций 7 ВЗУ подбираются таким образом, что длина рабочей поверхности всего вакуумного захватного устройства равна ширине горловины закрытого гибкого контейнера б.

Вакуумное захватное устройство работает следующим образом.

Для захвата гибкого контейнера б вакуумное захватное устройство располагается над его горловиной, прижимается к поверхности горловины, между поверхностью гибкого контей-

нера 6 и вакуумными камерами 4 центральных 5 и крайних 7 секций ВЗУ создается вакуум. Происходит захват и перемещение гибкого контейнера на позицию наполнения.

Для раскрытия гибкого контейнера может быть использовано второе ВЗУ аналогичной конструкции, но содержащее только центральные секции 5. При зеркальном расположении двух ВЗУ, их сближении и создании вакуума в секциях 5 гибкий контейнер открывается и удерживается для наполнения, при этом в крайних секциях 7 вакуум отключается и часть стенок горловины освобождается. После наполнения гибкий контейнер закрывается для последующей прошивки.

Одним из способов изготовления подобных

вакуумных захватных устройств могут быть аддитивные технологии [8–9]. Данные технологии облегчают изготовление опытных и исследовательских образцов, и, в связи с доступностью материалов и 3D-принтеров, дают возможность в короткие сроки изготовить прототипы новых устройств, доработать или оптимизировать существующие в ходе исследований, при этом получать достаточную точность изделий при невысокой себестоимости их изготовления.

С использованием 3D-принтера с тремя степенями подвижности экструдера модели *STE-320* компании «Стереотек» был изготовлен опытный образец вакуумного захватного устройства, состоящего из четырех секций (рис. 2).



Рис. 2. Опытный образец модульного ВЗУ, изготовленного методом аддитивных технологий:
а – ГК захвачен всеми секциями; б – ГК захвачен центральными секциями

Результаты и выводы

Предварительные испытания изготовленного опытного образца подтвердили работоспособность данного типа ВЗУ, однако важным вопросом остается проведение экспериментальных исследований и оптимизации параметров разработанного ВЗУ (количество и размеры вакуумных камер, требуемая степень вакуума и т. д.).

Использование предлагаемого вакуумного захватного устройства по сравнению с имеющимися обеспечивает существенное повышение эффективности удержания и манипулирования гибким контейнером из воздухопроницаемого материала при его наполнении. Это обеспечивается возможностью задействовать

независимо друг от друга различные части одного или двух ВЗУ, создавая в вакуумных камерах этих захватов нормальное давление или разрежение, таким образом создаются условия для захвата и удержания горловины гибкого контейнера по всей ее ширине во время захвата и транспортировки к загрузочному патрубку, это не позволяет гибкому контейнеру случайно открыться при транспортировке, что повышает надежность удержания. Отключение вакуумных камер крайних секций ВЗУ от источника вакуума и одновременное подключение к источнику вакуума вакуумных камер второго ВЗУ, расположенного зеркально первому, позволяет эффективно раскрыть и надежно удерживать

живать гибкий контейнер равномерно по всей площади его горловины при наполнении и последующем закрытии для закупоривания.

Таким образом, использование данного устройства повышает эффективность удержания и манипулирования гибким контейнером из воздухопроницаемого материала при его наполнении и создает условия для комплексной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Макаров, А. М. Исследование устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, А. С. Сергеев // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 114–117.
3. Макаров, А. М. Автоматизация наполнения гибких контейнеров сыпучими продуктами / А. М. Макаров, Ю. П. Сер-

добинцев, Е. Г. Крылов // СТИН, 2014. – № 4. – С. 37–40.

4. Математическое и компьютерное моделирование автоматического захвата гибкого контейнера с помощью вакуума / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, О. В. Мушкин, М. А. Лапиков // Известия ВолГТУ : научный журнал № 14 (193) / ВолГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 63–66.

5. П. м. 155000 РФ, МПК В65В5/00, В65В7/02. Устройство для автоматического раскрытия, удержания и закрытия гибких контейнеров / А. М. Макаров, М. Г. Кристаль, А. А. Ковалев, Д. А. Сулейманов ; ВолГТУ. – 2015.

6. П. м. 1623937 РФ, МПК В66С1/02. Вакуумное захватное устройство / В. Я. Краснослободцев, Б. Б. Бросалин ; Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина. – 1988 г.

7. Патент 2014/0062112 США, МПК В25J15/06. Устройство вакуумного захвата / Хо Янг Чо; Корея пневматик систем. – 2014.

8. Швеиц, А. А. Сравнительный анализ устройств для объемной печати / А. А. Швеиц, А. Р. Авдеев, А. В. Дроботов // Известия ВолГТУ : научный журнал № 1 (156) / ВолГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 76–79.

9. Методика выбора 3D-принтера на основании технико-экономических показателей / Ю. П. Сердобинцев, А. В. Дроботов, Н. В. Гаврилина, А. Р. Авдеев, А. А. Швеиц, И. А. Гущин // Вестник машиностроения. – 2017. – № 4. – С. 37–40.

УДК 001.51 : 621.914

А. А. Яковлев¹, В. С. Сорокин¹, С. Н. Бориско², С. Г. Поступаева¹

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА МЕТОДОМ ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

¹Волгоградский государственный технический университет

²Астраханский государственный университет

E-mail: yaa_777@mail.ru

Методы поискового конструирования позволяют существенно сократить сроки и стоимость конструкторских изысканий при разработке новых изделий и технологий. Реализация новых способов охлаждения зоны резания требует разработки соответствующей конструкции устройства, что является нетривиальной задачей. В работе описан процесс создания такого устройства с помощью метода поискового конструирования.

Ключевые слова: поисковое конструирование, физический принцип действия, техническое решение, техническая система, устройство охлаждения, зона резания.

A. A. Yakovlev¹, V. S. Sorokin¹, S. N. Borisko², S. G. Postupaeva¹

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR TECHNOLOGICAL REFRIGERANT SUPPLY BY THE RESEARCH DESIGNING METHOD

¹Volgograd State Technical University

²Astrakhan State University

Research engineering methods allow to essentially reduce terms and costs of design researches when developing new products and technologies. The implementation of new cooling methods in the cutting area demands developing the relevant design of the device and this is an uncommon task. The work describes the creation process of such a device by means of the research designing method.

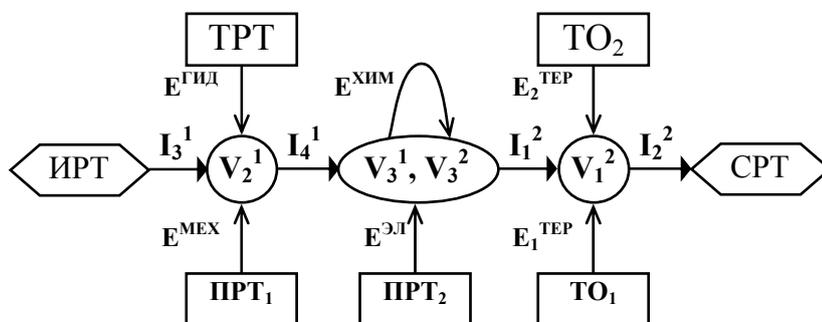
Keywords: research designing, physical principle of operation, engineering solution, engineering system, cooling device, cutting area.

В настоящее время разработка новых конструкций высокоэффективных технических систем в области машиностроения характеризуется широким использованием различных методов поискового конструирования, что обеспечивает существенное повышение производительности труда на начальных, творческих этапах проектирования. На этих этапах определяется физический принцип действия (ФПД) и структура устройства, а также осуществляется подбор функциональных элементов для его конструктивной реализации [1, 2]. В статье описывается использование инженерно-физического метода [3] для разработки наиболее рациональных конструкций систем охлаждения обрабатываемых заготовок и инструмента.

В рамках нового патента на изобретение [4]

был предложен новый способ смазки и охлаждения заготовки и инструмента. Согласно этому способу в качестве смазывающего компонента в зону резания подается ионизированный воздух, а для отвода теплоты и обеспечения оптимального температурного режима используется вода в распыленном состоянии.

В статье описана разработка технического решения такого устройства для сверления деталей с помощью использования проектных процедур инженерно-физического метода поискового конструирования. Согласно этому методу на первом этапе проектирования устройства осуществляется разработка его модели ФПД (представлена на рисунке), теоретическое обоснование которой дано в работах [3, 5], а метод ее построения – в работе [6].



Граф модели ФПД устройства для подачи смазочно-охлаждающего технологического средства

Рабочее тело – поток воздуха (i_4^1) на выходе из компрессора направляется через ионизатор (v_3^1, v_3^3) в зону резания (v_1^2), где отводит тепло ($e_1^{тер}, e_2^{тер}$) от детали ($ТО_1$) и режущего инстру-

мента ($ТО_2$). Обозначения характерных точек, взаимодействий компонентов рабочего тела и объектов окружения даны в табл. 1.

Таблица 1

Описание элементов графа модели ФПД

Обозначение вершины/дуги	Тип элемента	Семантическая нагрузка (описание) вершины/дуги
v_1^2	Характерная точка	Ионизированный воздух в зоне резания
v_2^1	–//–	Воздух в рабочей камере компрессора
v_3^1, v_3^2	То же	Распыленная в воздухе жидкость на поверхности инструмента и детали
ИРТ	Объект окружения	Атмосфера (исток рабочего тела)
$ТО_1$	–//–	Деталь (теплоотдатчик)
ТРТ	–//–	Механический привод компрессора (объект окружения для транспортирования/перемещения рабочего тела)
ПРТ ₁	–//–	Механический привод компрессора (объект окружения для изменения параметров рабочего тела)
i_1^2	Поток рабочего тела	Поток ионизированного воздуха в зону резания
i_2^2	То же	Поток ионизированного воздуха в атмосферу
$e_1^{тер}$	Взаимодействие	Процесс охлаждения детали
$e_2^{тер}$	То же	Процесс охлаждения инструмента

С каждым элементом графа модели ФПД связаны элементарные конструктивные функции, которые были определены при анализе таких абстрактных понятий термодинамики как «термодинамическая система», «контрольная поверхность», «внешние» и «внутренние сте-

пени свободы» [7, 8, 9]. Подробное теоретическое обоснование и описание элементарных конструктивных функций дано в работах [3, 5]. Путем анализа элементов графа модели ФПД определяют состав элементарных функций, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Описание элементарных конструктивных функций

Обозначение вершины/дуги графа ФПД	Обозначение элементарной функции	Описание элементарной функции для данного элемента графа
$v_2, ПРТ_2$	$f_3(e^{эл})$	Обеспечение возможности формирования коронного разряда
$v_1, ТО_1$	$f_3(e_1^{теп})$	Обеспечение возможности отвода теплоты от детали
$v_2, ТО_2$	$f_3(e_2^{теп})$	Обеспечение возможности отвода теплоты от инструмента
$e^{эл}$	$f_3(e^{эл})$	Обеспечение возможности подвода электрического заряда к электродам
i_1^2	$f_5(i_1^2)$	Обеспечение возможности подвода ионизированного воздуха в зону резания направленным потоком
v_3	$f_4(e_{03}^{эл})$	Изоляция электрического заряда в ионизаторе от станочного приспособления
i_1^2	$f_6(e_{03}^{гид})$	Защита проводящего канала от утечки ионизированного воздуха

В патентном фонде и в специальной технической литературе был осуществлен поиск описаний альтернативных вариантов конструктивных элементов, позволяющих реализовать эти

функции. Из-за большого количества элементов, обнаруженных во время информационного поиска, в табл. 3 представлена только часть из них.

Таблица 3

Список конструктивных элементов

Обозначение	Наименование конструктивного элемента	Источник информации (ИИ)	Элементарные функции
k_1^1	Сверло	RU № 2 313 424 B23B 51/06	$f_3(e_{01}^{теп}); f_3(e_{02}^{теп}); f_5(i_1^2); f_6(e_{03}^{гид})$
k_1^2	Устройство для подвода смазочно-охлаждающего технологического средства к станкам для глубокого сверления	RU № 2072290 B23Q 11/10	$f_3(e_{01}^{теп}); f_3(e_{02}^{теп}); f_5(i_1^2)$
k_1^3	Устройство для подачи смазочно-охлаждающих жидкостей при обработке отверстий малого диаметра	RU № 2 203 792 B23Q 11/10	$f_3(e_{01}^{теп}); f_3(e_{02}^{теп}); f_5(i_1^2)$
k_2^1	Устройство для получения озонированного воздуха при резании	RU № 2279962 B23Q 11/10	$f_3(e^{эл}); f_5(e^{эл}); f_5(i_1^2); f_4(e_{02}^{эл})$
k_2^2	Устройство комбинированной подачи смазочно-охлаждающей технологической среды	RU № 85388 B23Q 11/10	$f_3(e^{эл}); f_3(e^{эл}); f_5(i_1^2); f_4(e_{03}^{эл})$
k_2^3	Электроразрядный элемент озонатора трубчатого типа	RU № 2008252 C01B 13/11	$f_3(e^{эл}); f_3(e^{эл})$
k_3^1	Уплотнительная система	RU № 2008 145 706 F16J 15/10	$f_6(e_{03}^{гид})$
k_3^2	Устройство для герметизации соединений труб	RU № 42 857 E21 B 43/00	$f_6(e_{03}^{гид})$
k_4^1	Способ герметизации трубы	RU № 2 476 756 F16L 55/115 B21C 37/06	$f_4(e_{02}^{гид})$
k_4^2	Уплотнение трубных соединений с внешним и внутренним зажимом	RU № 2012 141 667 F16L 55/115	$f_4(e_{02}^{гид})$
k_5^1	Изоляционное покрытие	RU № 2 153 722 H01B 3/48	$f_4(e_{03}^{эл})$
k_5^2	Изоляционная оболочка	RU № 2 270 489 H01B 3/48	$f_4(e_{03}^{эл})$

Возможные варианты технического решения устройства показаны в таблице технических решений (табл. 4). Методика разработки таких таблиц подробно изложена в работе [6]. Для получения вариантов технических решений и их сравнения использована прикладная программа, позволяющая формировать списки технических решений, вводить экспертные оценки и выбирать лучшие варианты по раз-

личным показателям качества. Основной алгоритм программы и методика расчета средневзвешенных показателей подробно описаны в работах [10, 11].

Для выбора лучших технических решений проведена экспертная оценка элементов по технико-эксплуатационным показателям, по надежности, а также по технологическим, эргономическим и объемно-весовым показателям.

Таблица 4

Элементы	Порядковый номер элементарной функции из таблиц М1 и М2							
	003	005	006	009	013	904	905	906
k_1^1								
k_1^2								
k_1^3								
k_2^1								
k_2^2								
k_2^3								
k_3^1								
k_3^2								
k_4^1								
k_4^2								
k_5^1								
k_5^2								

Анализ комбинаций конструктивных элементов с использованием экспертных оценок позволил выявить много перспективных вариантов в качестве технических предложений для их дальнейшей конструкторской разработки. На некоторые из них были оформлены патенты.

Использование метода позволяет многократно расширить область поиска вариантов исполнения проектируемого изделия. В таблице технических решений содержатся множество вариантов комбинаций элементов и это повышает вероятность создания изделий с форсированным уровнем качества. Описанный метод поискового конструирования носит универсальный характер, о чем свидетельствует практика его применения для поиска технических решений двигателей внутреннего сгорания, технологических лазеров, холодильных установок и других технических систем.

В отличие от морфологического подхода данный метод поискового конструирования учитывает факторы несовместимости конструктивных элементов друг с другом. Результаты его практического использования при разра-

ботке различных технических систем позволяют сделать положительное заключение о его работоспособности и эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воинов, Б. С.* Информационные технологии и системы. В 2 кн. Кн. I. Методология синтеза новых решений / Б. С. Воинов. – Нижний Новгород : Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2001. – 404 с.
2. *Норенков, И. П.* Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – 4-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 430 с.
3. *Яковлев, А. А.* Разработка множеств технических решений установок для преобразования энергии / А. А. Яковлев. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
4. Пат. 2367556 РФ, МПК В23Q 11/10, 2009. Способ подачи смазочно-охлаждающих технологических средств / Яковлев А. А., Труханов В. М., Яковлева Е. В. бюл. № 26, 5 с.
5. *Камаев, В. А.* Обучение концептуальному проектированию преобразователей энергии на базе системного подхода / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Открытое образование. – Москва, 2005. – № 5. – С. 62–69.
6. *Яковлев А. А.* Метод синтеза технических решений двигателей внутреннего сгорания на начальных стадиях проектирования / А. А. Яковлев // Двигателестроение. – Санкт-Петербург, 2005. – № 3. – С. 26–31.

7. Гухман, А. А. Об основаниях термодинамики / А. А. Гухман. – 2-е изд. – М. : Изд-во ЛКИ, 2010. – 384 с.
8. Алексеев, Г. Н. Энергоэнтропика / Г. Н. Алексеев. – М. : Знание, 1983. – 192 с.
9. Вейник, А. И. Термодинамическая пара / А. И. Вейник. – Минск : Наука и техника, 1973. – 382 с.
10. Яковлев А. А. Разработка матрицы технических решений преобразователей энергии и алгоритм формирования списков функционально-совместимых конструктивных элементов / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – Москва, 2007. – № 10. – С. 34–39.
11. Яковлев, А. А. Автоматизация синтеза и выбора технических решений преобразователей энергии / А. А. Яковлев, Е. В. Яковлева // Информационные технологии. – Москва, 2010. – № 11. – С. 71–78.

Редактор РИО, ответственный за выпуск
Н. Н. Кваша

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2018 г. Поз. № 8ж. Подписано в печать 12.07.2018 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,61.
Тираж 80 экз. Свободная цена. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научном журнале «Известия ВолгГТУ» серии «Прогрессивные технологии в машиностроении» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований и представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области прогрессивных технологий в машиностроении.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

К публикации допускается не более двух статей автора в выпуске.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word 97-2003 и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей в электронном виде в полном соответствии с распечатанным оригиналом.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи, адрес электронной почты, а также аннотация и ключевые слова на русском и английском языках. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать семь страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором, без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), рецензия доктора наук, компетентного в предметной области предоставляемой статьи. Для сотрудников Волгоградского государственного технического университета и подразделений также необходима документация, подтверждающая возможность открытого опубликования (экспертное заключение о возможности опубликования статьи, акт идентификации статьи). Для сторонних авторов также должно быть приложено сопроводительное письмо на имя ответственного секретаря серии с просьбой о публикации.