

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:

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

Серия
«ПРОГРЕССИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

Полянчиков Ю. Н., д.т.н., проф.

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

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

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

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

Зубарев Ю. М., д.т.н. проф.
(ЛИМЗ-ВТУЗ, г. Санкт-Петербург)

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

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

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.

Ханов Г. В., д.т.н., проф.

Тескер Е. И., д.т.н., проф.

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

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

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

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

Плотников А. Л., д.т.н., проф.

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

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

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

Тел. издательства ВолГТУ:
(8442) 24-84-06
Факс (8442) 24-84-06
otr@vstu.ru

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

№ 1 (156)
Май
2015

УЧРЕДИТЕЛЬ:

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

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

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

Editorial board:

Anziferov V. N., Academician of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., The Department for Powder Material Science (Perm, Russia)

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)

Kamaev V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, VSTU

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SERIES
"ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING"

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

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

Editorial board:

Chairman

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

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

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

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

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

Zubarev Y.M., D. Sc. (Engineering),
Prof. (SPSPU, Saint-Petersburg)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

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

Tel. Of VSTU editorial office:

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

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 1 (156)
May
2015

FOUNDER:

FSBEI of Higher Professional Education
"Volgograd State Technical University"

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

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

E-mail: president@vstu.ru

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

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

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

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

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авдеев А. Р. 76
Авилов А. В. 27
Автореева Н. В. 12
Александров А. А. 24
Альджубари Х. 5
Барабанов В. Г. 46
Бахмат В. И. 27
Бондарев А. А. 5, 12, 16
Бугаев А. А. 7
Бурков Ю. Г. 48
Быстров Е. Ю. 56
Волков И. В. 74
Горюнов В. А. 48
Гриб О. О. 40
Давыдов Д. А. 52
Даниленко М. В. 30
Дроботов А. В. 76
Дудников Д. А. 48
Егоров Н. И. 10
Жданов А. А. 33
Зайцева Н. Г. 33
Иванюк А. К. 46, 66
Ислямгалиев А. И. 12
Кесоян А. Г. 56
Козачухненко И. Н. 7, 16
Козловцева Н. В. 59
Корзин В. В. 48
Крайнев Д. В. 7, 12, 16
Кремлева Н. Г. 56
Круглов М. А. 61
Крылов Е. Г. 59, 63
Курсин О. А. 10
Кухтик М. П. 61, 63
Макаров А. М. 59, 61, 63, 74
Махиянова Н. В. 69
Милованова Л. Р. 20
Носенко В. А. 24, 27, 30
Носенко С. В. 27
Отений Я. Н. 5
Платонова Ю. Н. 42
Плотников А. Л. 33
Полянчиков Ю. Н. 5, 7, 10, 16
Полянчикова М. Ю. 10
Поступаева С. Г. 52
Пройдакова Н. В. 52
Санинский В. А. 40, 42
Сергеев А. С. 33
Сердобинцев Ю. П. 61, 63, 66
Солодков В. А. 5
Стекольников М. В. 20
Сурова Т. Б. 69
Федотов Е. В. 30
Филиппов В. В. 69, 72
Харламов В. О. 27
Хожамбердыев Х. В. 16
Чеснокова Е. С. 74
Чикова А. А. 74
Чугуев М. А. 42
Чулюнин А. Ю. 48
Швец А. А. 76

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Бондарев А. А., Отений Я. Н., Полянчиков Ю. Н., Солодков В. А., Альджубари Х.</i> Снижение износа лезвий режущего инструмента при обработке с предварительной пластической деформацией по обрабатываемой поверхности.....	5
<i>Бугаев А. А., Козачухненко И. Н., Крайнев Д. В., Полянчиков Ю. Н.</i> Предпосылки применения опережающего пластического деформирования при точении титановых сплавов.....	7
<i>Егоров Н. И., Полянчиков Ю. Н., Полянчикова М. Ю., Курсин О. А.</i> Статико-импульсная обработка радиуса впадины резьбы охватывающим инструментом с роликами.....	10
<i>Ислямгалиев А. И., Бондарев А. А., Крайнев Д. В., Автореева Н. В.</i> Разработка математического аппарата прогнозирования шероховатости при токарной обработке конструкционной углеродистой стали с опережающей пластической деформацией.....	12
<i>Козачухненко И. Н., Бондарев А. А., Крайнев Д. В., Полянчиков Ю. Н., Хожамбердыев Х. В.</i> Обоснование повышения качества поверхности при обработке с предварительным упрочнением жаропрочной стали 30ХМА с позиции дислокационных представлений.....	16
<i>Милованова Л. Р., Стекольников М. В.</i> Теплофизическая модель обработки глубокого отверстия.....	20
<i>Носенко В. А., Александров А. А.</i> Исследование связи между средними геометрическими параметрами зерен шлифпорошков и размером ячейки контрольного сита.....	24
<i>Носенко В. А., Носенко С. В., Авилов А. В., Харламов В. О., Бахмат В. И.</i> Содержание титана в нанослоях карбида кремния после микроцарапания титанового сплава.....	27
<i>Носенко В. А., Федотов Е. В., Даниленко М. В.</i> Использование цепей Маркова при моделировании износа абразивного инструмента.....	30
<i>Плотников А. Л., Сергеев А. С., Зайцева Н. Г., Жданов А. А.</i> Особый вид контактного взаимодействия при токарной обработке коррозионно-стойких сталей, его влияние на силы резания и качество обработанной поверхности.....	33
<i>Санинский В. А., Гриб О. О.</i> Разработка станков для прецизионных технологий изготовления глубоких и прерывистых отверстий.....	40
<i>Санинский В. А., Платонова Ю. Н., Чугуев М. А.</i> Разработка станков для совмещения процессов обработки коренных опор дизелей.....	42
Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Барабанов В. Г., Иванюк А. К.</i> Алгоритм расчета основных показателей ГПС производства корпусных деталей.....	46
<i>Бурков Ю. Г., Горюнов В. А., Дудников Д. А., Чулюнин А. Ю., Корзин В. В.</i> Моделирование процессов переключения струйного элемента.....	48

<i>Давыдов Д. А., Поступаева С. Г., Пройдакова Н. В.</i> Анализ проблем централизованной системы автоматизированного мониторинга сетевой инфраструктуры предприятия.....	52
<i>Кесоян А. Г., Кремлева Н. Г., Быстров Е. Ю.</i> Незавершенное производство при автоматизированном комплектовании прецизионных деталей.....	56
<i>Крылов Е. Г., Макаров А. М., Козловцева Н. В.</i> Автоматизация организационно-технологической подготовки режущего инструмента.....	59
<i>Кухтик М. П., Сердобинцев Ю. П., Макаров А. М., Круглов М. А.</i> Оценка запаса устойчивости системы управления методической печью по частотному показателю колебательности.....	61
<i>Макаров А. М., Крылов Е. Г., Сердобинцев Ю. П., Кухтик М. П.</i> Конструктивно-функциональный анализ и разработка захватных устройств для гибких контейнеров.....	63
<i>Сердобинцев Ю. П., Иванюк А. К.</i> Использование теории графов для построения группового технологического процесса обработки корпусных деталей.....	66
<i>Сурова Т. Б., Филиппов В. В., Махиянова Н. В.</i> Контроль над состоянием головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию при исчезновении напряжения.....	69
<i>Филиппов В. В.</i> Контроль включения сетевого резерва делительной автоматикой.....	72
<i>Чикова А. А., Чеснокова Е. С., Волков И. В., Макаров А. М.</i> Адаптивное лечебно-оздоровительное устройство с переменной жесткостью.....	74
<i>Швец А. А., Авдеев А. Р., Дроботов А. В.</i> Сравнительный анализ устройств для объемной печати.....	76

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.91.01

А. А. Бондарев, Я. Н. Отений, Ю. Н. Полянчиков, В. А. Солодков, Х. Альджубари

СНИЖЕНИЕ ИЗНОСА ЛЕЗВИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ПО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

В работе представлены результаты испытаний режущего инструмента на стойкость при обработке легированных сталей с предварительно сообщенной обрабатываемой поверхности пластической деформацией. Обнаружено, что при точении с опережающим пластическим деформированием (ОПД) достигается значительное снижение размерного износа лезвий режущего инструмента и износа по главной задней поверхности, тем самым повышается ресурс работоспособности инструмента и производительность обработки за счет достижения аналогичных значений износа при более высоких скоростях резания по сравнению с традиционной обработкой.

Ключевые слова: точение, износ, стойкость, режущий инструмент, пластическая деформация, комбинированная обработка.

In this paper proposed lifetime testing results of cutting tool with machining alloyed steels by turning with advancing plastic deformation. (APD). Established that turning with APD obtain integral wear reduction of side flank cutting tool blade, thus, increase efficiency of machining and operational integrity of tool in comparison with traditional turning.

Keywords: turning, wear, lifetime, cutting tool, advanced plastic deformation (APD), combine machining.

Легированные стали широко применяются для изготовления деталей машин. Операции обработки точением применяются в технологических процессах изготовления валов и других тел вращения, к которым предъявляются требования повышенного качества поверхности и износостойкости. Спецификой обработки конструкционных легированных сталей является сложное нагруженное состояние режущего клина, что приводит к высокому износу лезвий инструмента. Рост производительности обработки точением конструкционных легированных сталей является актуальной задачей.

Представленную задачу можно решить следующими способами: повышение ресурса работоспособности режущего инструмента, производительности процесса обработки и качества получаемых изделий. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД), совмещающее стадии предварительного поверхностного пластического деформирования и последующего съема припуска на обработку

режущим инструментом, является комбинированным методом обработки, позволяющим получить комплексный результат роста эффективности по перечисленным направлениям. Изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала после ОПД обуславливает формирование таких условий протекания физических процессов в зоне резания, которые способствуют снижению нагрузок на режущий клин, условий контактного взаимодействия.

Исследованиями установлено, что точение конструкционных легированных сталей с ОПД по обрабатываемой поверхности позволяет значительно снизить величину площадки износа по главной задней поверхности, тем самым повышая производительность процесса резания. При точении с ОПД жаропрочной релаксационностойкой конструкционной легированной стали 30ХМА происходило снижение значения площадки износа по передней поверхности до 2 раз по сравнению с традиционной обработкой.

кой. Выявлены резервы существенного повышения производительности процесса резания. Одинаковые значения площадки износа по передней поверхности получались при традиционном точении на одних скоростях и при резании на больших скоростях предварительно деформированного металла.

Исследования выполнялись для полустого точения (глубина резания $t = 1$ мм) конструкционной легированной стали 30ХМА (сортной прокат, состояние поставки, $\sigma_b = 930$ МПа). Инструмент был представлен сменными многогранными твердосплавными пластинами Т15К6, ВК6, ТН20 формы W ($\alpha = 0^\circ$ (ISO 1832–1991)); радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок $r = 0,8$ мм. Обработка выполнялась без смазочно-охлаждающих технологических сред. Изучение изнашивания поверхностей режущих СМП выполнялось на большом инструментальном микроскопе БМИ-1.

Для определения режима осуществления ОПД использовалась характеристика комбинированной обработки – «коэффициент ОПД» [4]:

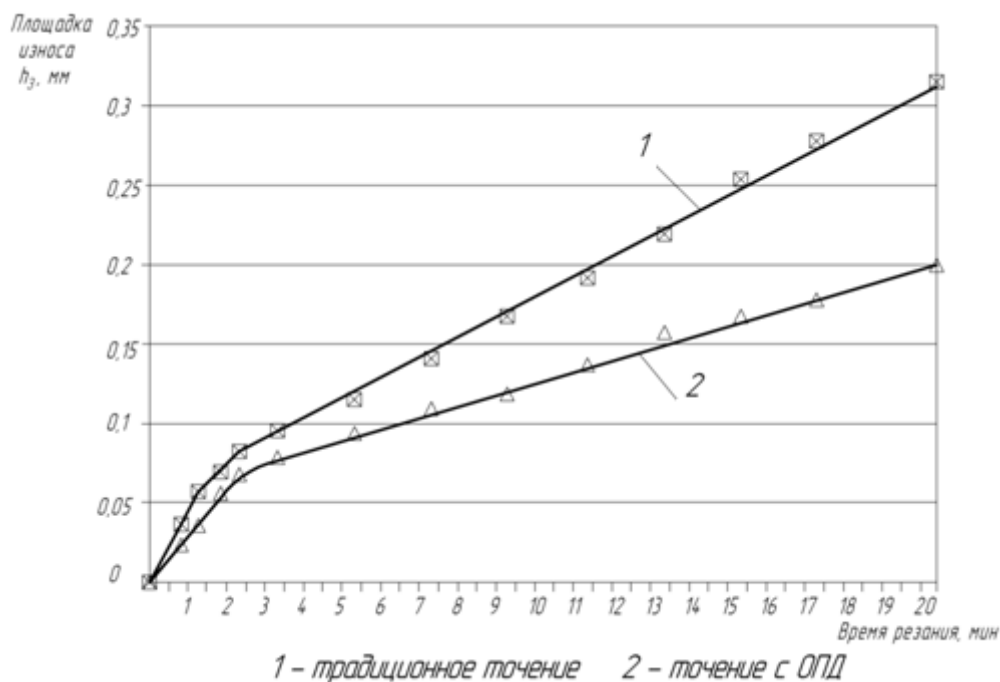
$$K_{\text{ОПД}} = \frac{h_{\text{нак}}}{t}, \quad (1)$$

где $h_{\text{нак}}$ – глубина наклепанного поверхностного слоя, мм; t – глубина резания, мм.

На рисунке представлена зависимость роста площадки износа h_3 по главной задней поверх-

ности резцов от времени работы. На кривой следует выделить участки приработки – интенсивного изнашивания новой режущей кромки, вступившей в работу, и нормального изнашивания – относительно стабильного функционирования лезвия во времени до достижения заданной величины износа h_3 . Таким критерием в исследовании принимался размер фаски износа, значение которого составляло 0,3 мм.

Быстрое изнашивание режущего инструмента во время приработки может быть связано с появлением микросколов, которые являются результатом кратковременной ползучести. Во всех случаях точения с ОПД приработка резца происходит при меньших величинах износа. Снижение температурно-силовой напряженности процесса [4] при резании с использованием предлагаемого способа обуславливает уменьшение пластической деформации режущего клина и потерю им формоустойчивости, в то время как при традиционной обработке наблюдались микросколы и выкрашивания. На графике заметно существенное снижение интенсивности затупления инструмента во время фазы нормального изнашивания при точении с ОПД: угол наклона участка кривой нормального износа меньше по сравнению с традиционной обработкой, что обуславливает увеличение периода стойкости твердосплавных СМП.



Зависимость размера площадки износа по задней поверхности резца от времени работы (Сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6, $t = 1$ мм; $v = 135$ м/мин; $s = 0,166$ мм/об. При точении с ОПД $K_{\text{ОПД}} = 2$)

Наряду с повышением стойкости инструмента по критерию допустимой площадки h_3 по задней поверхности при резании с ОПД имеет место снижение интенсивности размерного изнашивания лезвий. Этот параметр определяет период времени, в течение которого инструмент обеспечивает изготовление деталей в пределах заданных технических условий. Данный критерий затупления оценивается уменьшением размера резца в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности. При точении с ОПД имеет место снижение размерного износа, объясняемое меньшей температурно-деформационной напряженностью состояния рабочего клина и процесса съема металла.

Применение ОПД обрабатываемой поверхности позволяет повысить стойкость режущего инструмента по критерию максимально допустимого размера площадки износа по задней поверхности h_3 и производительность процесса по сравнению с традиционным точением.

Снижение давлений, действующих на рабочую поверхность инструмента, нагрева режущего клина при точении с ОПД, способствуют ослаблению пластического деформирования ре-

жущего клина, явлений адгезионно-усталостного и диффузионного изнашивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 ВолгГТУ. – № 2009111702/02 ; заявл. 30.03.2009 ; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. – 6 с.
2. *Ингеманссон, А. Р.* Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Ингеманссон А. Р. – Волгоград, 2012. – 209 с.
3. *Лоладзе, Т. Н.* Износ режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машгиз, 1958. – 358 с.
4. *Талантов, Н. В.* Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.
5. Повышение эффективности токарной обработки конструкционных углеродистых и легированных сталей при использовании опережающего пластического деформирования / А. А. Бондарев, А. П. Азаматов, Я. Н. Отений, В. А. Солодков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 11). – С. 7-10.

УДК 621.9.015

А. А. Бугаев, И. Н. Козачухненко, Д. В. Крайнев, Ю. Н. Полянчиков

ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: bugaevartem@rambler.ru

Приведен анализ обрабатываемости, предположено положительное влияние опережающего пластического деформирования на эффективность обработки титановых сплавов.

Ключевые слова: титановые сплавы, механическая обработка, обработка резанием, опережающее пластическое деформирование (ОПД).

An analysis of the workability it has been suggested a positive effects of advanced plastic deformation (APD) on the efficiency of titanium alloys.

Keywords: titanium alloys, tooling, machining, advanced plastic deformation (APD).

Титан и его сплавы находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Сравнительно высокая стоимость титана и его сплавов компенсируется высокими эксплуатационными характеристиками металла, в некоторых случаях титановые сплавы являются единственным материалом, из которого можно изготовить работоспособную конструкцию. Титановые сплавы широко применяются в авиационной, космической и ракет-

ной технике, в машиностроении для изготовления различных емкостей, оболочек, обшивки, балок и других деталей и узлов. Высокая прочность и небольшая удельная масса, широкий температурный интервал применения титановых сплавов позволяет значительно снизить массу конструкций и повысить их надежность. Высокая антикоррозийная стойкость сплавов на основе титана обуславливает использование их в химическом машиностроении. Из титана из-

готовавливают компрессоры и насосы для перекачки таких агрессивных сред, как серная и соляная кислота и их соли. Титановые вентили для подачи агрессивных жидкостей под давлением 2 кгс/мм^2 работают более 1700 ч, в то время как подобные вентили из коррозионно-стойкой стали требуют замены через каждые 70 ч работы. Титан также применяется в пищевой промышленности и медицине.

По сравнению с другими металлами, механическая обработка титана нуждается в более высоком требовании и выполняется в больших ограничениях. Сплавы из титана обладают некоторыми свойствами, которые способны значительно влиять как на процесс резания, так и на материал, который подвергается резанию. Если режим и инструмент выбраны правильно, а также надежно закреплена заготовка, процесс металлообработки титана будет высокоэффективным.

Многие свойства, которые придают титану статус привлекательного материала для изготовления деталей, оказывают значительный эффект на его обрабатываемость, а именно:

- более низкая упругость. Титан легче подвергается деформированию, в отличие от стали;
- высокая прочность по отношению к своему весу, причем его плотность составляет 60 % плотности стали;
- низкая теплопроводность;
- более высокая стойкость к коррозии, чем у нержавеющей стали.

Титановые сплавы отличаются высоким отношением предела текучести к временному сопротивлению разрыва. Это соотношение составляет для титановых сплавов 0,85–0,95, в то время как для сталей оно равно 0,65–0,75. В итоге при механической обработке титановых сплавов возникают большие удельные усилия, что приводит к высоким температурам в зоне резания, обусловленным низкой теплопроводностью титана и его сплавов, затрудняющей отвод тепла из зоны резания. Из-за сильной адгезии и высоких температур титан налипает на режущий инструмент, что вызывает значительные силы трения. Налипание и приваривание титана на контактируемые поверхности режущего инструмента приводят также к изменению его геометрических параметров. Отклонение геометрических параметров режущего инструмента от оптимальных их значений приводит к дальнейшему повышению усилий обработки и температуры в зоне резания и износа инструмента.

Температура в зоне резания наиболее сильно повышается с увеличением скорости резания, в меньшей степени – с увеличением подачи. Глубина резания по сравнению со скоростью и подачей оказывает еще меньшее влияние.

Для увеличения производительности механической обработки титановых сплавов резанием и повышения стойкости режущего инструмента применяют различные способы, в том числе: использование галлоидосодержащих смазывающе-охлаждающих жидкостей; охлаждение обрабатываемых деталей посредством обильного полива; механическую обработку титановых сплавов в нагретом состоянии; механоводородную обработку, включающую в себя наводороживание, механическую обработку и вакуумный отжиг и другие.

Среди возможных способов повышения износостойкости инструмента и обрабатываемости титановых сплавов резание с опережающим пластическим деформированием может выступить одним из наиболее эффективных, что наряду с достаточной простотой реализации делает целесообразным детальное исследование его аспектов.

Способ совмещает в себе два приема – поверхностное пластическое деформирование (ОПД), создающее необходимые глубину и степень наклепа, и последующий съем упрочненного металла в виде стружки [1].

Приведенные в работах [2, 3, 4] результаты исследований, посвященных точению труднообрабатываемых коррозионно-стойких хромистых и сложнолегированных сталей, обладающих схожим с титановыми сплавами набором свойств, затрудняющих их обработку, показывают благоприятное влияние способа на стойкость режущего инструмента, качество обработанной поверхности и производительность процесса.

Эффективность предлагаемого способа можно объяснить следующим. Создаваемая ОПД повышенная плотность дислокаций в поверхностном слое заготовки обуславливает снижение работ, совершаемой резцом, по доведению обрабатываемого материала до критического деформационно-энергетического состояния в области отделения стружки. Значит, снижается интегральная сумма напряжений, действующих в зоне первичных деформаций, и, следовательно, уменьшается вертикальная составляющая силы резания и соответствующее

тепловыделение при использовании исследуемого способа по сравнению с традиционной обработкой.

Для доведения предварительно деформированного металла до состояния динамического возврата (разупрочнения) требуется меньший объем тепловой энергии, что способствует облегчению течения объемов стружки вдоль передней поверхности резца при снижении мощности источника тепловыделения в зоне резания. Параллельно с этим уменьшение сопротивления пластическому деформированию в контактных объемах и во фронте сдвига также обуславливает снижение температуры. Указанное обстоятельство совместно с фактом уменьшения вертикальной составляющей силы резания способствуют снижению соответствующих горизонтальных составляющих. Уменьшение выделения тепла при обработке с ОПД предопределяет повышение температурно-деформационной стабильности процесса стружкообразования, а именно уменьшение высокочастотной цикличности.

Снижение нагрева режущего клина, его силового нагружения, ослабление адгезионно-усталостных явлений и пагубного влияния цикличности стружкообразования обуславливает повышение стойкости инструмента.

Применение опережающего пластического деформирования приводит к снижению интенсивности износа инструмента в 1,5–2 раза за счет снижения сил резания на 10–15 % и интенсивности диффузионного проникновения атомов железа в структуру твердого сплава. После резания с опережающим пластическим деформированием в поверхностном слое формируются остаточные сжимающие напряжения, что увеличивает долговечность работы деталей. Кроме того, снижается шероховатость поверхности (в 2–4 раза), что позволяет сократить число технологических переходов, а также улучшается микропрофиль поверхности (в частности, увеличивается длина опорной линии),

что благоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках детали.

Таким образом, на основе проведенного анализа обрабатываемости титановых сплавов, а также результатов применения способа точения с опережающим пластическим деформированием при обработке коррозионно-стойких хромистых и сложнолегированных сталей можно предположить положительное влияние на эффективность обработки титановых сплавов, а также целесообразность проведения дальнейших исследований данной тематики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Повышение эффективности процесса резания труднообрабатываемых коррозионно-стойких сталей при использовании опережающего пластического деформирования / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, А. Р. Ингеманссон, Нгуен Тхань Хунг // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 47–49.
3. Совершенствование полноточного и чистового точения нержавеющей и жаропрочных сталей путем использования опережающего пластического деформирования : монография / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, А. Р. Ингеманссон ; под ред. А. П. Бабицева ; ВолгГТУ. – Тольятти : ЗАО «ОНИКС», 2012. – 154 с.
4. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки : коллективная монография / В. Н. Беляев, В. П. Иванов, А. Р. Ингеманссон, А. Н. Исаев, А. В. Киричек, Д. В. Крайнев, А. Р. Лебедев, В. А. Лебедев, С. В. Лесняк, А. В. Морозова, М. Н. Нагоркин, М. В. Песин, Ю. Н. Полянчиков, Д. Л. Соловьев, В. И. Сотников, Ю. С. Степанов, Д. Е. Тарасов, А. Н. Ткаченко, В. П. Федоров ; под ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2014. – 403 с.
5. Хорев, А. И. Результаты фундаментальных и прикладных работ по титановым сплавам и перспективы их развития / А. И. Хорев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 47–49.
6. Шнейдер, Ю. Г. Исследование чистовой обработки сплавов титана / Ю. Г. Шнейдер, А. Д. Начинков, В. С. Кувардин // Вестник машиностроения. – 1960. – № 12. – С. 66–68.

УДК 621.791.019

Н. И. Егоров, Ю. Н. Полянчиков, М. Ю. Полянчикова, О. А. Курсин

СТАТИКО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА РАДИУСА ВПАДИНЫ РЕЗЬБЫ
ОХВАТЫВАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ С РОЛИКАМИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: egorov_ni@mail.ru

Для упрочнений радиуса впадины резьбы разработан охватывающий инструмент для статико-импульсной обработки в виде кольца с самоподжимающимися роликами. Установлены зависимости размеров инструмента, шероховатости поверхности и энергии удара от параметров режима обработки.

Ключевые слова: резьба, охватывающее кольцо, ролики, пластическая деформация, шероховатость поверхности, предел выносливости.

For reinforcements radius of the depression thread developed covering tool for static-pulse treatment in the form of a ring with suboptimality rollers. The dependence of tool dimensions, surface roughness and impact energy on the parameters of the processing mode.

Keywords: thread, covering the ring, rollers, plastic deformation, surface roughness, the limit of endurance.

Для повышения предела выносливости резьбы штоков применяется статико-импульсная отделочно-упрочняющая обработка радиуса впадины резьбы пластическим деформированием [1, 2]. Упрочнение впадины резьбы происходит за счет наклепа, создающего остаточные напряжения сжатия, и снижения шероховатости впадины резьбы [3, 4].

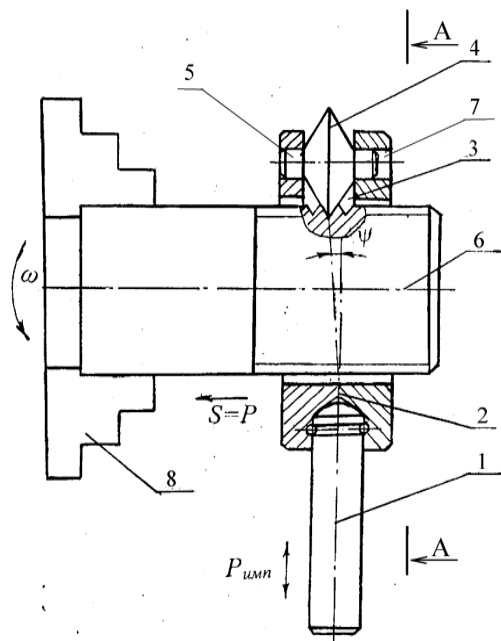


Рис. 1. Охватывающий инструмент для статико-импульсного упрочнения впадины резьбы

Разработан инструмент (рис. 1) для статико-импульсной отделочно-упрочняющей обработки радиуса впадины резьбы, содержащий волновод 1, с помощью которого инструментом сообщается динамическая $P_{имп}$ составляющая деформирующей силы. Ролики 4, упрочняющие профиль резьбы 3, установлены по винтовой поверхности с углом ψ в соответствии с шагом P

резьбы. Цапфы роликов 5 установлены с возможностью самоподжима к заготовке 6 с силой $P_{ст}$ в наклонных овальных отверстиях 7 в резбонакатном кольце 2 и направленных в сторону вращения заготовки с наклоном к центру заготовки на величину припуска.

Из разреза А-А (рис. 2) можно рассчитать длину l овальных отверстий 7 из условия самоподжима (самоторможения клиновой поверхности):

$$l = \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha} \geq \frac{t}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{t}{f} = \frac{t}{0,03-0,09} = 11-33 \cdot t, \quad (1)$$

где α – угол наклона прорези $\operatorname{tg} \alpha = \frac{t}{l}$, где t – величина деформации впадины резьбы (припуск на обработку), мм, l – длина овального отверстия; φ – угол трения, $\operatorname{tg} \varphi = f$, $f = 0,03-0,09$ – коэффициент трения стали по стали.

Мощность N_d , необходимую для обработки, можно посчитать по формуле

$$N_d = \frac{M_{кр} \cdot n_3}{9750} \leq \eta \cdot N_{эл}, \quad (2)$$

где $M_{кр} = 3 \cdot f_k \cdot P_{ст} \left(\frac{d_3}{d_p} + 2 \cdot \frac{d_3 + d_p - d_{ц}}{d_{ц}} \right)$ – момент вращения заготовки для преодоления сил трения;

$$P_{ст} = \operatorname{HB} \cdot \frac{\pi^2 \cdot R \cdot d_p}{90^0} \arcsin \sqrt{\frac{t \cdot (d_1 - t)}{d_p (d_p - 2t + d_1)}} -$$

сила поджатия ролика к заготовке; d_1 – внутренний диаметр резьбы, м; f_k – коэффициент трения качения, м; d_p – диаметр ролика, м; $d_{ц}$ – диаметр цапф, м; n_3 – число оборотов заготовки $\operatorname{мин}^{-1}$; η – КПД привода станка $\eta = 0,85-0,95$; $N_{эл}$ – мощность электродвигателя привода станка.

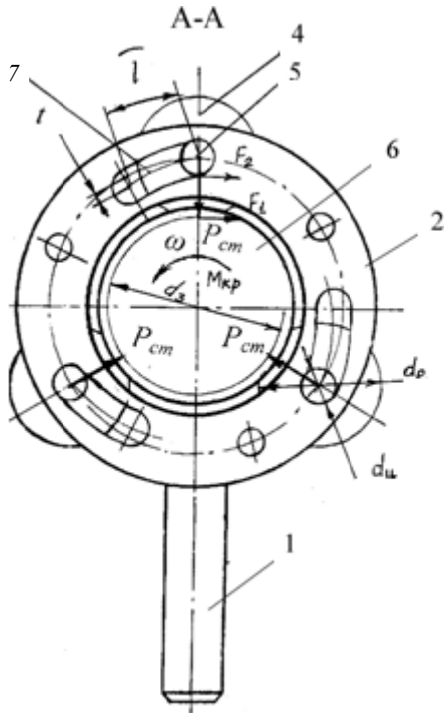


Рис. 2. Разрез А-А охватывающего инструмента для статико-импульсного упрочнения впадины резьбы на заготовке с предварительно нарезанной резьбой

Из схемы (рис. 3) можно рассчитать зависимость высоты микронеровностей поверхности Rz от параметров режимов обработки:

$$Rz = \frac{d_p}{3} \cdot \sin^2 \frac{\gamma}{2} = \frac{d_p}{3} \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot n_3}{n_{имп}}, \quad (3)$$

где γ – угол поворота заготовки за один импульс, рад; $n_{имп}$ – число (частота) импульсов, мин⁻¹; 3 – количество роликов.

Из схемы (рис. 4) можно рассчитать зависимость энергии удара, прикладываемого к инструменту, от глубины деформации:

$$G = HB \cdot \frac{\pi^2 \cdot R \cdot d_p \cdot t}{90^0} \arcsin \sqrt{\frac{t \cdot (d_1 - t)}{d_p (d_p - 2t + d_1)}}, \quad (3)$$

где G – энергия удара ролика, Дж; HB – твердость по Бринеллю Н/м²; R – радиус закругления впадины резьбы, м.

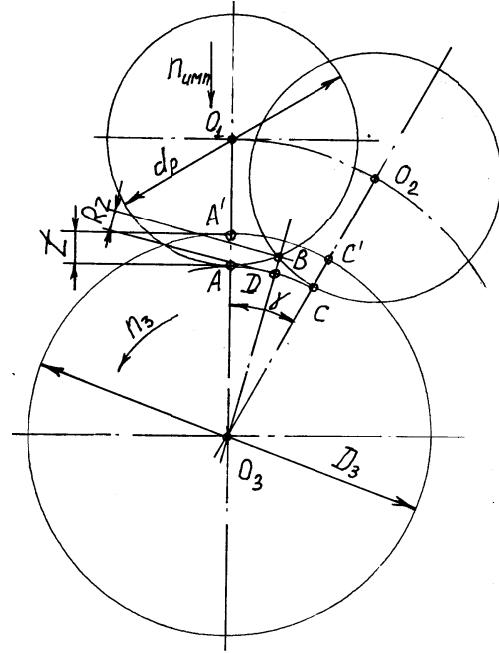


Рис. 3. Схема статико-импульсного накатывания впадины резьбы охватывающим инструментом с роликами для расчета шероховатости поверхности Rz

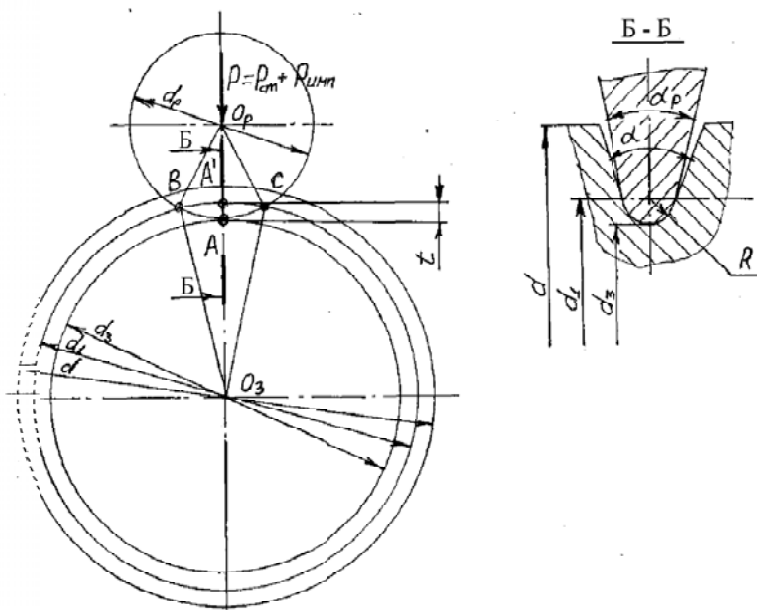


Рис. 4. Схема статико-импульсного накатывания впадины резьбы для расчета усилия и энергии деформации

При испытаниях заготовку из стали 40ХНМ2А твердостью НВ 226–253, с предварительно нарезанной резьбой М90×4 с припуском на диаметр $t = 0,5$ мм закрепили в трехкулачковом патроне токарного станка модели 1М63Н, мощность электродвигателя привода станка $N_{эл} = 11$ кВт. В резцедержателе закреплен генератор механических импульсов (отбойный молоток частотой импульсов $n_p = 4200$ мин⁻¹ и энергии удара $G = 3,1$ Дж), в бойке установлен волновод. Резьбонакатное кольцо с тремя роликами диаметром 28 мм и диаметром цапфы 9 мм из стали ХВГ с углом профиля 55° и радиусом у вершины $R = 0,58$ мм накручивается на заготовку с нарезанной метрической резьбой. Длина наклонных овальных отверстий $l = 20$ мм, что превышает предельную величину из условия самоподжима роликов $l_{min} = (11 - 33) \cdot t = 5,5 - 16,5$ мм. Скорость

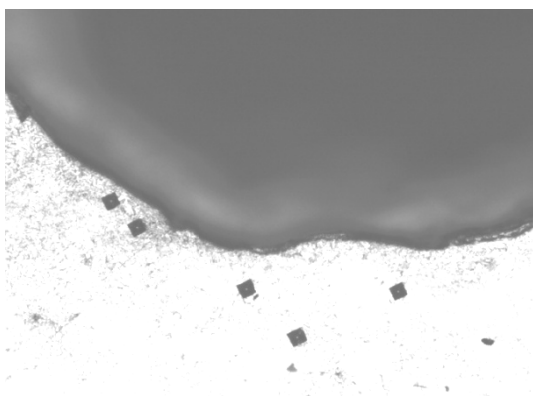


Рис. 5. Микроструктура в районе радиуса впадины резьбы после статико-импульсной обработки охватывающим инструментом с роликами

вращения шпинделя станка, в котором закрепляется обрабатываемая заготовка, $n = 10$ мин⁻¹, подача равна шагу нарезаемой резьбы $S = P = 4$ мм/об.

Испытаниями установлено, что производительность процесса повышается в 2,5...2,8 раза по сравнению со статико-импульсным накатыванием резьбы охватывающим инструментом. Размеры резьбы соответствуют требованиям точности 6g. Параметр шероховатости поверхности резьбы $Ra = 0,2$ мкм. Глубина упрочненного слоя $t = 0,25$ мм. Увеличение микротвердости и прочности наклепанного слоя составило в среднем 25 % (рис. 5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет параметров процесса обкатки вибрирующим роликом впадины резьбы / Н. И. Егоров, И. А. Небыков, П. И. Терпак, Д. В. Моисеева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 18–20.
2. Деформационное упрочнение радиуса впадины резьбы охватывающим кольцом с роликами / Н. И. Егоров, Ю. Н. Полянчиков, М. Ю. Полянчикова, О. А. Курсин // Современные технологии и управление : сб. науч. тр. III междунар. науч.-практ. конф. (20–21 нояб. 2014 г.) / ФГБОУ ВО Московский гос. ун-т технологий и управления им. К. Г. Разумовского (Первый казачий ун-т), Филиал в р. п. Светлый Яр Волгоградской области. – Светлый Яр, 2014. – С. 161–164.
3. Исследование охватывающего кольца с роликами для упрочнений радиуса впадины резьбы / Н. И. Егоров, Ю. Н. Полянчиков, М. Ю. Полянчикова, О. А. Курсин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 11). – С. 20–22.
4. П. м. 142563 РФ, МПК В21Н3/02. Охватывающий инструмент для статико-импульсного накатывания резьбы на заготовке с предварительно нарезанной резьбой / Н. И. Егоров, Ю. Н. Полянчиков, М. Ю. Полянчикова, О. А. Курсин ; ВолгГТУ. – 2014.

УДК 621.9.015

А. И. Ислямгалиев, А. А. Бондарев, Д. В. Крайнев, Н. В. Авторева

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Создана математическая модель, описывающая закономерности формирования шероховатости при точении с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности. Регрессионный анализ позволил выявить характер зависимости функции отклика и величину влияния каждого из факторов на нее. Предложена формула для расчета среднего арифметического отклонения профиля Ra , расширяющая возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки.

Ключевые слова: математическая модель, шероховатость, точение, опережающее пластическое деформирование (ОПД), углеродистая сталь, формула, расчет.

The mathematical model describing the laws of formation of a roughness at turning with advancing plastic deformation (APD) of the surface to be machined is created. The regression analysis has allowed to reveal the character of dependence of function of the response and measure of influence of each of factors on it. The formula for calculation of an average arithmetic deviation of profile Ra , expanding possibilities of application of a way of cutting with APD in machining practice is offered.

Keywords: mathematical model, roughness, turning, advancing plastic deformation (APD), carbon steel, formula, calculation.

Введение

На сегодняшний день механическая обработка материалов остается доминирующим методом формообразования поверхностей. Объектом настоящего исследования является точение конструкционных углеродистых сталей, которые широко применяются для изготовления деталей машин, шестерней, валов. В частности, операции обработки точением применяются в технологических процессах изготовления валов и других тел вращения, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости и качества поверхности. Повышение эффективности точения данных конструкционных углеродистых сталей предполагается за счет обеспечения повышения работоспособности режущего инструмента, производительности процесса и качества получаемых поверхностей.

Для решения задач, стоящих перед исследованием, используется способ точения с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности. Комбинированные методы резания с ОПД характеризуются наличием резервов существенного повышения эффективности механической обработки, при этом они не требуют специальных мер по обеспечению безопасности труда. Сущность комбинированной обработки с ОПД заключается в совмещении двух процессов – предварительного поверхностного пластического деформирования материала заготовки, создающего необходимые глубину и степень наклепа, и последующего съема упрочненного металла в виде стружки. Тем самым создаются условия, способствующие повышению эффективности механической обработки.

Отсутствие на сегодняшний день математических зависимостей, описывающих выходные параметры точения с ОПД по обрабатываемой поверхности, является существенным препятствием для успешного применения способа в практике токарной обработки. Для решения представленной проблемы построена математическая модель влияния основных параметров обработки на качество получаемой поверхности.

Основная часть

Для разработки математического аппарата прогнозирования шероховатости обработанной поверхности нам необходимы экспериментальные данные, которые мы получили в ходе исследования чистового точения (глубина резания $t = 0,5$ мм) углеродистой стали 20 (сортовой

прокат, состояние поставки, $\sigma_{0,2} = 296$ МПа). Инструмент был представлен сменными многогранными твердосплавными пластинами формы W ($\alpha = 0^\circ$ (ISO 1832–1991)); радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок $r = 0,8$ мм. Измерение параметров шероховатости обработанной поверхности выполнялось при помощи профилографа-профилометра «Абрис-ПМ7». Обработка выполнялась без смазочно-охлаждающих технологических сред. В качестве факторов, определяющих значение функции отклика (Ra), были выбраны: скорость резания, теплопроводность инструментального материала, подача и коэффициент ОПД.

$$K_{\text{ОПД}} = \frac{h_{\text{нак}}}{t}, \tag{1}$$

где $h_{\text{нак}}$ – глубина наклепанного поверхностного слоя, мм; t – глубина резания, мм.

Оценка степени влияния факторов на характер и величину функции отклика возможна только при условии сопоставимости значений всех переменных и собственно функции отклика. Поскольку рассматриваемые факторы имеют различный масштаб, необходимо выполнить нормирование исходных данных. В этом случае среднее значение нормированной величины принимается равным нулю, а стандартное отклонение – единице. Таким образом, нормированные значения различных величин перестают различаться по всем параметрам.

Для нормирования значения исходных данных приведены к диапазону (-1...+1). При этом нормированный уровень (-1) соответствует минимальному, (0) – среднему, а (+1) – максимальному значению рассматриваемой переменной.

В табл. 1 приведены принятые в исследовании натуральные и безразмерные (нормированные) значения факторов.

Таблица 1

Натуральные и безразмерные значения факторов

Факторы	Обозначение	Натуральные значения		
		-1	0	+1
Нормированное значение (уровень)	Z_i	-1	0	+1
Скорость резания, м/мин	X_1	90	135	180
Теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К	X_2	11 (ТН20)	27 (Т15К6)	50 (ВК6)
Продольная подача, мм/об	X_3	0,083	0,166	0,256
Коэффициент ОПД ($K_{\text{ОПД}}$)	X_4	0,001	1,8	3,6

В ходе проведения исследования был выявлен экстремальный характер изменения влияния ОПД обрабатываемой поверхности на эффективность процесса точения. С увеличением коэффициента ОПД для стали 20 до некоторой величины происходит снижение силы резания, достигая минимума при определенном отношении $h_{\text{нак}}$ к t (в нашем случае максимально эффективный $K_{\text{ОПД}} = 3,6$). Дальнейший рост $K_{\text{ОПД}}$ приводит к снижению эффективности процесса. Подобное влияние отмечено для обработки с ОПД в работах [2, 5]. Нижний уровень $K_{\text{ОПД}}$ по экспериментам равен 0 (в данном случае процесс резания происходил без ОПД), но для построения модели принимается равным 0,001 для возможности выполнения дальнейших расчетов, включающих логарифмирование. При этом допущении глубина наклепа была бы равна 0,0005 мм, что ничтожно мало. Таким образом, эта условность не повлияет на результат регрессионного анализа.

Для исследований приняты как наиболее часто рассматриваемые математические модели следующие спецификации:

1) линейная (аддитивная), вида:

$$R = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot \Phi_i; \quad (2)$$

2) степенная (мультипликативная), вида:

$$R = c_0 \cdot \prod_{i=1}^n \Phi_i^{c_i}; \quad (3)$$

3) показательная (мультипликативная), вида:

$$R = c_0 \cdot \prod_{i=1}^n c_i^{\Phi_i}, \quad (4)$$

где R – функция отклика; c_0 – постоянная составляющая функции отклика, не зависящая от значений рассматриваемых факторов Φ_i ; c_i – параметры, зависящие от степени влияния каждого рассматриваемого фактора; n – количество рассматриваемых факторов.

Суть математических методов планирования экспериментов заключается в том, чтобы получить математическую модель, которая будет связывать установленный параметр с варьируемыми факторами. Минимальный и достаточный объем статистической выборки, на основании которой выполняется моделирование, определяется в зависимости от спецификации модели и количества рассматриваемых переменных (в данной работе 4) и равен:

– для аддитивной модели:

$$k_{\min} = 2^n = 2^4 = 16; \quad (5)$$

– для мультипликативных моделей

$$k_{\min} = 3^n = 3^4 = 81, \quad (6)$$

где k_{\min} – количество независимых опытов при полном факторном эксперименте; n – число факторов.

Формальную оценку существования зависимостей можно дать, опираясь на величину коэффициента парной корреляции, который показывает вероятность существования линейной зависимости между двумя статистическими выборками равного объема. Аналогичным образом приближенно оценивается существование взаимосвязи между факторами.

На основании проведенных расчетов установлено, что выбранные факторы являются попарно взаимно независимыми и каждый из них оказывает влияние на величину функции отклика. Для оценки степени влияния каждого из факторов была построена многофакторная регрессионная модель.

Таким образом, выбранный способ нормирования позволяет получить линейные нормированные модели, для которых можно определить величины коэффициентов регрессии. Поскольку масштабные параметры нормированных моделей одинаковы для всех рассматриваемых факторов, то выполняется условие сопоставимости всех элементов аппарата и реализуется возможность корректной оценки степени влияния каждого из аргументов на характер и значение функции отклика.

Построение регрессионной зависимости после выполнения операции нормирования предполагает осуществление следующих, не зависящих от спецификации модели, последовательных расчетов [0, 4]: расчет коэффициентов регрессии для выбранных факторов; расчет коэффициента регрессии, определяющего влияние случайных факторов; расчет нормированных значений функции отклика; расчет критерия Стьюдента, определяющего существенность отличия коэффициентов регрессии от нулевых значений; оценка статистической значимости и определение степени влияния рассматриваемых факторов (для линейной, степенной и показательной моделей все анализируемые факторы оказались статистически значимыми); расчет прогнозируемых нормированных значений функции отклика с учетом статистической значимости факторов; расчет восстановленных (в реальном масштабе) значений функции отклика для нормированных рядов; оценка адекватности построенных моделей по величине F -критерия.

В табл. 2 представлены наиболее существенные результаты моделирования для проведения сравнения математических моделей.

Таблица 2

Сравнение регрессионных моделей для стали 20

Параметр	Спецификация модели		
	линейная	степенная	показательная
Оценка влияния факторов			
Случайные факторы	0,01	0,28	0,28
Скорость резания	-0,21	-0,16	-0,25
Теплопроводность инструментального материала	0,14	0,16	0,06
Подача	0,24	0,27	0,17
Коэффициент ОПД ($K_{\text{ОПД}}$)	-0,29	-0,11	-0,31
Достоверность адекватной модели, %	99,8	97,8	99,1
Оценка погрешности			
Стандартное отклонение	0,246	0,316	0,289
F-критерий	1,918	1,574	1,705
Средняя относительная погрешность, %	8,78	11,35	10,40

Анализируя данные табл. 2, можем сделать следующие выводы.

Средняя относительная погрешность (расхождение значений R_a , рассчитанных по модели и полученных опытным путем) линейной модели ниже аналогичных параметров степенной и показательной (8,78 % – линейная; 11,35 % – степенная; 10,40 % – показательная), что является преимуществом. Степень влияния на шероховатость поверхности случайных факторов, выражаемая соответствующим коэффициентом регрессии, у линейной модели равна по абсолютной величине 0,01, т. е. присутствие случайных факторов практически исключено. У степенной и показательной моделей влияние случайных факторов характеризуется абсолютной величиной 0,28, что весьма существенно на фоне принятых в исследовании факторов. Таким образом, линейная модель облегчает дальнейший прогноз качества поверхности после токарной обработки с ОПД, так как позволяет сделать вывод о том, что наиболее значимое влияние на шероховатость оказывают именно скорость резания, теплопроводность инструментального материала, подача, ОПД.

Коэффициенты регрессии линейной модели показывают, что на шероховатость поверхности стали 20 после токарной обработки с ОПД

в порядке возрастания оказывают влияние следующие факторы: теплопроводность инструментального материала, скорость резания, подача, ОПД. С увеличением скорости резания происходит уменьшение величины среднего арифметического отклонения профиля (коэффициент регрессии -0,21 для линейной модели), что соответствует традиционному представлению о влиянии скорости резания на шероховатость обработанной поверхности при точении углеродистых сталей. С ростом теплопроводности инструментального материала происходит повышение шероховатости получаемых поверхностей, которое объясняется воздействием теплофизических свойств контактирующих пар (инструмент-деталь) на характер протекания физических процессов в зоне резания (коэффициент регрессии +0,14 (линейная модель)). Применение ОПД позволяет значительно повысить качество обработанных деталей (коэффициент регрессии -0,29 (линейная модель)). С ростом подачи, в соответствии с традиционными сложившимися представлениями, шероховатость получаемых поверхностей становится хуже (коэффициент регрессии +0,24 для линейная модель).

Таким образом, для дальнейших расчетов выбирается линейная ввиду выше перечисленных преимуществ. Для удобства использования моделей и упрощения вычислений следует выразить их в виде формул.

На основании проведенного регрессионного анализа математическая модель влияния основных параметров обработки традиционным точением и точением с ОПД на показатель среднего арифметического отклонения профиля R_a обработанной поверхности реализуется в виде следующей зависимости:

$$R_a = 2,51 - 0,004 \cdot V + 0,008 \cdot \lambda + 3,08 \cdot S_o - 0,39 \cdot K_{\text{ОПД}}, \quad (7)$$

где V – скорость резания, м/мин; λ – теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К; S_o – подача, мм/об; $K_{\text{ОПД}}$ – коэффициент ОПД.

Эта формула позволяет рассчитать значение шероховатости при традиционном точении и с ОПД, т. е. спрогнозировать повышение эффективности процесса резания при изучаемом способе и учесть это в технологическом маршруте обработки. Диапазоны варьирования факторов (например, скорости резания 90–180 м/мин) и условия обработки для практического применения зависимости описаны в табл. 1.

Вывод

Разработанный математический аппарат прогнозирования описывает закономерности формирования шероховатости при точении с ОПД по обрабатываемой поверхности и традиционном точении стали 20. Так же она позволяет прогнозировать получаемую величину среднего арифметического отклонения профиля, определять величину прироста эффективности процесса резания за счет снижения величины параметра Ra получаемой поверхности при использовании ОПД и вносить соответствующие коррективы в базовый технологический процесс, в том числе, на этапе проектирования. Регрессионный анализ позволил выявить характер зависимости функции отклика и величину влияния каждого из факторов на нее. Предложена формула для расчета среднего арифметического отклонения профиля Ra, расширяющая возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки.

УДК 621.9.015

И. Н. Козачухненко, А. А. Бондарев, Д. В. Крайнев, Ю. Н. Полянчиков, Х. В. Хожамбердыев

**ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ
С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 30ХМА
С ПОЗИЦИИ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

В работе показаны результаты исследования, осуществленного резанием с опережающим пластическим деформированием (ОПД). С позиции дислокационных представлений о обработке металлов резанием дается обоснование снижения сил резания и улучшения качества поверхности при использовании ОПД.

Ключевые слова: качество поверхности, упрочнение зон резания, кристаллическая решетка, пластическое деформирование, резание.

In work the results of research which are carried out by cutting with the advancing plastic deformation (APD) are shown. From a position of dislocation ideas of processing of metals cutting, gives justification of decrease in forces of cutting and improvement of quality of a surface when using OPD.

Keywords: quality of surface hardening zones cutting the crystal lattice, plastic deformation, cutting.

Введение

Особые свойства жаропрочных конструкционных сталей обеспечивают им широкое применение в авиаиндустрии и машиностроении. Однако обработка жаропрочных сталей резанием весьма проблематична. Высокая пластичность указанных материалов приводит к значительному поглощению прикладываемой энергии (инструментом) и преобразованию ее в тепло. Малая теплопроводность приводит к резкому снижению отвода тепла

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
2. Ингеманссон, А. Р. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Ингеманссон А. Р. – Волгоград, 2012. – 209 с.
3. Разработка математической модели формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием / А. Р. Ингеманссон, Н. Г. Зайцева, Д. В. Крайнев, А. А. Бондарев // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: межвуз. науч. сб. / ФГБОУ ВПО «Уфимский гос. авиац. техн. ун-т». – Уфа, 2012. – С. 54–60.
4. Чигиринский, Ю. Л. Стохастическое моделирование в машиностроении: учеб. пособие / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская. Ю. М. Быков. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 68 с.
5. Ярославцев, В. М. Точение с опережающим пластическим деформированием: Учебное пособие по курсу «Технология машиностроения» / В. М. Ярославцев. – М.: Изд-во МГТУ, 1991. – 38 с.

в стружку и обрабатываемую заготовку, а следовательно, повышению температуры в зоне контакта режущей части инструмента и заготовки с активизацией процессов адгезии и диффузии. В результате этого значительно увеличиваются износ инструмента и разрушение режущих кромок. Интенсификации этих процессов способствуют повышенные механические характеристики обрабатываемого материала при высокой температуре, большая истирающая способность материалов, а также перемен-

ное воздействие этих факторов, обусловленное вибрациями. Все вышеописанное определенно влияет и на параметры качества обработанной поверхности.

Повышение эффективности процесса в данном случае может быть реализовано за счет резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности, совмещающего в себе два приема – поверхностное пластическое деформирование, создающее необходимые глубину и степень наклепа, и последующий сьем упрочненного металла в виде стружки.

Основная часть

Экспериментальные исследования проводились для полноточного и чистового точения жаропрочных конструкционных сталей. В качестве главного представителя группы применялась жаропрочная релаксационностойкая сталь 30ХМА. Сталь применяется при изготовлении шестерен, валов, цапф, шпилек и различ-

ных других деталей, работающих при температуре до 450–500 °С.

Спроектированное и изготовленное устройство для осуществления ОПД представлено на рис. 1 [1]. Конструкция позволяет выполнять ОПД и резание как одновременно за счет закрепления режущего инструмента в резцедержателе станка, так и поэтапно. Деформирующие элементы расположены оппозитно друг другу, что исключает негативное воздействие радиальной силы на работу подшипников шпинделя и задней бабки станка, а также обеспечивает достаточную жесткость системы, что позволяет обрабатывать длинные валы и оси. ОПД обкатыванием осуществляется роликами. Для определения режима осуществления ОПД использовалась характеристика комбинированной обработки – «коэффициент ОПД» [1]:

$$K_{\text{ОПД}} = \frac{h_{\text{нак}}}{t},$$

где $h_{\text{нак}}$ – глубина наклепанного слоя, созданного на этапе ОПД, мм; t – глубина резания, мм.

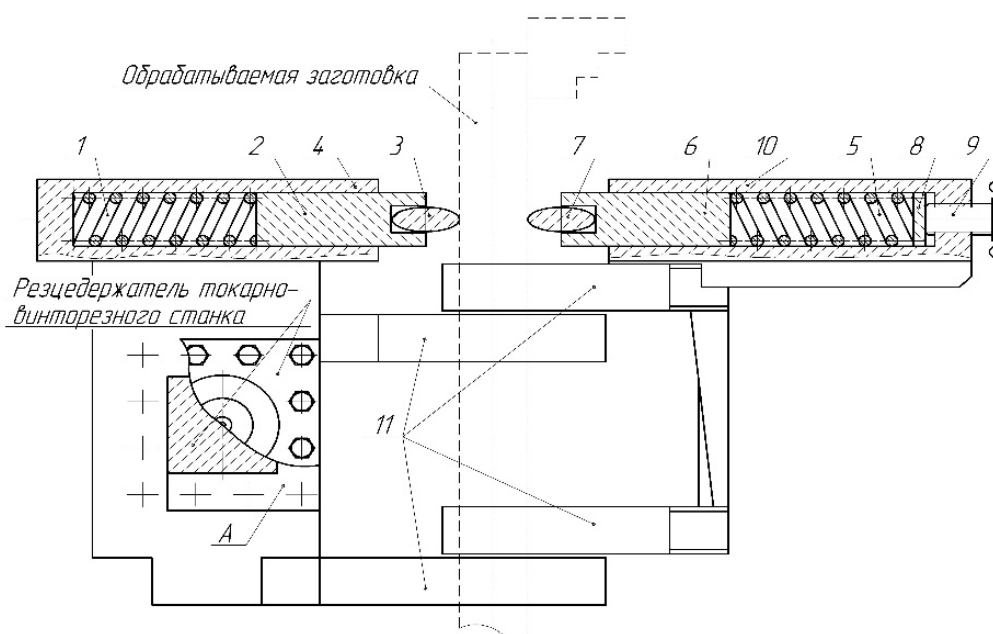


Рис. 1. Приспособление для токарной обработки с ОПД:
 1, 5 – пружины сжатия; 2, 6 – штоки; 3, 7 – несущие ролики; 4, 10 – стаканы;
 8 – толкатель; 9 – винт с трапецидальной резьбой; 11 – салазки

Улучшение обрабатываемости материалов при использовании ОПД обусловлено также эффектом технологической наследственности при пластической деформации резанием, заключающимся в том, что в предварительно упрочненном слое металла уже имеются источники дислокаций, а также дефекты в плоскостях скольжения, которые не потеряли способности к дальнейшему движению. Поэтому при допол-

нительном воздействии на материал (резание вслед за обкатыванием) имеющиеся источники несовершенств продолжают испускать новые дислокации, а старые продолжают перемещаться при меньшем уровне действующей нагрузки, т. е. режущим инструментом затрачивается меньшая работа на доведение их плотности до соответствующего разрушению значения. Наличие повышенной плотности дефектов кри-

сталлической решетки, а также источников, не потерявших способность испускать новые дислокации в металле, поступающем в зону резания после ОПД, приводит к уменьшению энергетических затрат на инициирование источников несовершенств, разрушение твердого тела и образование поверхностей раздела.

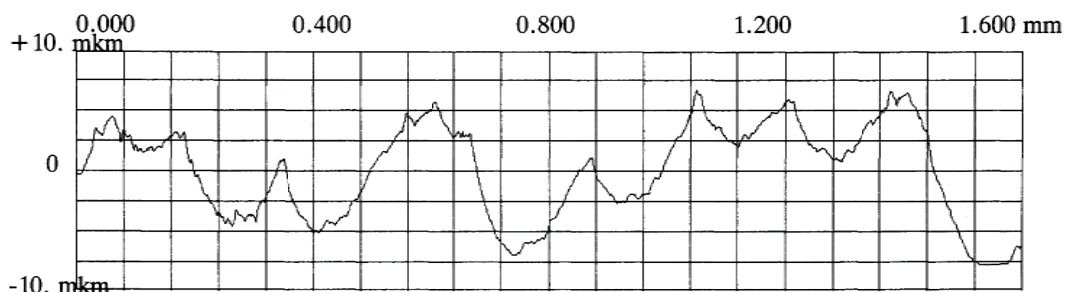
Плотность дислокаций, созданная в поверхностном слое заготовки на этапе ОПД, обуславливает снижение работы, совершаемой режцом, по доведению обрабатываемого материала до критического деформационно-энергетического состояния в области отделения стружки [3]. Это явление ответственно за снижение интегральной суммы напряжений, действующих в зоне первичных деформаций, и за уменьшение тангенциальной составляющей силы резания и соответствующего тепловыделения при использовании исследуемого способа по сравнению с традиционным точением.

Исследования обнаружили следующую закономерность. Применение способа точения с ОПД по обрабатываемой поверхности позволяет значительно уменьшить значения среднего арифметического отклонения профиля R_a обработанной поверхности по сравнению с традиционным точением. Данный аспект предпо-

лагает наличие резервов существенного повышения производительности процесса резания.

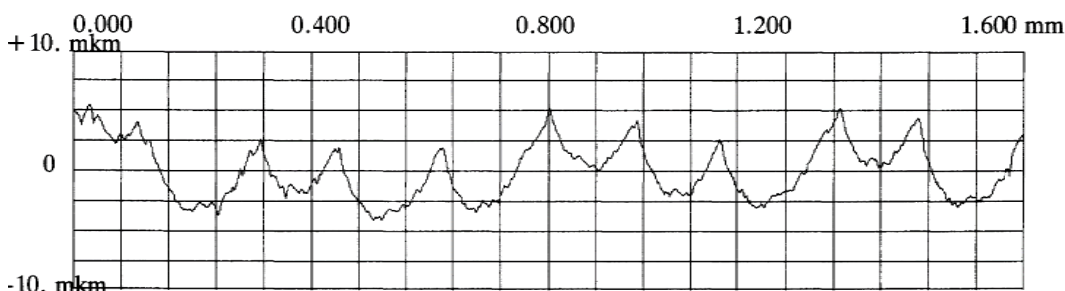
Кроме того, при увеличении подачи при прочих равных условиях возможно снижение износа инструмента благодаря сокращению рабочего пути, пройденного лезвием. Ранее в работе описаны возможности повышения производительности точения при использовании ОПД за счет увеличения работоспособности режущего клина. Таким образом, выбор различных комбинаций режимов обработки в двух указанных направлениях открывает возможности существенного повышения производительности, экономичности и качества процесса точения при применении ОПД.

Следует отметить, что благоприятное влияние опережающего пластического деформирования обеспечивается при условии неполного среза упрочненного слоя. Иными словами, в данном аспекте в полной мере проявляется фактор технологической наследственности. Влияние пластического деформирования на микропрофиль поверхности подробно описано в работах [2]. Так, применение ОПД позволяет уменьшить высоту выступов микронеровностей, а также увеличить относительную опорную длину. На рис. 2–3 показаны микропрофили поверхности при традиционном точении и точении с ОПД.



Вертикальное увеличение $\times 2000$; горизонтальное увеличение $\times 100$; цена деления 0,08 мм

Рис. 2. Микропрофиль поверхности, обработанной традиционным точением
(Сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6; $t = 0,5$ мм; $v = 180$ м/мин; $s_o = 0,166$ мм/об)



Вертикальное увеличение $\times 2000$; горизонтальное увеличение $\times 100$; цена деления 0,08 мм

Рис. 3. Микропрофиль поверхности, обработанной точением с ОПД
(Сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6; $t_p = 0,5$ мм; $v_p = 180$ м/мин; $s_o = 0,166$ мм/об; $K_{опд} = 1,6$)

В табл. 1 приведены данные, свидетельствующие о снижении значений среднего арифметического отклонения профиля Ra. Так, при точении с ОПД отмечено снижение значений среднего арифметического отклонения профиля Ra до 2 раз по сравнению с традиционной обработкой.

Исследования обнаружили возможность повышения производительности процесса резания

при использовании ОПД за счет увеличения подачи при заданном уровне среднего арифметического отклонения профиля Ra получаемой поверхности более чем в 3 раза по сравнению с традиционным резанием (табл. 2). Реализация того или иного повышения производительности точения связана с режимами и условиями обработки.

Таблица 1

Значения Ra поверхности, обработанной точением

Режимы и условия обработки	Ra, мкм		Снижение при точении с ОПД по сравнению с традиционным точением, %
	Традиционное точение	Точение с ОПД	
$v_p = 135$ м/мин; $s_o = 0,083$ мм/об; $t_p = 0,5$ мм; сталь 30ХМА – твердый сплав Т15К6. При точении с ОПД $K_{ОПД} = 2$	2,9	2,0	31
$v_p = 180$ м/мин; $s_o = 0,166$ мм/об; $t_p = 0,5$ мм; сталь 30ХМА – твердый сплав ВК6. При точении с ОПД $K_{ОПД} = 2$	3,3	2,5	24
$v_p = 180$ м/мин; $s_o = 0,083$ мм/об; $t_p = 0,5$ мм; сталь 30ХМА – твердый сплав ТН20. При точении с ОПД $K_{ОПД} = 2$	2,3	1,3	43

Таблица 2

Повышение производительности точения при использовании ОПД

Режимы и условия обработки		Традиционное точение		Точение с ОПД			Повышение производительности точения при использовании ОПД, %
		Ra, мкм	s_o , мм/об	Ra, мкм	s_o , мм/об	$K_{ОПД}$	
$v_p = 90$ м/мин; $t_p = 0,5$ мм; сталь 30ХМА	ВК6	3,0	0,083	3,0	0,166	1,8	200
	Т15К6	2,4	0,083	2,1	0,166	3,6	>200
	ТН20	3,0	0,083	2,8	0,256	1,8	>300
$v_p = 135$ м/мин; $t_p = 0,5$ мм; сталь 30ХМА	ВК6	2,9	0,083	2,6	0,256	1,8	>200
	Т15К6	2,3	0,083	2,2	0,256	3,6	>300
	ТН20	3,2	0,083	2,3	0,256	1,8	>300
$v_p = 180$ м/мин; $t_p = 0,5$ мм; сталь 30ХМА	ВК6	2,4	0,083	2,5	0,256	3,6	≈300
	Т15К6	2,3	0,083	2,3	0,256	1,8	300
	ТН20	2,0	0,083	2,0	0,256	1,8	300

Вывод

После резания с опережающим пластическим деформированием в поверхностном слое формируются остаточные сжимающие напряжения, что позволяет прогнозировать увеличение долговечности работы деталей. Кроме того, резко снижается шероховатость поверхности, что позволяет сократить число технологических переходов, а также улучшается микропрофиль поверхности (в частности, увеличивается длина опорной линии), что благоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приспособление для токарной обработки с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Поляничков, Д. В. Крайнев, А. Р. Ингеманссон, С. О. Щедриков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 7). – С. 39–42.
2. Чена, П. А. К вопросу формирования шероховатости при поверхностном пластическом деформировании / П. А. Чена // Высшая Академия Наук Белорусской ССР. – 1978. – № 21. – С. 31–35.
3. Старков, В. К. Дислокационные представления о резании металлов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 1979. – 160 с.
4. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания металлов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.

УДК 621.787.4

*Л. Р. Милованова, М. В. Стекольников***ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКОГО ОТВЕРСТИЯ***

Энгельский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО

«Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина»

E-mail: sarmilovanova@mail.ru

В статье решена осесимметричная теплофизическая задача при сверлении глубоких отверстий на основе предложенной математической модели расчета температуры по методу источников тепла с использованием принципов пространственно-временного соответствия и местного влияния. Рассчитана температура в зоне контакта инструмент-деталь, а также распределение температуры в теле заготовки (температурный градиент). Доказана адекватность предложенной математической модели, рассчитанные значения температур соответствуют экспериментальным данным.

Ключевые слова: тепловой источник, глубокое сверление, теплопроводность, метод источников тепла, принцип пространственно-временного соответствия.

The axisymmetric thermalphysic problem of deep-hole drilling has been solved in this artical, with the help of mathematical model calculation of temperature based on heat source method with spatio-temporal correspondence principal and local influence principal. The temperature in contact zone ‘tool-component’, and also the temperature field of work stock is calculated. Adequacy of the offered mathematical model is proved.

Keywords: heat source, deep-hole, thermo-conduction, heat sources method, principle space-temporary correspondence.

Детали с глубокими отверстиями изготавливают во всех областях машиностроения и приборостроения. Глубокие отверстия в основном сопряжены с подвижными элементами машин и механизмов, определяют их эксплуатационные характеристики, надежность и долговечность в работе. Отверстие считается глубоким, если отношение его длины к диаметру более 10. Однако на практике уже при обработке отверстия на глубину, превышающую три диаметра, наблюдаются трудности с выводом стружки, снижение стойкости сверла и производительности обработки. Технологии сверления глубоких отверстий отличаются от обработки обычных отверстий и требуют применения специфического оборудования и технологического оснащения, а именно, специальных режущего, вспомогательного, измерительного инструментов и приспособлений. При глубоком

сверлении к инструменту подается смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), это также определяет специфику не только процесса, но и применяемого оборудования и оснастки [1].

При сверлении отверстий возникает осесимметричная теплофизическая задача, связанная с расчетом температурного поля в обрабатываемой детали от действия источника теплоты в форме кольца с равномерным распределением интенсивности тепловыделения.

Изображение теплового процесса позволяет использовать фундаментальное решение уравнения теплопроводности для осесимметричных теплофизических задач, например, соотношение для расчета температурного поля в неограниченном теле с мгновенным источником мощностью q Дж/м в виде окружности радиусом r' , действующего в плоскости $z' = 0$ в момент времени $t = 0$ [2]:

$$\theta(r, z, t) = \frac{Q}{8c\rho(\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2 + (r')^2 + (z - z')^2}{4at}\right] I_0\left(\frac{rr'}{2at}\right), \quad (1)$$

где $Q = 2\pi r'q$; $I_0\left(\frac{rr'}{2at}\right)$ – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ –

коэффициент температуропроводности; $c\rho$ – объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности.

В соответствии с правилом изображения тепловой режим в теле с отверстием радиуса r_0 , на адиабатической поверхности которого действует кольцевой источник мощностью $Q = 2\pi r_0 q$, будет адекватен тепловому режиму в неограни-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-08-00669-а.

ченном теле в области $r \geq r_0$, если в последнем на окружности $r = r_0$ разместить кольцевой источник удвоенной мощности $Q_0 = 2Q$, а в точке $r = 0$ поместить сток теплоты мощностью $Q_c = -Q$.

В принятой схематизации теплового режима теплопередача в окружающую среду, обрабатываемую деталь и в инструмент не учитывается, поскольку эти условия теплообмена могут быть учтены соответствующим коэффициентом при решении балансовой задачи. При сверлении около 75 % теплоты переходит в обрабатываемую деталь.

В соответствии с принципом местного влияния [3] допустимо рассматривать температурное поле в детали как сумму двух полей: общего поля вдали от источника и местного поля непосредственно в пространстве источника. При этом, определяя общее поле, можно всемерно схематизировать источник теплоты, учитывая в то же время более точно условия теплоотвода. При расчете же местного поля условия теплоотвода могут быть схематизированы, в то время как распределения интенсивности местного источника должны быть наиболее полно учтены.

В связи с этим, рассчитывая местное температурное поле в детали, можно допустить следующую схематизацию. Обрабатываемую деталь условно представить неограниченным телом с цилиндрическим отверстием радиуса r_0 . Далее, имея в виду, что окружная скорость источника на несколько порядков больше скорости движения подачи, то по значению критерия

$$\text{Пекле } \text{Pe} = \frac{2VR}{a} \geq 10, \text{ такой быстро движущийся}$$

местный источник в пределах одного оборота детали можно считать пространственным мгновенным кольцевым [4] с распределением интенсивности в направлении радиуса r и координаты z по нормальному закону Гаусса:

$$q(r', z') = q_0 \exp \left[-k \frac{(r_0 - r')^2 + (z')^2}{R^2} \right]. \quad (2)$$

В соответствии с принципом пространственно-временного соответствия [5], чтобы перейти от решения, описывающего температурное поле в неограниченном теле с мгновенным кольцевым источником (1) к соответствующему решению с нормально-тороидальным источником (2), достаточно в соотношении (1) к временной координате t добавить постоянную времени

$$t_0 = R^2 / 4ak,$$

где R – характерный размер источника тепла, m ; k – коэффициент сосредоточенности интенсивности источника.

Известно, что для малых промежутков времени, то есть для больших значений аргумента функции Бесселя, в соотношениях (1) допустима замена

$$I_0 \left[\frac{rr'}{2at} \right] \approx \frac{\exp \left[\frac{rr'}{2at} \right]}{\sqrt{2\pi \frac{rr'}{2at}}}.$$

После преобразований для малых промежутков времени решение, описывающее тепловой режим в неограниченном теле с отверстием радиуса r_0 с нормально-тороидальным источником, при $r' = r_0, z' = 0$, получим в виде соотношения

$$\theta(r, z, t) = \frac{Q}{8\lambda\pi^2 \sqrt{rr_0} \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \exp \left[-\frac{(r - r_0)^2 + z^2}{4a \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \right]. \quad (3)$$

Если местное поле учитывает процесс нагрева детали за промежуток времени, соответствующий одному обороту источника, то общее поле должно учитывать накопление теплоты за все время обработки и вызванный этим дополнительный нагрев.

В соответствии с принципом местного влияния допустимо принять, что каждый отдельно взятый виток источника, предшествующий последнему, определяющему местное поле, – это мгновенный тепловой импульс, предельно сосредоточенный по направлениям радиуса и образующей. Основываясь на этом, можно процесс аккумуляции теплоты в теле представить следующей схемой.

Предположим, что теплоисточник J_0 (рис. 1), определяющий местное поле в области около диаметрального сечения $z = 0$, возникает в момент времени $t = 0$. Следовательно, предыдущий виток источника при угловой скорости ω и величиной подачи S за один виток источника (на схеме – мгновенный кольцевой источник J_1) завершился раньше в момент времени $t_1 = 2\pi / \omega$ на расстоянии $z_1 = S$ от источника J_0 .

Еще раньше в момент времени $t_2 = 2t_1$ и на расстоянии $z_2 = 2z_1$ действовал кольцевой источник J_2 , и так далее вплоть до первого мгновенного

венного кольцевого импульса J_m , возникшего в момент времени $t_m = 2\pi m / \omega$ в положении $z_m = mS$. В соответствии с принятой схемой, накопление теплоты в детали может быть представлено как повышение температуры местного поля каждым мгновенно-кольцевым источником, то есть

$$\theta_0 = \sum_{i=1}^m \theta_i(J_i).$$

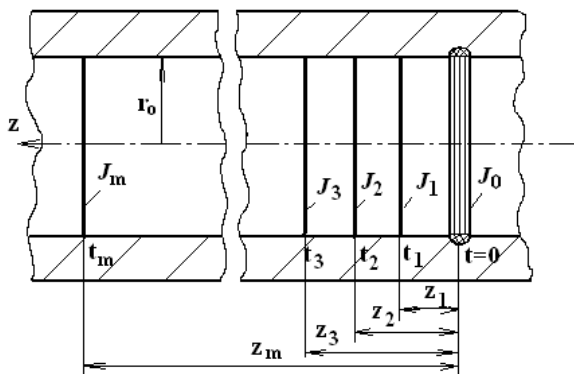


Рис. 1. Схема к расчету аккумуляции теплоты в теле с отверстием

Поскольку повышение температуры местного поля от каждого источника определяется за достаточно короткий промежуток времени, то для расчета температуры общего поля можно использовать соотношение (3), положив

$r = r_0, t_i = 2\pi m / \omega, z_i = mS$, получим выражение

$$\theta_0 = \frac{Q}{16\pi^3 \lambda r_0} \sum_{i=1}^m \frac{\omega}{m_i} \exp\left[-\frac{\omega S^2}{8\pi a} \cdot m_i\right]. \quad (4)$$

Влияние стока теплоты, который учитывается при изображении процесса в неограниченном теле, можно учесть с использованием соотношения (1). В этом случае следует в последнем положить $r' = 0, r = r_0, z = z_i, t = t_i, I_0(0) = 1$. В результате получим, что снижение температуры местного поля за m витков источника теплоты (при $t_i = 2\pi m / \omega, z_i = mS$) определяется соотношением

$$\theta_c = \frac{-Q_c}{8c\rho(\pi a)^{3/2}} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\omega}{2\pi m_i}\right)^{3/2} \exp\left[-\omega \frac{r_0^2 + (Sm_i)^2}{8\pi a m_i}\right]. \quad (5)$$

Таким образом, в соответствии с приемами изображения для тела, ограниченного изнутри отверстием, местное поле в области действия нормально-тороидального источника рассчитывается по формуле (3); повышение температуры местного поля за счет аккумуляции теплоты определяется соотношением для общего температурного поля (4) и снижение температуры местного поля, вызванное стоком теплоты для каждого из m_i кольцевых источников, рассчитывается по формуле (5).

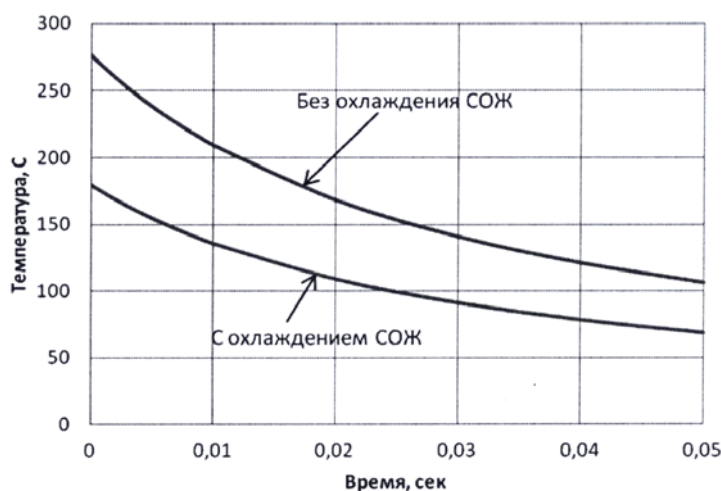


Рис. 2. Зависимость температуры на поверхности отверстия от времени при сверлении стали 45

$$\left(\lambda = 60 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}; a = 0,08 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; c\rho = 5,02 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}; R = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; P_o = 2174 \text{ Н}; k = 2\pi; r = r_0; z = 0\right)$$

На рис. 3 и 4 показаны уровень аккумуляции теплоты в детали и действие стока теплоты для следующих параметров процесса: $r_0 = 0,01$ м; $V = 25$ м/с; $S = 0,25$ мм/об при обработке стали 45.

Как показывают расчеты, на некоторое повышение температуры местного поля оказывают влияние не более шести витков источника (рис. 3). Как видно из рис. 4, сосредоточенный

сток теплоты не оказывает влияния при обработке отверстия диаметром 10 мм, влияние происходит когда $r_0 < 5$ мм.



Рис. 3. Влияние аккумуляции теплоты на температуру на поверхности отверстия

В рамках выполнения научной работы проводилось сверление глубоких отверстий диаметрами 10 и 20 мм специальными сверлами для глубокого сверления. Обработка велась на универсальном токарном станке модели 16К20, модернизированном для глубокого сверления. Во время обработки сверлением проводилось экспериментальное исследование температуры в зоне контакта инструмент-деталь, а также распределения тепла в обрабатываемой детали, так как, по данным литературных источников,

при сверлении около 75 % теплоты переходит в обрабатываемую деталь.

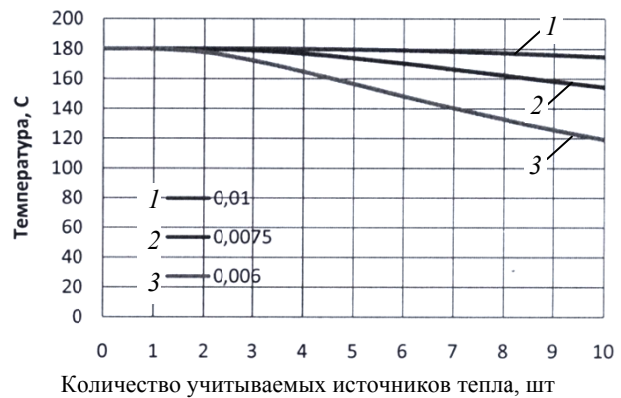


Рис. 4. Влияние стока теплоты на температуру в центре нормально-тороидального источника в зависимости от радиуса кольцевого источника ($r_0 = 0,01$ м, $r_0 = 0,005$ м, $r_0 = 0,004$ м)

Были проанализированы особенности различных методов экспериментального исследования тепловых явлений (метод искусственных и естественных термопар, пирометрический метод, метод термочувствительных красок, метод оплавления чистых металлов и другие) и предложено измерять температуру методом искусственной термопары.

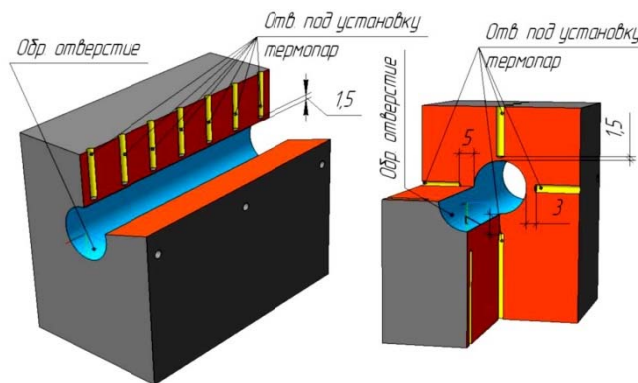


Рис. 5. Схема расположения каналов под установку термопар в обрабатываемой детали

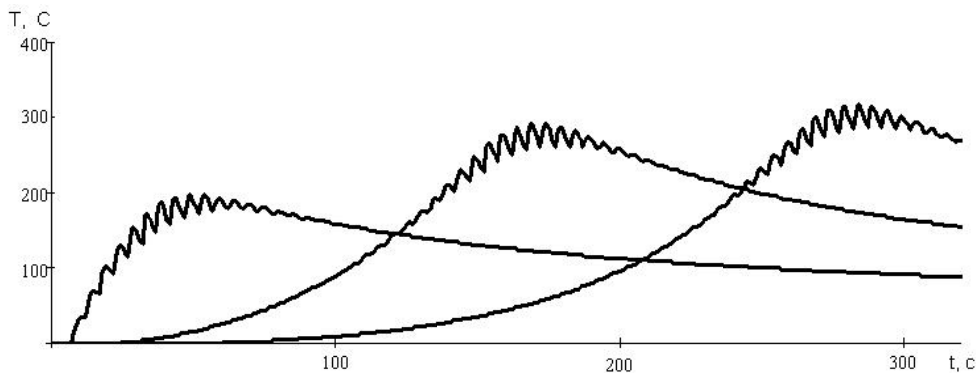


Рис. 6. Графики изменения температур для точек, расположенных на разном расстоянии от торца заготовки

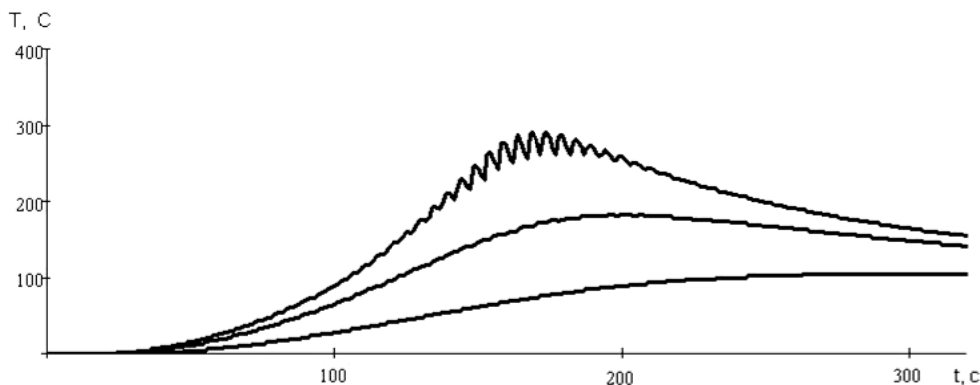


Рис. 7. Графики изменения температур для точек, расположенных на разной глубине от поверхности отверстия

Так как теоретическое исследование показало, что максимальная температура не должна превышать 300 °С (без охлаждения СОЖ) и 180 °С (при охлаждении СОЖ), то для измерения температуры использовались стандартные термопары типа хромель-алюмель. Термопары были подведены через отверстия диаметрами 2 мм в зону обработки в соответствии с разработанной схемой (рис. 5), которая позволила отследить изменение температуры в материале вдоль оси отверстия, а также в плоскости перпендикулярной оси отверстия. Определить значение температуры непосредственно в зоне контакта инструмент-деталь стало возможно теоретически на основании экспериментально полученного градиента температур (рис. 6 и 7).

Выводы:

1. Обоснован метод изображения осесимметричного температурного поля в теле, ограниченном изнутри цилиндрическим отверстием как адекватный ему тепловой режим в неограниченном теле с использованием фиктивных (отраженных) источников теплоты.

2. Показано, что тепловой режим в теле с отверстием, возникший в процессе механической обработки, может быть условно расщеплен на местное и общее температурные поля, при этом местное поле определяет температуру непосредственно в области действия местного источника, а общее температурное поле определяет повышение тепловой напряженности местного поля за счет аккумуляции теплоты в обрабатываемой детали.

3. Экспериментально доказана адекватность предложенной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – М.: Высш. Школа, 1974. – 590 с.
2. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
3. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
4. Рыкалин, Н. Н. Теория нагрева металла местными источниками теплоты / Н. Н. Рыкалин // Тепловые явления при обработке металлов резанием: сб. науч. тр. – М.: НТО Машпром, 1959. – С. 14–45.
5. Барац, Я. И. Метод расщепления уравнения теплопроводности при решении теплофизических задач, возникающих при механической обработке / Я. И. Барац, Л. Р. Милованова // Вестник СГТУ. – 2010. – № 1 (44). – С. 28–34.

УДК 620.186.82

В. А. Носенко, А. А. Александров

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СРЕДНИМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЗЕРЕН ШЛИФПОРОШКОВ И РАЗМЕРОМ ЯЧЕЙКИ КОНТРОЛЬНОГО СИТА

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: nosenko@volpi.ru

Проведено исследование взаимосвязи между различными геометрическими параметрами зерен шлифовального порошка из карбида кремния черного зернистостей F120 и F180, рассеянного на фракции, и размером ячеек контрольных сит. Вычислены и проанализированы коэффициенты парной корреляции.

Ключевые слова: шлифовальный порошок, геометрические параметры, коэффициент корреляции, коэффициент достоверности аппроксимации.

A study of the relationship between the various geometrical parameters of the grinding grains of silicon carbide black powder grits F120 and F180, scattered into factions, and a mesh size of test sieves is performed. Bivariate correlation coefficients are calculated and analyzed.

Keywords: grinding powder, geometric parameters, correlation coefficient, confidence factor of approximation.

Контроль зернистости и зернового состава шлифовальных порошков в соответствии с ГОСТ Р 52381 осуществляется методом рассева на контрольных ситах. Зернистость задается размерами ячеек в свету двух контрольных сит, которые, по сути, выполняют функцию предельного калибра.

Ситовой метод контроля определяет ширину зерна b . Через ячейку сита зерно может проходить различным образом, в том числе и по диагонали ячейки. Поэтому наибольшая ширина зерен шлифовальных порошков, задерживаемая нижним контрольным ситом b_{\max} , может существенно превышать размер ячейки проходного сита. Например, для алмазного шлифовального порошка $b_{\max} = \eta \cdot W_b$, где W_b – размер ячейки верхнего сита, η – коэффициент пропорциональности, изменяющийся от 1,43 до 1,64 [1].

Средний эффективный размера зерен основной фракции шлифовальных порошков из электрокорунда, монокорунда и карбида кремния (ГОСТ 3647) $V = 0,984 \cdot W_n + 0,058$, где W_n – размер ячейки задерживающего сита W зерен основной фракции [2].

Если размер ячейки сита измеряется в мешах M , расчет среднего диаметра частиц d абразивных материалов определяют зависимостью $d = 17,479 \cdot M^{-1,0315}$, $R^2 = 0,998$, где R – коэффициент достоверности аппроксимации [3].

Для микропорошков карбида кремния зеленого зернистостей М14-М40 получены следующие корреляционные зависимости между средними значениями геометрических параметров зерен длиной l , шириной b , периметром P , площадью S , приведенным диаметром d и нижним размером ширины зерен основной фракции Z по ГОСТ 3647: $l=0,9Z$, $R^2=0,98$; $b=0,67Z$, $R^2=0,98$; $P=2,54Z$, $R^2=0,99$; $S=0,73Z^{1,84}$, $R^2=0,98$; $d=0,71Z$, $R^2=0,98$ [4, 5].

Для алмазных порошков АС4-АС65 (ГОСТ 9206–80) взаимосвязь размера ячейки W_n задерживающего сита с шириной и средней толщиной зерна определена следующей формулой [6]:

$$W = 0,4358 \cdot b \sqrt{2 \cdot \left(1 + \left(\frac{h}{b} \right)^2 \right)}$$

Таким образом, большинство исследований геометрических размеров шлифовальных порошков выполнены для зернистости в целом или отдельных фракций. Геометрические размеры шлифовальных порошков из электрокорунда исследованы в большей степени, чем из

карбида кремния и, в частности, карбида кремния черного.

Исходя из этого цель данной работы заключалась в исследовании взаимосвязи между геометрическими параметрами зерен шлифовальных порошков из карбида кремния черного 54С зернистостей F120 и F180, классифицированных по зерновому составу.

С использованием программного обеспечения [7] измеряли следующие параметры зерен: ширина b , длина l , периметр P и площадь S . По S рассчитывали приведенный диаметр d . Методика измерений приведена в работах [8–11]. С целью повышения достоверности результатов измерений шлифовальный порошок рассеивали по ГОСТ Р 52381 на контрольных ситах по зерновому составу. Объем выборки зерен для измерения геометрических параметров от 700 до 1500 штук. Геометрические параметры зернового состава шлифовальных порошков двух зернистостей сопоставляли с размером ячеек верхнего (проходного) сита W_n .

На основе полученных данных рассчитан коэффициент парной корреляции между W_b и средними геометрическими параметрами зерен (табл. 1). В соответствии с классификацией Четдока значения коэффициентов свидетельствуют об очень высокой силе связи между исследуемыми параметрами.

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции

Параметры	l_c	b_c	P_c	d_c
W_b	0,94	0,96	0,96	0,97
$W_c = \frac{W_n + W_b}{2}$	0,97	1,00	0,99	1,00

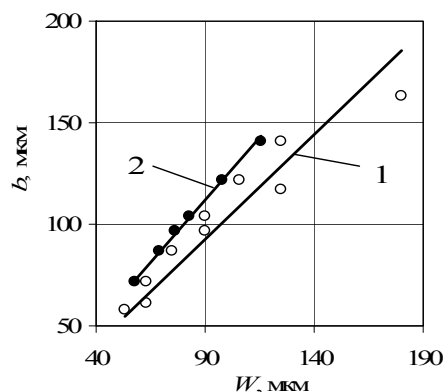
Взаимосвязь между W_b и b_c , l_c , P_c , d_c аппроксимирована прямой пропорциональной зависимостью 1, между W_b и S_c – степенной зависимостью (рисунок, табл. 2). На рисунке линии аппроксимации обозначены пунктиром.

Из рисунка следует, что средние значения параметров, соответствующие в каждой зернистости размеру ячейки первого проходного сита, расположены ниже линии аппроксимации.

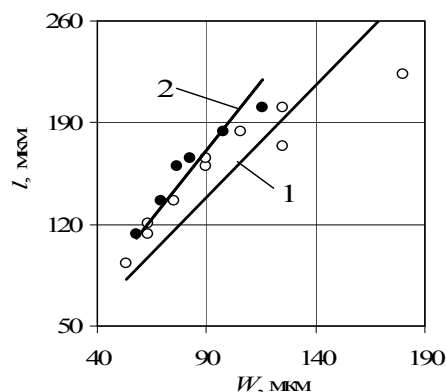
В соответствии с ГОСТ Р 52381 при контроле зернового состава вся проба шлифовального порошка должна проходить через первое контрольное сито. С целью гарантированного обеспечения этого требования шлифовальный порошок не может содержать крупных зерен,

ширина которых препятствовала бы их прохождению через первое контрольное сито. На втором и последующих ситах при контрольном расसेве всегда образуется остаток шлифовального порошка. Из этого следует, что условия формирования данной фракции (по ГОСТ Р 52381 – остаток на втором сите) отличаются от

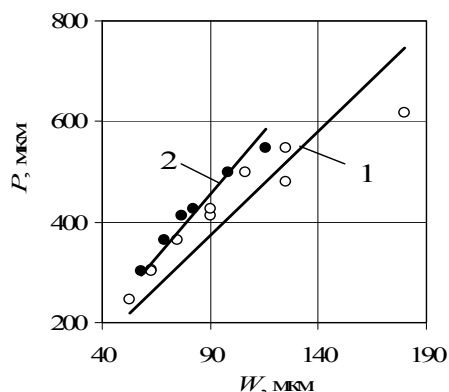
условий формирования остальных фракций. В результате шлифовальный порошок, прошедший через первое сито и задержанный на втором, будет обеднен зернами крупного размера. Соответственно средний размер зерен этой фракции будет занижен по сравнению с ожидаемым. Это согласуется с данными рисунка.



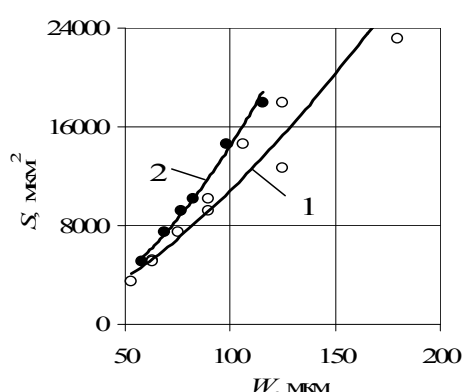
а



б



в



г

Зависимости b (а), l и d (б), P (в), S (г) от размеров ячейки контрольных сит W :
1 – размер ячейки верхнего сита; 2 – средний от размеров ячеек верхнего и нижнего сит

Таблица 2

Зависимости и коэффициент достоверности аппроксимации

Начальная	После корректировки
$b = 1,029W_{\text{в}}, R^2 = 0,88$	$b_{\text{к}} = 1,245W_{\text{с}}, R^2 = 0,99$
$l = 1,533W_{\text{в}}, R^2 = 0,61$	$l_{\text{к}} = 1,898W_{\text{с}}, R^2 = 0,86$
$P = 4,149W_{\text{в}}, R^2 = 0,73$	$P_{\text{к}} = 5,057W_{\text{с}}, R^2 = 0,94$
$S = 8,716W_{\text{в}}^{1,5473}, R^2 = 0,95$	$S_{\text{к}} = 1,970W_{\text{с}}^{1,8963}, R^2 = 0,99$
$d = 1,115W_{\text{в}}, R^2 = 0,80$	$d_{\text{к}} = 1,360W_{\text{с}}, R^2 = 0,97$

В связи с отличием условий формирования фракции 2 полученные средние значения геометрических параметров данной фракции целе-

сообразно исключить из общей выборки при установлении взаимосвязи между средними геометрическими параметрами фракций шлифовальных порошков и размером ячейки проходного сита.

Условиями формирования отличается и последняя фракция 6 (по ГОСТ Р 52381 – остаток на поддоне). При расसेве данной фракции отсутствует задерживающее сито. Поэтому среднее значение геометрических факторов последней фракции также целесообразно исключить при установлении взаимосвязи.

Следующая особенность состоит в том, что координате оси абсцисс 90 мкм соответствует пара значений параметров, относящихся к раз-

личным зернистостям. Большие значения параметров получены на меньшей зернистости шлифовального порошка.

Различия в средних значениях геометрических параметров выборок зерен объясняются различными размерами ячеек задерживающего сита. При расसेве шлифовального порошка зернистостью F120 ячейка задерживающего контрольного сита 63 мкм, зернистостью F180 – 75 мкм. В результате фракция 5 при расसेве шлифовального порошка зернистостью F120 будет содержать большее количество мелких зерен, чем фракция 3 шлифовального порошка зернистостью F180.

Появление парных значений возникает и при использовании в качестве исходного параметра ячейки нижнего задерживающего сита. Поэтому, в качестве исходного параметра всех фракций принято среднее W_{ic} из двух размеров ячеек контрольных сит (верхнего и нижнего).

Коэффициент парной корреляции откорректированных параметров приведен в табл. 1. Его значения для рассмотренных пар выше, чем в исходном варианте.

Зависимости, полученные для откорректированных параметров, приведены на рисунке. Коэффициент достоверности аппроксимации этих зависимостей R^2 заметно больше, чем до корректурки (см. табл. 2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакуль, В. Н. Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка / В. Н. Бакуль // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 22–27.
2. Мгеладзе, В. Ф. Зависимость среднего объема единичного зерна основной фракции от размера ячейки задерживающего сита / В. Ф. Мгеладзе, И. В. Лавров, Н. А. Мартыненко // Абразивы. – 1971. – № 1. – С. 1–4.

3. Momber, A. Blast Cleaning Technology. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2008. – 550 с.

4. Носенко, В. А. Статистические параметры геометрических размеров зерен микрошлифпорошков карбида кремния / В. А. Носенко, И. А. Макушкин, А. А. Шегай // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 7). – С. 32–34.

5. Носенко, В. А. Технология шлифования : монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко. – ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 424 с.

6. Никитин, Ю. И. Исследование процессов ситовой классификации микропорошков из синтетических алмазов / Ю. И. Никитин, С. М. Уман, С. С. Ярославская // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 6. – С. 21–24.

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

8. Носенко, В. А. Определение геометрических параметров абразивных зерен / В. А. Носенко, А. А. Александров // Инновационные технологии в обучении и производстве : матер. VIII всерос. науч.-практ. конф., г. Камышин, 23–25 нояб. 2011 г. В 3 т. Т. 2 / КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – С. 110–113.

9. Носенко, В. А. Корреляция геометрических параметров зерен в пробах шлифовального порошка из карбида кремния черного марки 54CF60 / В. А. Носенко, А. А. Александров // Материалы Международной научно-технической конференции (Брянск, 2014 г.). – Брянск: НДМ, 2014. – С. 3–7.

10. Носенко, В. А. Взаимосвязь между геометрическими параметрами зерен шлифовального порошка и размером ячеек контрольных сит / В. А. Носенко, А. А. Александров // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2013. – Т. III, № 6. – С. 54–56.

11. Носенко, В. А. Геометрические параметры зерен шлифовального порошка карбида кремния черного 54CF60 производства Волжского абразивного завода / В. А. Носенко, А. А. Александров, Е. Ф. Ганшу // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 9. URL: www.science-education.ru/117-12798.

УДК 621.922

В. А. Носенко², С. В. Носенко², А. В. Авилон², В. О. Харламов¹, В. И. Бахмат²

СОДЕРЖАНИЕ ТИТАНА В НАНОСЛОЯХ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОСЛЕ МИКРОЦАРАПАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА*

¹Волгоградский государственный технический университет

²Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: nosenko@volpi.ru

Методом микрорентгеноспектрального анализа исследовано содержание титана в поверхности площадки износа кристалла карбида кремния после микроцарапания сплава VT1-00. Концентрацию титана измеряли на поверхности и в поперечном микросечении площадки износа.

Ключевые слова: титан, карбид кремния, микроцарапание, площадка износа, микрорентгеноспектральный анализ, микросечение, концентрация титана.

By method of micro X-Ray spectral researches the content of titanium in the surface of the pad wear crystal silicon carbide alloy after a microscratching of alloy VT1-00 is probed. The concentration of titanium on the surface was measured and the transverse pad wear micro-cross.

Keywords: titanium, silicon carbide, microscratching, playground wear, micro X-Ray spectral researches, micro-cross, the concentration of titanium.

* Выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-08-97043

Титановые сплавы относятся к числу наиболее адгезионно активных металлов, что является основной причиной их плохой обрабатываемости шлифованием [1–3]. При абразивной обработке металл налипает на вершины зерен, поэтому затупление инструмента происходит не в результате образования больших площадок износа на вершинах, а в результате налипания металла. Для снижения интенсивности адгезионного взаимодействия и повышения эффективности шлифования в зону контакта вводят специальные вещества, препятствующие взаимодействию титана с абразивным материалом [4]. Из числа наиболее распространенных абразивных материалов для шлифования титановых сплавов применяют карбид кремния [5, 6], обладающий меньшей склонностью к взаимодействию с титаном, чем корунд.

Контактное взаимодействие карбида кремния с титаном и его сплавами рассмотрено в работах [7–10]. Показаны особенности формирования рельефа обработанной поверхности и площадки износа кристалла карбида кремния, приведены данные по химическому составу контактных поверхностей.

В данной работе исследовано содержание титана в нанослоях поверхности площадки износа кристалла карбида кремния после микроцарапания технически чистого титана и удаления налипшего металла методом травления.

Состояние рельефа и химический состав обработанной поверхности изучали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac. Микроскоп оснащен двумя колоннами: электронной и ионной. Наличие двух колонн позволяет осуществлять всестороннее визуальное исследование объектов при различном увеличении, проводить химический анализ

в нанослоях поверхности и препарировать объекты непосредственно в камере прибора.

Исследования проведены при моделировании процесса шлифования микроцарапанием единичными кристаллами. В качестве абразивного материала использовали карбид кремния зеленый производства ОАО «Волжский абразивный завод». Микроцарапание осуществляли на плоскошлифовальном станке с продольной подачей стола 7 м/мин на скорости микрорезания 35 м/с и первоначальной глубине микроцарапания 15 мкм. Методика экспериментов приведена в работе [11].

Исследования химического состава выполнены на поверхности площадки износа кристалла карбида кремния (рис. 1, *a*). Концентрацию титана измеряли на выделенном участке поверхности методом микрорентгеноспектрального анализа при различном ускоряющем напряжении электронов активации. Как следует из рис. 1, *б*, с увеличением энергии активации концентрация титана снижается, что объясняется увеличением объема и глубины зоны генерации.

Максимальную глубину зоны генерации оценивали по формуле Канайя-Окаямы, определяющей максимальную длину пробега электронов для заданного значения энергии зонда [12]:

$$R = 0,0276 \frac{AZ^{-8/9}}{\rho} (E_0^{5/3} - E_{\text{КР}}^{5/3}), \quad (1)$$

где R – максимальная длина пробега электрона, мкм; E_0 – энергия электрона возбуждения, кэВ; $E_{\text{КР}}$ – энергия характеристического рентгеновского возбуждения, кэВ; Z – средний атомный номер материала; A – средняя атомная масса; ρ – плотность материала, г/см³. Необходимо отметить, что формула (1) очень приближенная и дает лишь оценочное значение данных величин [13].

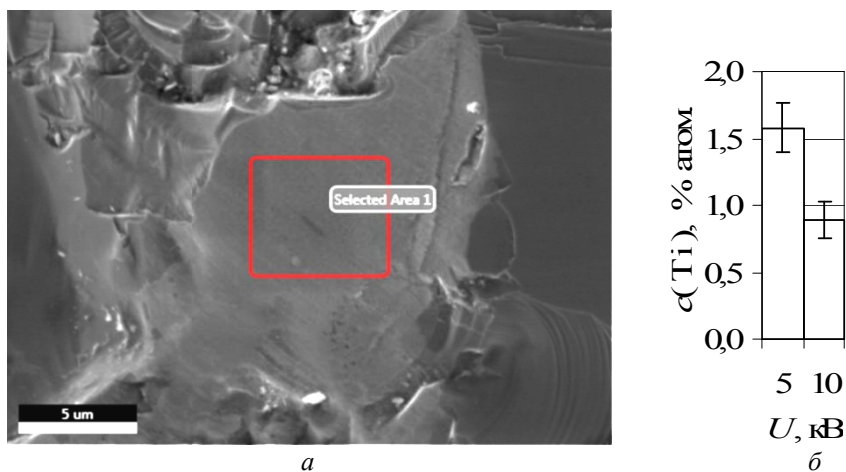


Рис. 1. Поверхность кристалла после травления титана с выделенной поверхностью сканирования (*a*) и содержание титана в выделенной поверхности (*б*)

При $U = 5$ кВ у атомов титана могут возбуждаться только электроны уровня L . Как показали расчеты по формуле (1), глубина зоны генерации рентгеновского характеристического излучения $Ti\ La$ составляет около 320 нм. С увеличением U до 10 кВ возбуждаются электроны уровня $Ti\ Ka$, глубина зоны генерации

которых достигает 700 нм.

Перед приготовлением микросечения на поверхность кристалла наносили слой платины 1 (рис. 2, *a*). Содержание химических элементов определяли при сканировании от слоя платинового покрытия по линии 2. Ускоряющее напряжение также принимали равным 5 и 10 кВ.

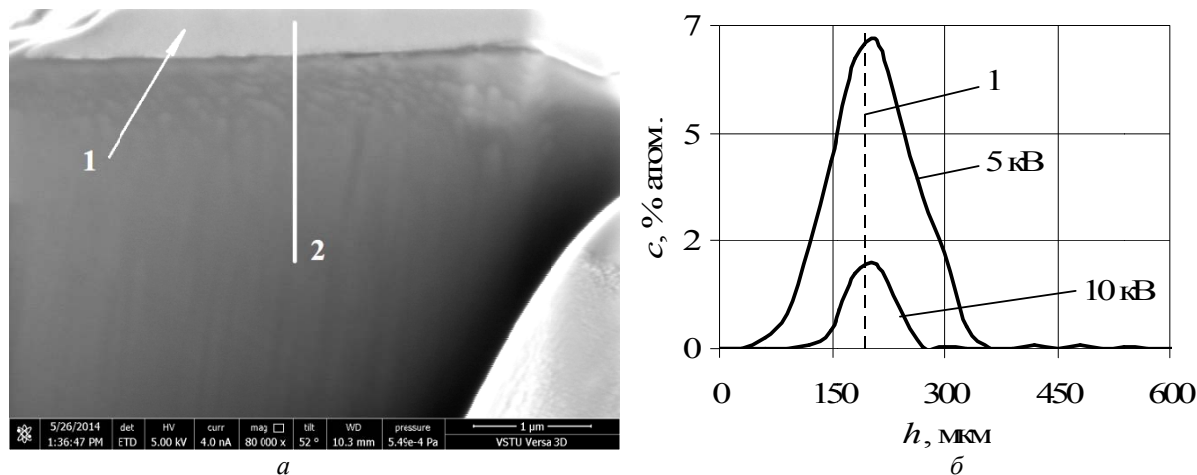


Рис. 2. Микросечение с линией сканирования (*a*) и изменение концентрации титана c по глубине сканирования h (*б*)

При сканировании по линии 2 максимальная концентрация титана в зоне раздела платинового покрытия и карбида кремния достигает 8,5 % атом. (рис. 2, *б*). По сравнению с концентрацией титана, полученной при съемке, когда электронный зонд направлен перпендикулярно поверхности (см. рис. 1, *б*), максимальная концентрация титана возросла почти в 4 раза. С увеличением U максимальная концентрация титана при сканировании по линии снижается до 1,4 % атом. Но и в этом случае ее значение в 2 раза выше, чем при съемке перпендикулярно площадке износа кристалла. Из этого следует, что метод измерения концентрации в поперечном микросечении границы раздела двух поверхностей при малом содержании элемента является более результативным.

Относительно линии раздела 1 поверхностей платинового покрытия и кристалла плотность распределения концентрации титана имеет некоторую асимметрию со смещением в сторону кристалла карбида кремния (рис. 2, *б*). Данный факт свидетельствует о том, что повышенное содержание титана сосредоточено в приповерхностном слое кристалла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носенко, В. А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного материала при шлифовании /

В. А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 73–77.

2. Носенко, В. А. Технология шлифования : монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко. – ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 424 с.

3. Носенко, В. А. Попутное и встречное глубинное шлифование поверхности неполного цикла с периодической правкой круга / В. А. Носенко, В. К. Жуков, А. А. Васильев, С. В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 44–50.

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

5. Саютин, Г. И. Выбор инструмента и СОЖ при шлифовании титановых сплавов / Г. И. Саютин, В. А. Носенко, Н. И. Богомолов // Станки и инструменты. – 1981. – № 11. – С. 15–17.

6. Носенко, В. А. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования / В. А. Носенко, Н. Ф. Ларионов, Н. И. Егоров, М. П. Волков // Вестник машиностроения. – 1989. – № 5. – С. 17–21.

7. Носенко, В. А. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности карбида кремния после микроцарапания титана / В. А. Носенко, С. В. Носенко, А. В. Авиллов, В. И. Бахмат // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 69–79.

8. Носенко, С. В. Исследование химического состава поверхностного слоя титанового сплава при шлифовании его кругом из карбида кремния без использования СОТС / С. В. Носенко, В. А. Носенко, А. А. Крутикова, Л. Л. Кременецкий // СТИН. – 2015. – № 1. – С. 26–29.

9. Носенко, С. В. Морфология и химический состав поверхности сплава ВТ3-1 при шлифовании без СОТС / С. В. Носенко, В. А. Носенко, Л. Л. Кременецкий // Изв-

тия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 21 (148) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 12). – С. 32–35.

10. Носенко, В. А. Структура и химический состав поверхности карбида кремния после микроцарапания титана / В. А. Носенко, С. В. Носенко, А. В. Авиллов, В. И. Бахмат // Машиностроение : сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 14–20. – Режим доступа : <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-4-3.pdf>.

11. Носенко, В. А. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В. А. Носенко,

С. В. Носенко, А. В. Авиллов, В. И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 66–71. – Режим доступа: <http://indust-engineering.ru/issues/2014/2014-3-11.pdf>.

12. Kanaya, K., Okayama, S. Penetration and energy loss theory of electrons in solid targets // J. Phys. D. – 1972. – No.5. – P. 43–58.

13. С. Дж. Б. Рид. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии ; пер. с англ. Д. Б. Петрова, И. М. Романенко, В. А. Ревенко. – М. : Техносфера РИЦ ЗАО, 2008. – 229 с.

УДК 621.922

В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦЕПЕЙ МАРКОВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗНОСА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: nosenko@volpi.ru

Разработана модель износа абразивных зерен при шлифовании с использованием теории Марковских случайных процессов.

Ключевые слова: шлифование, абразивный инструмент, абразивное зерно, изнашивание, закон распределения.

A model of the wear of the abrasive grains during grinding using the theory of Markov processes.

Keywords: grinding, abrasive tool, work surface, model, strength, wear, abrasive grain, chipping, distribution law.

В процессе шлифования качество обрабатываемой поверхности взаимосвязано с рельефом рабочей поверхности абразивного инструмента. В результате взаимодействия с обрабатываемым материалом вершины абразивных зерен изнашиваются, некоторые зерна вырываются из связки. Это приводит к изменению их распределения. При разработке математических моделей рельефа рабочей поверхности абразивного инструмента используют методы стохастического и имитационного моделирования. Большие трудности при моделировании вызывают необходимость учета различных видов изнашивания и скачкообразное изменение положения вершин зерен при скалывании. Наиболее перспективным направлением совершенствования методики моделирования рельефа рабочей поверхности абразивного инструмента следует считать использование Марковских процессов [1, 2]. Целью работы является моделирование распределения вершин абразивных зерен при шлифовании с использованием Марковских случайных процессов.

Основные положения и принятые допущения разрабатываемой модели

Разобьем рабочий слой абразивного круга на элементарные слои толщиной $\Delta R(K)$, равной его радиальному износу за один K -й оборот [1,

2]. Начало первого слоя совместим с наиболее выступающими вершинами. Разделим всю совокупность слоев на три зоны. Зона 1 ограничена максимальной величиной неровностей шероховатости обрабатываемой поверхности. Зона 2 – это зона максимально возможного перемещения вершин зерен после скалывания в зоне 1. В зоне 3 распределение вершины определяется условиями правки. Все разновидности изнашивания рабочей поверхности абразивного инструмента объединены в три вида: механическое истирание, скалывание вершины зерна, вырывание из связки. Под истиранием понимается радиальный износ вершины, не превышающий износ величины одного слоя. Конечным видом изнашивания вершины зерна за оборот-круг будем считать тот, при котором износ имеет максимальное значение. Тогда вероятности изнашивания вершины зерна, расположенного в некотором i -м слое, будут составлять полную группу за один цикл контакта с обрабатываемым материалом (оборот круга):

$$A + B + C = 1,$$

где A , B , C – вероятности соответственно вырывания, скалывания и истирания контактирующей с материалом вершины.

Примем, что в результате износа вершины скалыванием образуется только одна новая вер-

шина. Введем понятие состояния вершины. Если вершина до скалывания находилась в i -м слое рабочей поверхности, а новая вершина после скалывания образовалась в j -м слое, будем говорить, она перешла из состояния i в состояние j . Будем считать, что за один оборот круга возможно не более одного изменения состояния вершины. Допускаем, что новое состояние j после скалывания зависит только от состояния i до скалывания и не зависит от прошлых состояний вершины. Количество возможных новых состояний является конечным множеством. При скалывании возможен переход только в одно из состояний этого множества. Таким образом, можно считать, что процесс изменения состояния вершин при скалывании является Марковским случайным процессом с дискретным временем и конечным числом исходов, т. е. цепью Маркова.

Математическая модель износа вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента

Рассмотрим плотность распределения вершин зерен n (шт/мм²) по слоям рабочей поверхности инструмента. Представим это распределение в зонах 1, 2, 3 в виде вектора-строки:

$$Z_1 = [n(1) \dots n(N)]; \quad Z_2 = [n(N+1) \dots n(N+M)];$$

$$Z_3 = [n(N+M+1) \dots n(N+M+L)].$$

Общее распределение представим в виде блочного вектора-строки:

$$Z = [Z_1 \quad Z_2 \quad Z_3]. \quad (1)$$

Вероятности контакта вершин зерен представим в виде диагональной матрицы порядка N , равному числу слоев в зоне 1:

$$P = \text{diag} \{ P_K(1) \quad \dots \quad P_K(i) \quad \dots \quad P_K(N) \}.$$

$$I = (c_{i,j})_{i=1, j=1}^{N, N}, \text{ где } \begin{cases} c_{i,j} = 1 & \text{при } i=1 \quad j=2; \\ c_{i,j} = 0 & \text{при } i=j=1; \quad i=j=N; \quad j < i; \quad j > i+1; \\ c_{i,j} = 1 - \frac{\Delta h_c(i)}{\Delta R} & \text{при } j=i; \\ c_{i,j} = \frac{\Delta h_c(i)}{\Delta R} & \text{при } j=i+1; \end{cases}$$

где $\Delta h_c(i)$ – износ истиранием вершины зерна расположенного в i -м слое; ΔR – радиальный износ круга за один оборот.

Результатом произведения вектора-строки Z_C

Результатом произведения вектора-строки Z_1 на матрицу P будет вектор-строка Z_K числа вершин, контактирующих в зоне 1:

$$Z_K = Z_1 \cdot P = [z_K(1) \quad \dots \quad z_K(i) \quad \dots \quad z_K(N)].$$

Вектор-строка вершин зерен, не вступающих в контакт с материалом, определяется как разность:

$$Z_H = Z_1 - Z_K.$$

Вероятности изнашивания вершин в результате скалывания B , истирания C и вырывания из связки A в различных слоях рабочей поверхности зоны 1 также представим в виде диагональных матриц порядка N :

$$B = \text{diag} \{ A(i) \}; \quad C = \text{diag} \{ A(i) \};$$

$$A = \text{diag} \{ A(i) \}. \quad (2)$$

Значения вероятностей определяют в зависимости от силы резания, прочности зерна и твердости круга [2, 3].

Вектор-строка распределения вершин зерен, изнашиваемых соответственно в результате вырывания, скалывания или истирания:

$$Z_A = Z_K \cdot A; \quad Z_B = Z_K \cdot B; \quad Z_C = Z_K \cdot C.$$

Все комбинации изменения состояний вершин при скалывании в пределах зоны 1 и 2 представим в виде матрицы переходных вероятностей:

$$S = (p_{i,j})_{i=1, j=1}^{N, N+M}; \quad p_{i,j} = 0 \text{ при } j \leq i.$$

Переходная вероятность определяется по закону распределения износа вершины зерна при скалывании [4, 5].

Количество всех вершин зерен, перешедших в новое состояние (j -й слой) в результате скалывания в нижележащих i -х слоях, при $i < j$:

$$n_B = Z_B \cdot S = [n_B(1) \quad n_B(2) \quad \dots \quad n_B(j) \quad \dots \quad n_B(N+M)],$$

где $n_B(1) = 0$.

Матрица переходных вероятностей в результате истирания [2]:

на матрицу I является распределение перемещаемых по слоям вершин зерен при истирании:

$$n_C = Z_C \cdot I = [n_C(1) \quad n_C(2) \quad \dots \quad n_C(j) \quad \dots \quad n_C(N)],$$

где $n_C(1)=0$.

Поэтому матрица переходных вероятностей $v_{i,j}$ в результате вырывания представляет собой нулевую матрицу:

$$V = (v_{i,j})_{i=1, j=1}^{N, N};$$

где $v_{i,j} = 0$ при любых i, j .

Вектор-строка новых состояний вершин зе-

$$Z_s = [Z_w Z_3] = [n_s(1) \dots n_s(j) \dots n_s(N+M) \dots n_s(N+M+L)], \quad (3)$$

После каждого оборота вершины всех зерен перемещаются к периферии на величину радиального износа круга, т.е. на один слой. Для описания этого перемещения введем матрицу переходных вероятностей D :

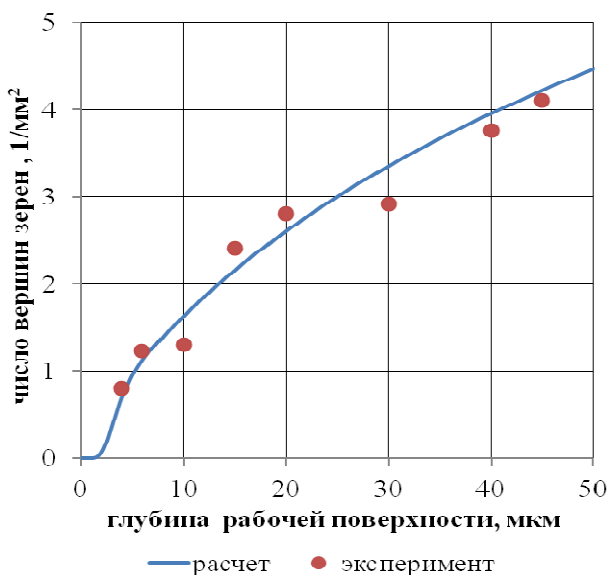
$$D = (d_{i,j})_{i=1, j=1}^{N, N+M+L};$$

$$\begin{cases} d(i,j) = 1 \text{ при } j = i - 1 \\ d(i,j) = 0 \text{ в остальных случаях,} \end{cases} \quad (4)$$

где $d(i,j)$ – вероятность перехода вершин из слоя i в слой $j = i - 1$ в результате износа круга за один оборот. Окончательный результат перемещений вершин зерен после одного оборота круга:

$$Z = Z_s \cdot D.$$

Для вычислений на следующем обороте данный вектор-строку необходимо снова представить в виде (1) и повторить вычисления.



Распределение вершин зерен на рабочей поверхности круга при шлифовании стали 45

Проверка адекватности разработанной модели выполнена для условий плоского шлифования стали 45 HRC 52, кругом 1 200x20x76

рен в зонах 1 и 2 с учетом всех трех видов изнашивания:

$$Z_w = [Z_{и} Z_2] + N_B,$$

где $Z_{и} = Z_H + N_C$.

Общее распределение зерен по глубине рабочей поверхности после их изнашивания можно представить в виде блочного вектора-строки:

25А F60 L 6 В на режиме: $t = 0,005$ мм/ход; $v = 28$ м/с; $v_s = 9$ м/мин. За период шлифования круг сделал 3000 оборотов. На рисунке представлены результаты расчета накопленной суммы числа вершин зерен по глубине рабочей поверхности и экспериментальные данные, полученные измерением на профилографе-профилометре «Сейтроник ПШ8-3». Установлено, что максимальное отклонение теоретического распределения от экспериментального не превышает 15 %.

Выводы

Разработана математическая модель распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента с использованием Марковских случайных процессов, учитывающая изнашивание вершин зерен в результате истирания, скалывания и вырывания. Результаты шлифования стали 45 кругом из электрокорунда белого на бакелитовой связке, показали удовлетворительную сходимость теоретических и экспериментальных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носенко, В. А. Математическая модель формирования рабочей поверхности круга при шлифовании / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Инструмент и технологии. – 2010. – № 30–31. – С. 151–154.
2. Носенко, В. А. Шлифование адгезионно-активных металлов : монография / В. А. Носенко. – М. : Машиностроение, 2000. – 262 с.
3. Носенко, В. А. Вероятности разновидностей изнашивания зерен абразивного инструмента при шлифовании / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, С. В. Носенко, М. В. Даниленко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 3. – С. 63–71.
4. Носенко, В. А. Определение износа шлифовальных зерен скалыванием и закона его распределения / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 8. – С. 43–48.
5. Патент № 2375693 РФ. Способ определения эксплуатационной характеристики единичных абразивных зерен / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, М. В. Даниленко, С. В. Носенко. – № 2008129990/28 ; заяв. 21.07.2008, опубл. 10.12.2009.

УДК 621.9.015

*А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Н. Г. Зайцева, А. А. Жданов***ОСОБЫЙ ВИД КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ
КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ЕГО ВЛИЯНИЕ НА СИЛЫ РЕЗАНИЯ
И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

Рассматриваются контактные процессы при токарной обработке твердосплавными инструментами коррозионно-стойких сталей и их влияние на характер изменения составляющих силы резания. Описаны особенности механизма формирования микронеровности обработанной поверхности. Приведены уточненные математические зависимости по определению составляющих силы резания и параметра шероховатости Ra с целью использования их в САПР ТП на стадии проектирования технологического процесса.

Ключевые слова: составляющие силы резания, реальная схема резания, зона относительного застоя, шероховатость, термоЭДС пробного прохода, САПР ТП.

There is a contact processes for turning carbide tools stainless steels and their influence on the behavior of the components of the cutting force are considered. The features of the formation mechanism of the treated surface asperities are described. The refined mathematical relationships to determine the components of the cutting force and roughness parameter Ra in order to use them in CAD TP at the design stage of the process are given.

Keywords: the components of the cutting force, the actual cutting scheme, zone of relative stagnation, roughness, thermoEMF, probe passage, CAD TP.

Коррозионно-стойкие стали относятся к классу труднообрабатываемых материалов [1]. Эти стали имеют высокую степень упрочнения в процессе деформации резанием, сохраняют исходную прочность и твердость при повышенных температурах, что приводит к высоким удельным нагрузкам на контактные поверхности инструмента в процессе резания. Обработка коррозионно-стойких сталей сопряжена с низким качеством получаемых поверхностей, повышенным износом инструмента и, как следствие, вынужденным занижением режимов резания. Им присущи и ряд других особенностей протекания контактных процессов.

В отличие от конструкционных сталей они имеют принципиально иной характер изменения теплопроводности от температуры резания (скорости резания), т. е. теплопроводность коррозионно-стойких сталей с повышением температуры резания (скорости резания) не уменьшается, а растет. Иное изменение теплопроводности коррозионно-стойких сталей от температуры резания по иному влияет на характер изменения составляющих сил резания и механизм формирования параметра шероховатости Ra.

Применение станков с ЧПУ и компьютерных технологий в металлообработке ориентировано на широкое использование систем автоматического проектирования на стадии подготовки технологического процесса (САПР ТП). В структуре САПР ТП в обязательном порядке содержится модуль расчета режимов обработки, в ко-

тором алгоритмы расчета основных параметров обработки, таких как составляющие силы резания, скорости резания, точности обработки и качества обработанной поверхности построены на использовании математических моделей указанных параметров, содержащихся в справочно-нормативной литературе.

Однако в справочниках [1], [2], отсутствуют математические модели по определению величины радиальной составляющей P_y и осевой P_x , значения которых используются при расчете точности обработки, определению зажимных усилий автоматизированных зажимных патронов на этапе проектирования технологического процесса. Отсутствуют и математические зависимости для расчета параметра шероховатости Ra. Все это является сдерживающим фактором использования САПР ТП для обеспечения надежности определения режимов обработки коррозионно-стойких сталей на автоматизированном станочном оборудовании.

С целью восполнения пробела в методиках расчета указанных величин и разработки математических моделей были проведены эксперименты по измерению составляющих силы резания и параметра шероховатости Ra при токарной обработке группы коррозионно-стойких сталей в диапазоне скоростей 10–100 м/мин.

Исследования проводились для следующих контактных пар: сталь 14X17H2 – твердый сплав ВК8, сталь ЭИ961(13X11H2B2MФ) – Т15К6, сталь 20X13 – ВК8, глубина резания

$t = 1$ мм, подача $S = 0,11$ мм/об. Резание без применения СОЖ.

Были получены экспериментальные данные по влиянию теплофизических свойств контактных пар «коррозионно-стойкие стали – твердые сплавы» на характер изменения составляющих силы резания.

Измерение составляющих силы резания производилось тензометрическим токарным динамометром ДКМ 2010 (фирмы «TeLC» Германия), интегрированным с персональным компьютером. Конструкция динамометра обеспечивала повышенную точность измерения (погрешность 0,1 %).

На рис. 1–3 представлены графики зависимости составляющих силы резания от скорости резания при обработке коррозионностойких

сталей, их отличительный характер по сравнению с обработкой конструкционных сталей, который необъясним с позиций условной схемы резания. В чем проявляются эти отличия?

Характер изменения горизонтальных составляющих силы резания P_x и P_y в отличие от обработки конструкционных и малолегированных сталей совершенно иной. При обработке стали 14X17H2 резцом Т5К10 и стали ЭИ961 резцом Т15К6 составляющая P_x имеет тенденцию к увеличению своего значения по мере увеличения скорости резания. Составляющая P_y неоднозначно зависит от скорости резания в исследованном диапазоне скоростей 10–100 м/мин. Сначала ее значения снижаются, достигая минимума в районе 30 м/мин, затем проявляется четкая закономерность увеличения вплоть до 100 м/мин.

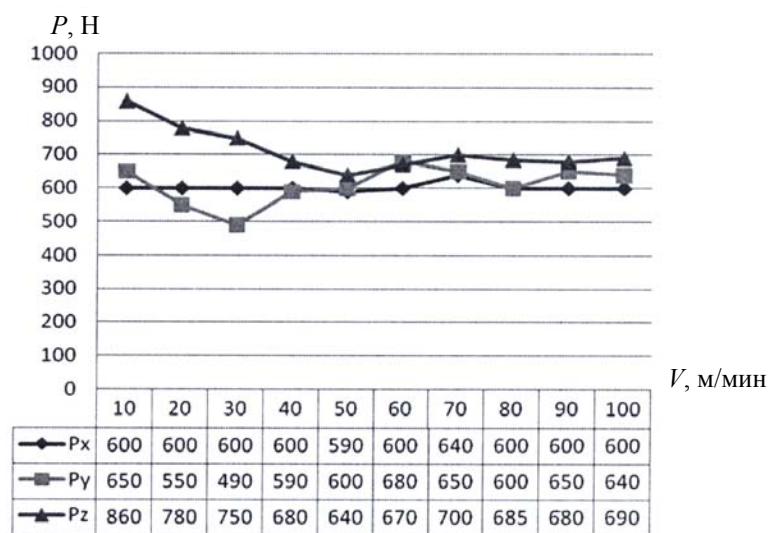


Рис. 1. Характер изменения составляющих силы резания при токарной обработке стали 14X17H2 твердосплавным резцом Т5К10 в диапазоне скоростей 10–100 м/мин ($t = 1$ мм, $S = 0,11$ мм/об)

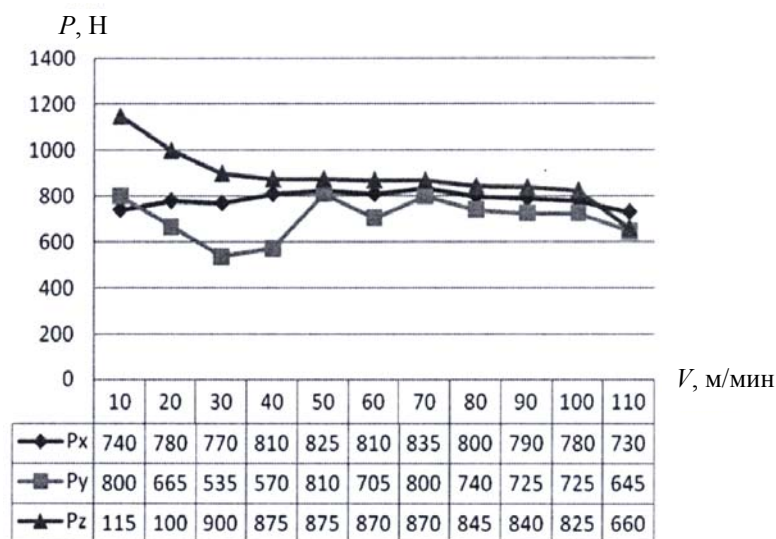


Рис. 2. Характер изменения составляющих силы резания при токарной обработке стали ЭИ961 твердосплавным резцом Т15К6 в диапазоне скоростей 10–100 м/мин ($t = 1$ мм, $S = 0,15$ мм/об)

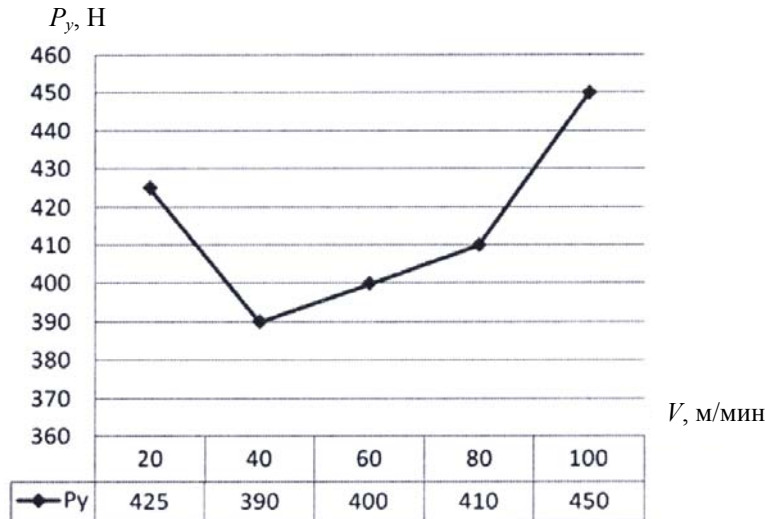


Рис. 3. Характер изменения составляющей силы резания P_y при токарной обработке стали 20X13 твердосплавным резцом BK8 в диапазоне скоростей 10–100 м/мин ($t = 1$ мм, $S = 0,11$ мм/об)

Иной характер изменения составляющей P_y обнаружен при обработке аустенитной стали 12X18Н10Т безвольфрамовым сплавом ТН20 (рис. 4) в диапазоне скоростей 10–70 м/мин. В этом диапазоне значение P_y постоянно возрас-

тает при увеличении скорости резания. Составляющая P_z по мере увеличения скорости резания во всей серии опытов монотонно снижалась, что по характеру изменения повторяет процесс обработки углеродистых и конструкционных сталей.

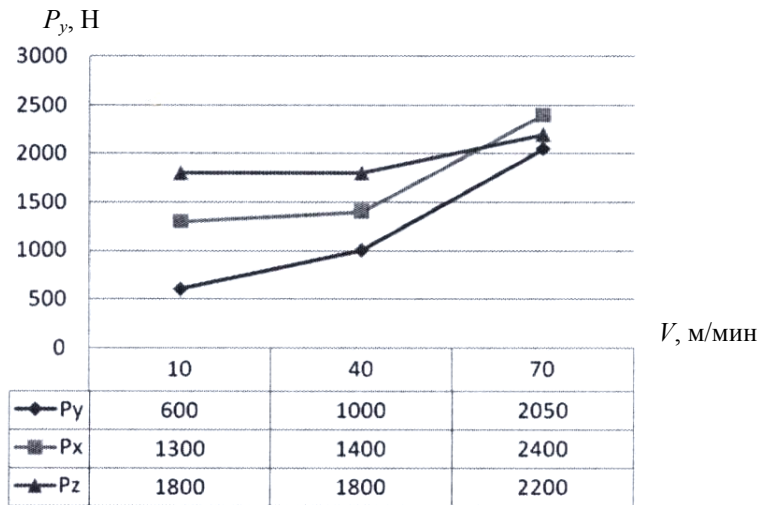


Рис. 4. Характер изменения составляющих силы резания при токарной обработке стали 12X18Н10Т твердосплавным резцом ТН20 в диапазоне скоростей 10–100 м/мин ($t = 1,5$ мм, $S = 0,21$ мм/об)

Реальная схема резания, разработанная профессором Н. В. Талантовым [3], базируется на решающей роли температуры (выделении и стока тепла) в формировании контактных процессов и дает объяснение полученных результатов. В отличие от схемы резания с единственной плоскостью сдвига (условная схема резания), представляющей процесс резания как процесс внешнего трения сходящей стружки о переднюю поверхность инструмента, реальная схема рассматривает резание с позиций вы-

сокоскоростного пластического деформирования металлов с присущим ему процессами деформационного упрочнения (участок упрочнения) и температурного разупрочнения (участок разупрочнения) срезаемых объемов металла. В работе [3] установлено, что процессы пластического деформирования стали в зоне стружкообразования и на участке упрочнения зоны контактных пластических деформаций протекают параллельно, взаимосвязаны между собой и являются высокоскоростным пластиче-

ским деформированием. Подчеркнуто, что явления, происходящие в зоне контактных пластических деформаций, определяют характер изменения в первую очередь горизонтальных составляющих силы резания.

На размер участка упрочнения и размер пластического контакта влияют теплофизические свойства обрабатываемого и инструментального материала. При этом в работе [3] отмечена и физически обоснована закономерность: увеличение теплопроводности хотя бы одной из контактируемых пар (обрабатываемого или инструментального материала) увеличивает в первую очередь касательную силу F . Эта

закономерность прямо противоположна влиянию на горизонтальные составляющие силы резания механической прочности стали и необъяснима с позиций условной схемы стружкообразования.

Реальная схема объясняет «нестандартный» характер изменения горизонтальных составляющих силы резания проявлением особого вида контактного взаимодействия в зоне контактных пластических деформаций, наличием так называемой зоны относительного застоя (рис. 5), изменяющей по аналогии с наростом передний угол резца γ в пределах его отрицательного значения.



Рис. 5. Микрошлиф корня стружки [3]:
1 – твердый сплав ВК6; 2 – зона относительного застоя; 3 – сталь 12Х18Н10Т
($V = 22,5$ м/мин, $S = 0,3$ мм/об, $t = 1,5$ мм)

Ее существование связано с определенным количественным отношением коэффициентов теплопроводности инструментального и обрабатываемого материала $\lambda_{и}/\lambda_{ст}$. Чем меньше это отношение, тем шире скоростной диапазон существования этой зоны, если соотношение $\lambda_{и}/\lambda_{ст}$ больше, равно единице или незначительно меньше ее, зона относительного застоя не образуется. В работе [3] подчеркивается, что зона относительного застоя это не нарост в классическом виде. Микротвердость ее примерно вдвое меньше микротвердости нароста, в пределах ее существует пластическое течение металла. «Размер» зоны относительного застоя изменяется при изменении скорости резания коррозионностойких сталей, так как изменяется отношение $\lambda_{и}/\lambda_{ст}$. Образование застойной зоны, начиная с определенной скорости резания, изменяет условный передний угол инструмента. Как следствие изменяется угол сдвига β , что определяет характер изменения в первую очередь горизонтальных составляющих силы реза-

ния. На представленных графиках (рис. 1–3) горизонтальная составляющая P_y уменьшается в диапазоне скоростей 10–30 м/мин, минимальное ее значение лежит в интервале скоростей 30–40 м/мин. При дальнейшем увеличении скорости резания (температуры в зоне резания) застойная зона исчезает и рост P_y происходит за счет увеличения размера участка упрочнения и участка разупрочнения (длины пластического контакта) и длины полного контакта, что связано с увеличением коэффициента теплопроводности обрабатываемых сталей. Что касается обработки аустенитной стали 12Х18Н10Т ($\lambda = 16$ Вт/м·К) безвольфрамовым твердым сплавом ТН20 ($\lambda = 12$ Вт/м·К) (рис. 4), то это тот случай, когда отношение $\lambda_{и}/\lambda_{ст}$ близко к единице и зона относительного застоя не образуется во всем диапазоне исследуемых скоростей резания. Горизонтальные составляющие растут с увеличением скорости в отличие от обработки конструкционных сталей, где они по мере увеличения скорости уменьшаются.

В практическом плане положения реальной схемы резания применительно к обработке коррозионностойких сталей реализованы в разработке математических моделей по расчету составляющих силы резания с введением в них дополнительного параметра, характеризующего теплофизические свойства каждой новой контактной пары, – термоЭДС предварительного пробного прохода, измеренной на строго постоянных, одинаковых для всех сменных контактных пар режимах резания [4]. Составляющие сил резания предлагается определять по следующим зависимостям:

$$P_x = 118,3 \cdot E^{0,664} \cdot t^{0,712} \cdot s^{0,516} \cdot V^{0,165}, \quad (1)$$

$$P_y = 700,3 \cdot E^{0,408} \cdot t^{0,551} \cdot s^{0,886} \cdot V^{0,097}, \quad (2)$$

$$P_z = 4681,5 \cdot E^{-0,102} \cdot t^{0,609} \cdot s^{0,649} \cdot V^{-0,035}. \quad (3)$$

В предлагаемых математических зависимостях коэффициенты C_{Pz} , C_{Py} , C_{Px} , учитывающие условия резания и свойства контактируемых пар, приняты не постоянными, как в справочниках, а выражены как переменные от термоЭДС пробного прохода $C_{Px} = 118,3 \cdot E^{0,664}$, $C_{Py} = 700,3 \cdot E^{0,408}$, $C_{Pz} = 4681,5 \cdot E^{-0,102}$. Введение в уравнения (1), (2), (3) величины термоЭДС пробного прохода повышает точность определения составляющих силы резания, так как позволяет при до-

пустимом по ТУ разбросе физико-механических и теплофизических свойств со стороны твердого сплава и обрабатываемых сталей оперативно учитывать сочетание этих свойств.

Средняя относительная погрешность определения составляющих P_x , P_y , P_z составляет 12, 14, 3 % соответственно.

Особенность изменения теплопроводности коррозионно-стойких сталей от температуры (скорости резания) по-иному влияет на характер изменения параметра Ra. Как известно, при обработке конструкционных и легированных сталей параметр Ra снижается при увеличении скорости обработки, что взаимосвязано с уменьшением теплопроводности этих сталей и ростом температуры и как следствие уменьшением доли хрупкого и увеличением доли вязкого разрушения. Эта зависимость положена в основу математических моделей по расчету параметра шероховатости Ra [2]. По-иному изменяется коэффициент теплопроводности у сталей мартенситного, аустенитного и мартенситно-ферритного классов (стали типа 12X18H10T, 03X18H9, 20X13, 14X17H2, ЭИ961 (13X11H2B2MФ): с ростом температуры при росте скорости резания коэффициент теплопроводности стали увеличивается (рис. 6).

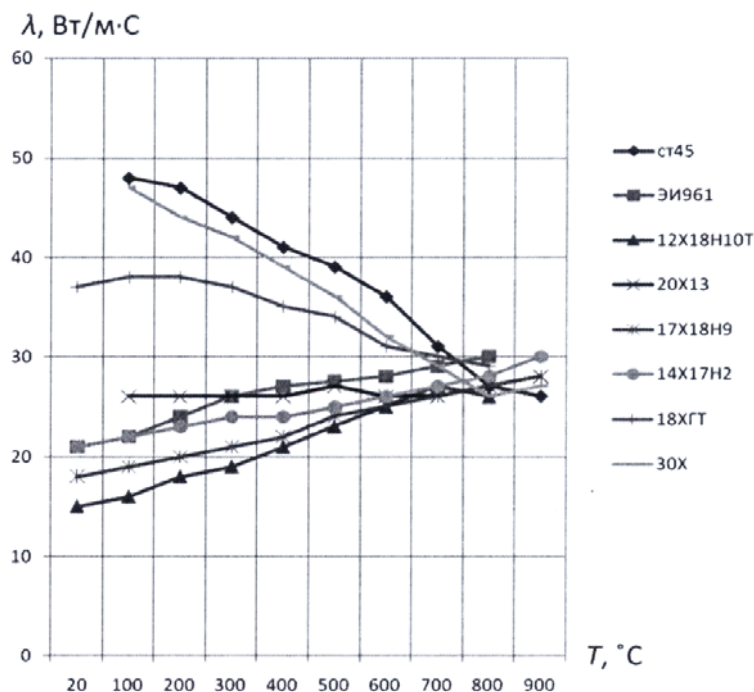


Рис. 6. Изменение теплопроводности коррозионно-стойких сталей (аустенитного, мартенситного, мартенситно-ферритного классов) и конструкционных углеродистых сталей при увеличении температуры [5]

Следует ожидать, что механизм формирования шероховатости обработанной поверхности будет иной. При этом логично предположить,

что характер изменения шероховатости от скорости резания (температуры резания) должен быть диаметрально противоположным, учитывая

иной характер зависимости теплопроводности этих сталей от температуры. Экспериментальные исследования по влиянию скорости резания на высоту микронеровности при обработке серии коррозионно-стойких сталей твердосплавными инструментами подтвердили эти предположения для диапазона высоких скоростей.

На рис. 7 приведены графические зависи-

мости параметра шероховатости R_a в диапазоне изменения скорости резания 10–90 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,11 мм/об. Величины микронеровностей обработанных поверхностей регистрировались с помощью профилографа-профилометра «АБРИС – ПМ 7» – преобразователь первичный по ГОСТ 19300–86, степень точности 1.

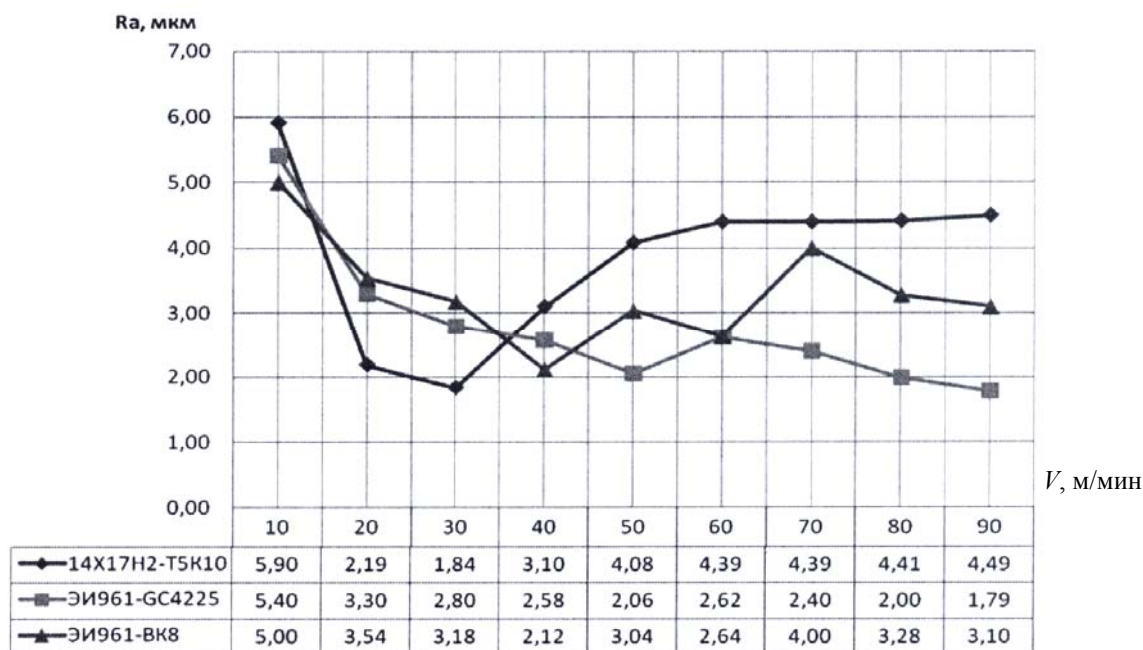


Рис. 7. Изменение величины параметра R_a при увеличении скорости резания V

Но, как видно из рис. 7, зависимость R_a от скорости резания в исследованном диапазоне неоднозначна. Выявлено два диапазона скоростей, где характер зависимости диаметрально противоположный. Начиная со скорости 10 м/мин, наблюдается снижение величины шероховатости. Минимальное значение шероховатости лежит в интервале 30–40 м/мин, затем по мере увеличения скорости резания оно снова увеличивается, что абсолютно не похоже на характер изменения микронеровностей при обработке углеродистых и конструкционных сталей. Чем вызван такой характер изменения? Реальная схема резания объясняет это наличием зоны относительного застоя и изменением ее размера по мере увеличения скорости резания. То есть в основе «нестандартного» характера изменения горизонтальных составляющих силы резания и высоты микронеровностей в низком диапазоне скоростей при обработке коррозионно-стойких сталей лежит одно и то же явление – особый вид контактного взаимодействия в зоне контактных пластических деформаций, зона относительного застоя.

Высота зоны относительного застоя изменяется при изменении скорости резания коррозионно-стойких сталей, так как изменяется отношение $\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{ст}}$. Образование зоны относительного застоя, начиная с определенной скорости резания, увеличивает условный передний угол инструмента в пределах его отрицательного значения. Как следствие, это приводит к увеличению высоты микронеровностей. При дальнейшем увеличении скорости резания (температуры в зоне резания) зона относительного застоя уменьшается, уменьшается и значение условного переднего угла, что приводит к уменьшению высоты микронеровности. В интервале 30–40 м/мин зона относительного застоя исчезает, и дальнейший рост R_a при увеличении скорости резания во втором скоростном диапазоне происходит по другому образцу.

Формирование микронеровностей во втором (высоком) скоростном диапазоне проявляется через выделение количества тепла, поступающего в заготовку и связанного, в свою очередь, с увеличивающейся теплопроводностью

этих сталей, точнее с изменением отношения $\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{ст}}$. Это отношение определяет долю (процентное отношение) хрупкого или вязкого разрушения. В данном конкретном случае повышенные теплопроводности коррозионно-стойких сталей от температуры резания (скорости резания) приводит к увеличению доли хрупкого разрушения, т. е. к увеличению R_a . Это согласуется с металловедческим аспектом [6] об изменении температурного интервала характера разрушения (порога хладноломкости) сталей, имеющих объемноцентрированную кубическую или гексагональную решетку, когда вязкое разрушение при высокой температуре сменяется хрупким.

В результате проведенных экспериментальных исследований разработаны математические модели для расчета параметра шероховатости поверхности R_a для двух различных диапазонов скоростей [7].

1. Диапазон скоростей резания от 40 до 120 м/мин:

$$R_a = 10,8 \cdot \frac{t^{0,7} \cdot S^{0,239} \cdot V^{0,322}}{E^{0,756}}, \text{ мкм.} \quad (4)$$

2. Диапазон скоростей резания от 10 до 40 м/мин:

$$R_a = 109 \cdot \frac{t^{0,189} \cdot S^{0,279}}{E^{0,647} \cdot V^{0,298}}, \text{ мкм,} \quad (5)$$

где E – значение термоЭДС пробного прохода контактной пары «инструмент – заготовка», мВ; t – глубина резания, мм; S – подача, мм/об; V – скорость резания, м/мин.

Адекватность предложенных математических моделей была проверена в условиях чистового и получистового точения при токарной обработке серии коррозионно-стойких сталей различными марками твердосплавного инструмента.

В таблице приведены результаты сравнения рассчитанных по формулам (4), (5) и опытных значений параметра шероховатости R_a .

Контактная пара (режимы резания)	Значение параметра R_a			Величина ошибки %
	расчетное по (1) $R_{a\text{расч}}$, мкм	расчетное по (2) $R_{a\text{расч}}$, мкм	опытное $R_{a\text{оп}}$, мкм	
03X18H9-BK8 ($t = 1$ мм, $S = 0,15$ мм/об, $V = 80$ м/мин, $E = 17,4$ мВ)	3,25	–	3,2	1,5
20X13-BK8 ($t = 1$ мм, $S = 0,09$ мм/об, $V = 100$ м/мин, $E = 23,6$ мВ)	2,45	–	2,6	5,7
14X17H2-T5K10 ($t = 1$ мм, $S = 0,11$ мм/об, $V = 80$ м/мин, $E = 18$ мВ)	2,94	–	3,05	3,6
12X18H10T-T5K10 ($t = 1$ мм, $S = 0,09$ мм/об, $V = 100$ м/мин, $E = 15,9$ мВ)	3,31	–	3,33	0,6
ЭИ961-GC4225 ($t = 1$ мм, $S = 0,09$ мм/об, $V = 90$ м/мин, $E = 3,7$ мВ)	2,85	–	2,96	3,7
14X17H2-T5K10 ($t = 1$ мм, $S = 0,11$ мм/об, $V = 40$ м/мин, $E = 18,0$ мВ)	–	3,02	3,09	2,3
ЭИ961-GC4225 ($t = 1$ мм, $S = 0,09$ мм/об, $V = 30$ м/мин, $E = 18,5$ мВ)	–	3,06	2,80	9,3
12X18H10T-T5K10 ($t = 1$ мм, $S = 0,09$ мм/об, $V = 40$ м/мин, $E = 15,9$ мВ)	–	2,90	3,10	6,4

Выводы

Отличительной особенностью предложенных математических моделей по расчету параметра шероховатости R_a , является то, что введение в уравнения (4), (5) величины термоЭДС пробного прохода как комплексной оценки свойств контактных пар повышает точность определения параметра R_a . Это позволяет при допустимом по ТУ разбросе физико-механических и теплофизических свойств со стороны твердого сплава и обрабатываемых сталей оперативно учитывать сочетание теплофизических свойств контактных пар и геометрии инструмента [4]. Модели обеспечивают совпадение расчетного и измеренного значения с ошибкой, не превышающей 10 % (см. таблицу). Они мо-

гут быть использованы для построения алгоритмов автоматизированного способа расчета на этапе проектирования технологического процесса токарной обработки коррозионно-стойких сталей в САПР ТП или самой системой ЧПУ станка, содержащей в своей структуре модуль расчета режимов резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Режимы резания труднообрабатываемых материалов : справочник /Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 240 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5 изд., исправл. – М. : Машиностроение – 1, 2003. – 912 с.

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

4. Плотников, А. Л. Управление параметрами процесса лезвийной обработки на станках с ЧПУ : монография / А. Л. Плотников. – ВолГТУ-Тольятти : ЗАО «ОНИКС», 2012–231 с.

5. Стали и сплавы. Марочник : справочник / В. Г. Соколин [и др.] ; под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Герасьева. –

М. : Интермет инжиниринг, 2001. – 608 с.

6. Гуляев, А. П. Металловедение : учеб. / А. П. Гуляев. – 5-е изд. перераб. – М. : Металлургия, 1977. – 648 с.

7. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013618267 от 4 сентября 2013 г. РФ, МПК (нет). Расчет величины среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности при точении коррозионно-стойких сталей твердосплавным инструментом / Зайцева Н. Г., Сергеев А. С., Плотников А. Л.; ВолгГТУ. – 2013.

УДК 621.9:629.1.037.5

В. А. Санинский, О. О. Гриб

РАЗРАБОТКА СТАНКОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ И ПРЕРЫВИСТЫХ ОТВЕРСТИЙ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: saninv@rambler.ru

В статье представлены результаты исследований, которые указывают на перспективу получения на их базе прецизионных станков, работающих по принципу винтовой интерполяции и предназначенных для механической обработки глубоких и прерывистых отверстий.

Ключевые слова: исследования, прецизионные станки, винтовая интерполяция, механическая обработка, глубокие отверстия.

The article presents the results of the work, which indicate the prospect of their base precision machines working on the principle of helical interpolation, designed to improve the accuracy of the machining of deep holes and broken.

Keywords: research, precision machine tools, helical interpolation, machining, deep hole.

Прецизионные металлорежущие станки (ПМС) для высокоточной (прецизионной) обработки деталей сверлильно-расточной и шлифовальной групп по классам повышенной точности (П), высокой точности (В), особо высокой точности (А) и особо точные (С) обеспечивают получение изделий с предельными отклонениями формы и расположения поверхностей размеров по ГОСТ 24643 Ш-VI степени точности, точным пространственным положением осей координированных параллельных рядов глубоких прерывистых отверстий под подшипники скольжения коренных опор и втулки распределителей и оси рокеров [3, 4]. Требования стандартов к коренным опорам соответствуют параметрам шероховатости поверхностей Ra 0,16-2,5 и 7-6 классов точности. Целью исследований является достижение возможности применения планетарного внутреннего шлифования [5,6]- и 5-го класса точности.

Разработана гамма металлорежущих пинольных станков для механической обработки отверстий под коренные подшипники в картерах дизелей ряда 6ЧН21/21 и 6ВМ 21А [3], которые благодаря конструктивным особенностям шпиндельного узла пиноли (ШУП) позволяют обеспечивать требования к параметрам точности 6-го класса и шероховатости Ra 1,25–

0,32 при отклонениях от соосности $\pm 0,05$ мм при обработке коренных опор диаметром 150 Н6 и 160 Н6 с отношением длины l общей длины оси соосных отверстий к диаметру d более 12.

Работы [1–4] позволили установить взаимосвязь между параметрами точности обработки, режимами резания, базированием заготовки и их влиянием на обеспечение 6-го класса точности растачиваемых отверстий (рис. 1). Колебания припуска на рабочих ходах, связанные с погрешностью формы отверстия в заготовке, при работе на настроенных станках изменяют глубину резания t и вызывают изменение ΔD диаметра обрабатываемого отверстия D :

$$\Delta D = 2C_y S^{VP} t^{XP} HB^m \left(\frac{1}{j_{СТ}} + \frac{1}{j_{ИНСТР}} + \frac{1}{j_{ДЕТ}} \right),$$

где $j_{СТ}$ – жесткость станка; $j_{ИНСТР}$ – жесткость инструмента; $j_{ДЕТ}$ – жесткость детали; XP , VP , m – показатели степени; C_y – коэффициент; HB – твердость материала заготовки по Бринеллю.

При черновом растачивании наименьшего диаметра отверстий $D = 30$ Н6: $C_y = 300$, $S = 0,12$ мм / об, $t_{max} = 4$ мм, $V_p = 0,75$, $X_p = 1,0$, $n = -0,15$, $HB = 197$, для $\varnothing 28,8$ мм $-j_{СТ} = 3953$ Н/мм. Пренебрегая значениями жесткости инструмента и детали, получим $\Delta D = 0,055$ мм. Полученная величина $\Delta D = 0,055$ мм превышает поле

допуска $\Delta D > TD$. Это указывает на необходимость выполнения полустачивочного растачивания: при $t_{\max} = 1$ мм, для $\varnothing 29,8$ мм $\Delta D = 0,009$ мм и чистового растачивания при $t_{\max} = 0,05$ мм $\Delta D = 0,003$ мм и тогда $\Delta D < TD$.

Статистический анализ точности растачивания пинольными станками коренных опор $\varnothing 165$ Н6 100 картеров дизеля 6ДМ 21А и коренных опор $\varnothing 160$ Н7 140 блоков цилиндров дизеля 6ЧН 21/21 позволил сделать выводы, подтверждающие производственные данные [3] (рис. 2):

1) конструкция пинольных станков стабильно обеспечивает точность растачивания соосных отверстий 6-го квалитета;

2) значения коэффициента α , и K , указывают, что технологический процесс растачивания коренных опор 6-го квалитета на пинольных станках за три рабочих хода вместо традиционных четырех с настройкой на размер по методу пробных проходов: чернового, полустачивочного и чистового – точен и управляем.

Общий вывод о необходимости и достаточности осуществления трех рабочих ходов однорезцовой пиноли без переустановки заготовки вместо четырех с переустановкой для многорезцовых традиционных борштанговых расточных станков.

Установлено, что выполнение более высоких требований к точности отверстий может быть достигнуто за счет применения беззазор-

ного базирования режуще-деформирующей пиноли, обеспечивающего совмещение дорнования с растачиванием.

На основе совмещения этих процессов предложено новое техническое решение, которое создает возможность обеспечения более производительных и точных процессов дорнования и высокопроизводительного контурного вихрефрезерования многозубым высокопроизводительным режущим инструментом с образованием мелкой сливной стружки (рис. 1). Такое решение включает введение в ШУП механизма планетарного движения борштанги, позволяющего осуществить процесс винтовой интерполяции, необходимый как для контурного вихрефрезерования, так и высокоточного планетарного внутреннего шлифования глубоких и прерывистых отверстий.

Публикации [1–4] подтверждают необходимость и возможность успешности проведения конструкторско-технологических [5–6] работ, направленных на создание специализированных прецизионных металлорежущих станков для механической обработки как глубоких отверстий в длинномерных трубах, так и глубоких прерывистых отверстий в картерах ДВС, указывают на появление новых достаточных условий для удовлетворения интереса к этой теме отечественных исследователей и производителей к импортозамещающим технологиям.

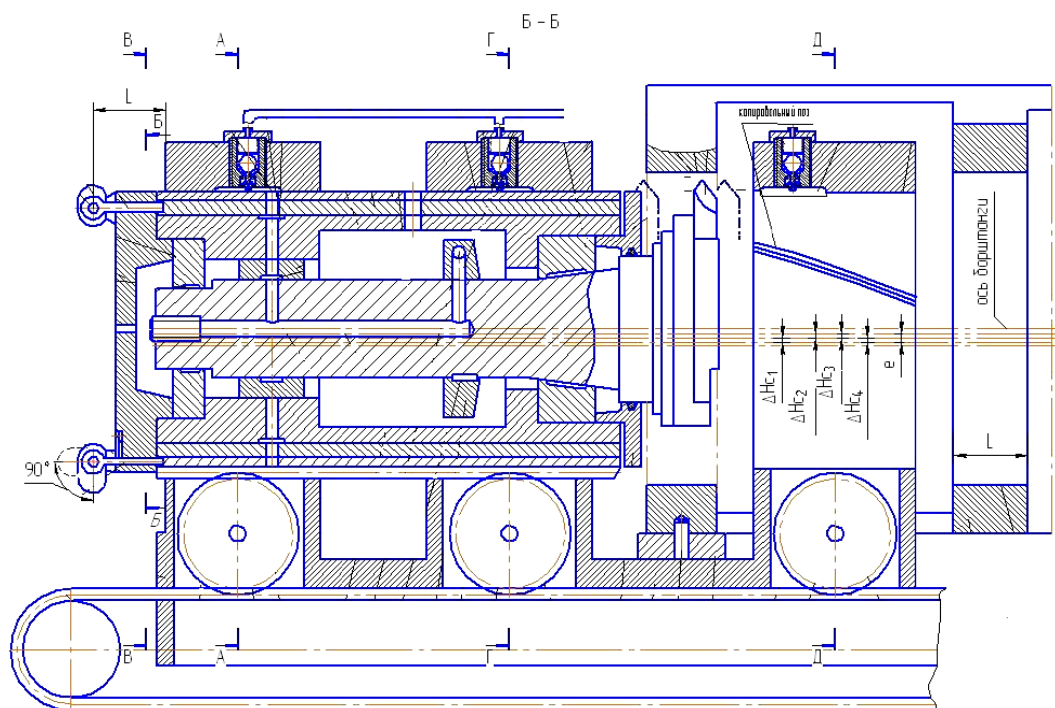


Рис. 1. Принципиальная схема пинольного станка с механизмом планетарного движения борштанги с фрезой [5, 6]

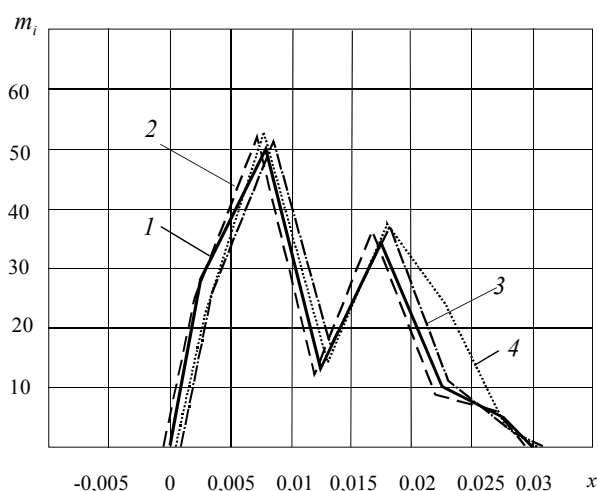


Рис. 2. Полигон распределения размеров коренных опор дизеля 6ДМ21А на пинольном станке при растачивании без применения безазорного базирования:
1...4 — номера коренных опор после растачивания, x — отклонения $\varnothing 165$ Н6; m_i — частоты [3]

Вывод

Тенденция развития ПМС для обработки глубоких и прерывистых отверстий заключается в их унификации на основе применения малогабаритных пинолей, совершенствования их

конструкции на основе применения механизма винтовой интерполяции и обеспечения на этой основе уменьшения габаритов станков, повышения их точности и надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение прецизионных технологий при производстве многоопорных узлов поддержки валов ДВС / В. А. Санинский, Н. А. Сторчак, М. В. Кочкин, А. А. Щавлев // Технология машиностроения. — 2010. — № 11. — С. 48–53.
2. Применение прецизионных технологий при производстве многоопорных узлов поддержки валов ДВС / В. А. Санинский, Н. А. Сторчак, М. В. Кочкин, А. А. Щавлев // Технология машиностроения. — 2011. — № 1. — С. 31–35.
3. Специальные станки для растачивания глубоких прерывистых отверстий шпинделями на выносных опорах : монография / Н. Я. Смольников, В. А. Санинский ; Волгогр. гос. техн. ун-т. — Волгоград, 2004.
4. Санинский, В. А. Повышение качества механической обработки соосных поверхностей деталей многоопорных подшипниковых узлов : монография / В. А. Санинский ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. — Волгоград : РПК «Политехник», 2003. — 186 с.
5. Пат. 2391186 РФ, МПК В 23 В 41/00. Металлорежущий станок / В. А. Санинский, Н. Я. Смольников, Ю. И. Сидякин, А. В. Санинский, Н. П. Сторчак ; ВолгГТУ. — 2010.
6. П. м. 144594 РФ, МПК В23В41/00. Металлорежущий станок / В. А. Санинский, В. В. Ананян, А. В. Санинский, Ю. Н. Платонова, Е. Н. Осадченко ; ВолгГТУ. — 2014.

УДК 621.9:629.1.037.5

В. А. Санинский, Ю. Н. Платонова, М. А. Чузурев

РАЗРАБОТКА СТАНКОВ ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КОРЕННЫХ ОПОР ДИЗЕЛЕЙ

Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: saninv@rambler.ru

Рассматривается возможность применения прецизионной обработки протяженных коренных опор в картерах дизелей.

Ключевые слова: глубокие и прерывистые отверстия, пинольный станок, компоновка, растачивание координированных соосных отверстий, расчетные схемы, жесткость шпиндельного узла, точность обработки.

The possibility of using extended precision machining indigenous supports in engine crankcase.

Keywords: deep and discontinuous holes, tailstock machine-tools, assembling, boring of coordinated coaxial holes, calculation schemes, rigidity of spindle joint, processing precision.

Прецизионное точение часто выполняют на станках с выносными опорами шпинделей [1] и применяют перед хонингованием, суперфинишированием, притиркой, основанными на абразивной обработке.

Для осуществления как растачивания, так и внутреннего шлифования разработаны шпиндельных узлов пиноли (ШУП) компактных металлорежущих станков для механической обработки цилиндрических отверстий под подшипники в картерах (рис. 1) [3–8]. Механизм планетарного вращения режущего инструмента станков [5, 6] позволяет обрабатывать поверхности с регулярным периодическим профилем

высотой h подшипников скольжения, собранных с картером [7].

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 — гильза, 2 — борштанга, 3 — подшипник типа 318200 задней опоры пиноли А2, 4 — подшипник 318200 передней опоры пиноли А1, 5 — передний люнет В, 6 — задний люнет А, 7 — резец, 8 — растачиваемое отверстие картера, l_1 — межопорное расстояние, a_1 — расстояние борштанги от опоры 1 до резца, l_0 — длина растачиваемого отверстия из ряда соосных, l — исходное положение резца, F — сила резания, Fr_1, Fr_2 — реакция на опоре 1 и 2 соответственно, $F_{л1}, F_{л2}$ — реакция на люнетах 1 и 2 соответственно [5].

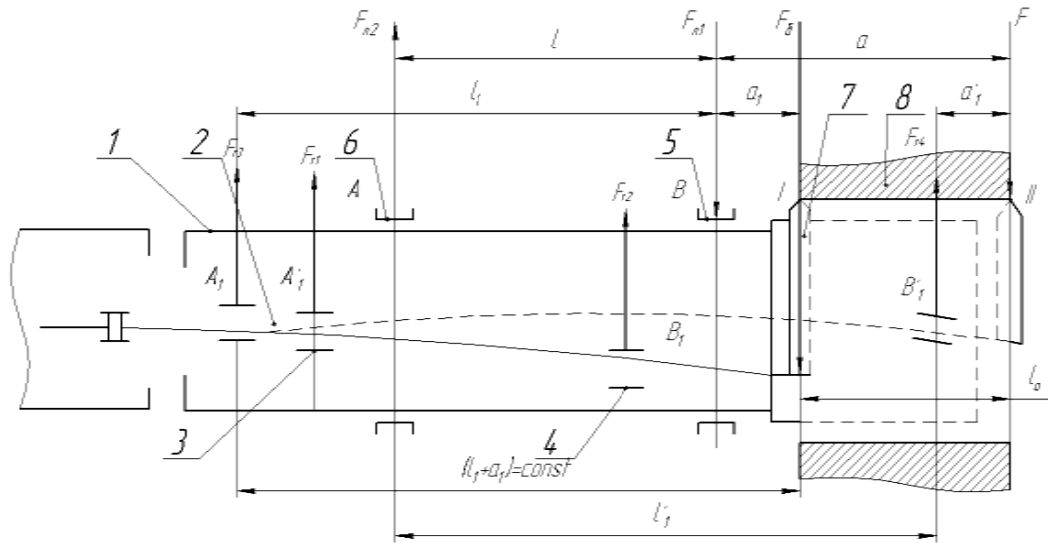


Рис. 1. Схема полного расчета шпиндельного узла [5, 8] для расчета жесткости ШУП при воздействии силы резания F на люнеты пиноли и подшипники борштанги

Выполнив расчет жесткости и прогиба борштанги по рекомендациям [5], при черновом, получистовом и чистовом растачивании отверстий диаметров от 50 до 230 мм, без учета сил $F_{л1}, F_{л2}$, пришли к выводу об идентичности деформационных процессов ШУП пинольного станка [7, 8], базирующейся в люнетах и системы инструмент – деталь шпиндельного узла координатно-расточного станка ШУ К-РС.

Исходя из требований к точности обработки допускаемый прогиб переднего конца шпинделя от сил резания и момента привода не должен превышать $1/3$ допуска на лимитирующий размер согласно формуле:

$$y \leq \frac{TD}{3}. \quad (1)$$

Для отверстия $D = 118H6$ допуск на размер $TD = 22$ мкм, т. е. $y \leq 7,3$ мкм, что эквивалентно данным [2].

Результаты аналогичных расчетов жесткости и точности пиноли были представлены в статье [8] (рис. 2).

В отличие от координатно-расточного станка в пинольном станке [7, 8] пиноль не может быть зажата и в этом существенная разница в ожидаемых параметрах точности: в этом случае пиноль станка может иметь меньшую точность, так как геометрическая интерпретация ее будет соответствовать кривой 1 на рис. 3, б.

Шпиндель-борштанга должна обладать точностью вращения, характеризуемой радиальным и осевым биением его переднего конца, которая для универсальных и специализированных станков регламентируется ГОСТ в пределах $\delta \leq \frac{TD}{3}$ мкм [5], что соответствует полученным расчетным значениям ШУП.

Экспериментальные исследования жесткости идентичной системы станок-приспособление – инструмент – деталь шпиндельного узла координатно-расточного станка (ШУ К-РС) для гильзы $\varnothing 105$ мм с нарезкой на координатном станке (рис. 3) приведены в статье [2].

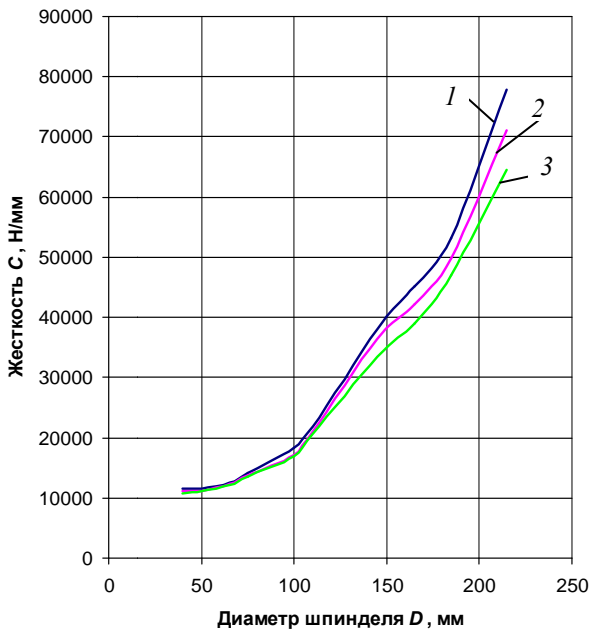


Рис. 2. График зависимости жесткости шпиндельного узла от диаметра шпинделя при режимах резания при силе резания $F = 800$ Н, глубине резания $t = 0,5$ мм, скорости резания $V = 155$ м/мин, подачи $S = 0,10$ мм/об. [8]:
1 – черновое растачивание; 2 – получистовое растачивание;
3 – чистовое растачивание

Их результаты (рис. 2, б) могут быть идентифицированы с расчетными данными [8] (рис. 4–10) ШУП пинольного станка (рис. 1, 3).

Идентификация точностных параметров и жесткости ШУП (рис. 3) и гильзы ШУ К-РС (рис. 3) основана на том, что перемещения в любом сечении гильзы на расстоянии l от начала стыка (в том числе стыка с люнетом) равны $\delta = \delta_0 + \theta_0 l + \delta_c$, где δ_c – деформация (мкм) гильзы координатно-расточного станка (рис. 3, а) на консольном участке при рассмотрении ее как балки, заземленной одним концом [2];

$$\delta_c = \frac{Pl^2 \cdot 10^4}{6EJ} \cdot (3L - l); \quad (2)$$

здесь P – сила; E – модуль упругости; J – мо-

мент инерции поперечного сечения; L – расстояние от плоскости приложения силы до начала стыка.

Упругие перемещения δ_0 и θ_0 определялись экспериментальным путем, собственные деформации δ_c – расчетом. Измерялись жесткость гильз диаметром 105 мм с нарезкой и экспериментальной гильзы диаметром 120 мм без нарезки (на гильзе диаметром 105 мм нарезка начинается на расстоянии 100 мм от нижнего конца, у пиноли нарезка отсутствует). Сравнительные испытания проводились при вылете гильзы $L_1 = 80$ мм, при котором нарезка практически не оказывает заметного влияния на упругие перемещения, и при $L_1 = 127$ мм, при котором влияние нарезки ощутимо.

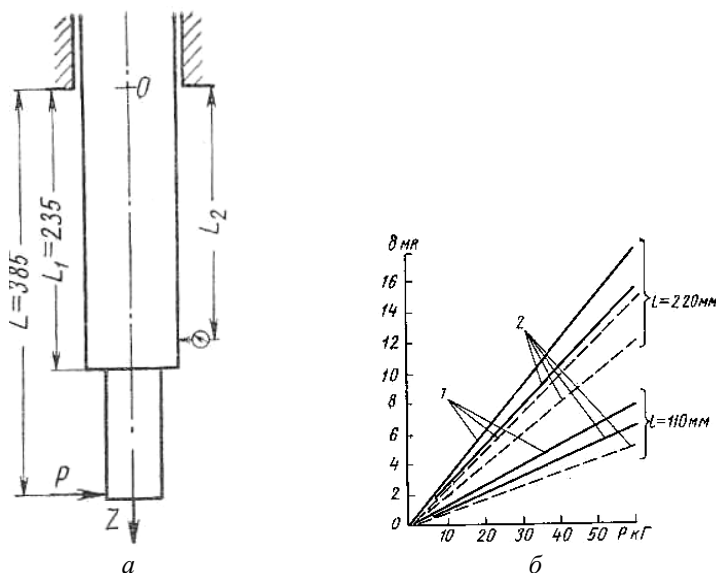


Рис. 3: а – схема ШУ К-РС с гильзой диаметром 105 мм при $P = 50$ кгс [2]; б – зависимость упругих деформаций от нагрузки (пунктирные линии – нагружение в плоскости наибольшей жесткости гильзы, сплошные – в плоскости наименьшей жесткости):

1 – гильза не зажата; 2 – гильза зажата (сплошные линии – полные перемещения, пунктирные – деформации гильзы на консольном участке)

Эксперименты [2] показали, что большую часть упругих перемещений на конце гильзы составляют перемещения, вызванные ее деформацией на опертом участке (65–90 %). Перемещения, вызванные деформацией гильзы на консольном участке, составляют меньшую часть общих перемещений гильзы (рис. 3, а). Зависимость между упругими перемещениями и нагрузкой для зажатых и не зажатых гильз практически линейна (рис. 3, б). Упругие перемещения гильз при больших вылетах и нагружения в направлении, перпендикулярном к плоскости нарезки, на 15–25 % больше, чем в направлении, параллельном

нарезке. В первом случае влияние нарезки на жесткость наибольшее, во втором – наименьшее. Только увеличение диаметра d гильзы со 105 до 120 мм привело к увеличению ее жесткости в 1,7–2 раза (при $L_1 = 80$ мм). Малое влияние нарезки при этом подтверждается тем, что упругие перемещения в обеих взаимно перпендикулярных плоскостях одинаковы. Одновременно увеличение диаметра гильзы и устранение нарезки привело к увеличению жесткости гильзы в 2–3 раза (при $L_1 = 127$ мм; сравнивались гильзы станка при нагружении в направлении, перпендикулярном к нарезке).

Упругие перемещения δ_0 и θ_0 в стыке гильза–корпус могут быть рассчитаны, если гильзу на длине контакта рассматривать как балку на упругом основании, которым служат поверхностные слои корпуса и гильзы. Используя формулы из теории балок на упругом основании, можно записать [2]:

$$\delta_k = \delta_0 + \theta_0 l = \frac{2\beta kP}{b} \cdot (1 + \beta L + \beta l + 2\beta^2 lL),$$

где k – коэффициент контактной податливости в мксм²/кг; b – ширина упругого основания, приведенная к плоскому ($b = 0,25\pi d$), см, d – диаметр гильзы в см); β – показатель жесткости, 1/см:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{b \cdot 10^4}{4EJk}}. \quad (3)$$

Представленные в статье [2] результаты расчетов ШУ К-РС для гильзы $\varnothing 105$ мм с нарезкой незначительно расходятся с результатами аналогичных исследований (ШУП) с аналогичными геометрическими параметрами и нарезкой для зубчато-ременной передачи [8], что подтверждается идентичностью схем расчетов и графиков (рис. 2 и 3, б).

З а к л ю ч е н и е

Общность элементов конструкции ШУП и ШУ К-РС указывает на возможность идентичности результатов исследования жесткости их общего элемента. В результате анализа данных [1, 2, 7, 8] сделаны следующие выводы.

1. При всех видах нагружений перемещения, вызванные контактными деформациями в стыках, составляют существенную часть общих упругих перемещений, а повышение жесткости гильзы может быть достигнуто путем увеличения ее диаметра.

2. Упругие перемещения гильз [2] в результате деформаций их на опертом участке составляют не менее 65–80 % общих перемещений нагруженного конца гильзы (меньшие значения при большом вылете, большие – при малом) и идентичны деформациям ШУП пиноли [7, 8], базирующейся в двух соосных люнетах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тальянкер, М. Я. Тонкая расточка глубоких отверстий шпинделями с выносными опорами / М. Я. Тальянкер // Станки и инструмент. – 1969. – № 5. – С. 27–28.
2. Левина, М. Л. Исследование жесткости одностоечного координатно-расточного станка / М. Л. Левина, В. Л. Назарова // Станки и инструмент, № 8. – 1964. – С. 1–4.
3. Применение прецизионных технологий при производстве многоопорных узлов поддержки валов ДВС / В. А. Санинский, Н. А. Сторчак, М. В. Кочкин, А. А. Щавлев // Технология машиностроения. – 2010. – № 11. – С. 48–53.
4. Применение прецизионных технологий при производстве многоопорных узлов поддержки валов ДВС / В. А. Санинский, Н. А. Сторчак, М. В. Кочкин, А. А. Щавлев // Технология машиностроения. – 2011. – № 1. – С. 31–35.
5. Специальные станки для растачивания глубоких прерывистых отверстий шпинделями на выносных опорах : монография / Н. Я. Смольников, В. А. Санинский ; Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2004.
6. Санинский, В. А. Повышение качества механической обработки соосных поверхностей деталей многоопорных подшипниковых узлов : монография / В. А. Санинский ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Политехник», 2003. – 186 с.
7. П. м. RU 149663 РФ, МПК В23В41/00. МПК В23В41/12. Металлорежущий станок / В. А. Санинский, Н. А. Сторчак, Ю. Н. Платонова, Е. Н. Осадченко, М. В. Кочкин ; ВолгГТУ. – 2014.
8. Разработка и исследование специальных пинольных металлорежущих станков для растачивания коренных опор в картерах двигателей внутреннего сгорания / В. А. Санинский, К. Л. Рябова, Ю. Н. Платонова, Е. Н. Осадченко // СТИН. – 2014. – № 9. – С. 8–14.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.52.011.56.001.63

В. Г. Барабанов, А. К. Иванюк

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГПС ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: ivanyuk_aleksei@mail.ru

Гибкие производственные системы ГПС помогают рационализировать и сэкономить на производстве изделий. Особенно удобны данные системы при создании и обработке типовых деталей, таких как корпусные. Для использования ГПС необходимо рассчитать основные показатели, влияющие на всю структуру. На основе подобных расчетов подбирается количество деталиустановок, определяется вместимость стеллажа, позиции загрузки-разгрузки, позиции контроля и количество штабелеров.

Ключевые слова: гибкие производственные системы, корпусные детали, позиция контроля, штабелеры.

Flexible production systems help to rationalize and save on production of products. Especially these systems are convenient at creation and processing standard details, such as case. But to use flexible production systems it is necessary to calculate the main indicators influencing all structure. Making these calculations, the quantity of detailuстановок, capacity of a rack, position of loading unloading, a position of control and number of pilers correctly are selected.

Keywords: flexible production systems, case details, control position, pilers.

В процессе разработки АСТПП (автоматизированной системы подготовки производства) после выбора САМ (Computer-Aided Manufacturing)-систем и определения основной структуры ГПС важной задачей является расчет основных параметров [1]. Технологические параметры рассчитываются для обработки корпусных деталей, изготовленных из легких алюминиево-магниевых сплавов с использованием станков с ЧПУ. Это делается для рационального выбора технологического оборудования и его компоновки.

Расчет производится по следующей методике: сначала определяется вместимость стеллажа, основным параметром которого является количество деталиустановок; затем рассчитываются позиции загрузки и разгрузки, а также позиция контроля. Заключительным этапом является определение количества штабелеров, которое определяется исходя из общего количества обрабатываемых деталей, модулей и вышеописанного количества позиций технологического оборудования.

Важнейшим параметром, определяющим эффективность ГПС, является вместимость стеллажа. Для его определения необходимо рассчитать максимальное количество деталиустано-

вок, которые могут быть обработаны в процессе работы системы.

Количество деталиустановок определяется по формуле:

$$K_{\text{ду}} = \frac{T_0 \cdot n}{t_{\text{об}} \cdot N_m}, \quad (1)$$

где $T_0 = 320$ (ч) – месячный фонд работы одного ГПМ в две смены; n – среднее число ТО (технологическое оборудование), входящих в ГПС. Данное значение определяется исходя из среднего количества гибких модулей, на которые проходит одна заготовка. В качестве примера примем среднее число n равным 3; $t_{\text{об}} = 3,3$ (ч) – средняя трудоемкость обработки одной деталиустановки; $N_m = 90$ – месячная программа выпуска деталей одной номенклатуры.

В соответствии с заданными параметрами из выражения (1) получим $K_{\text{ду}}$ равным 3,2 шт. При разработке ГПС необходимо учесть возможность повышения объема производства, для чего увеличим количество деталиустановок до 4 шт.

Затем рассчитывается количество позиций загрузки и позиций разгрузки [2]. Так как данные позиции производят схожие операции, то

их можно объединить в один модуль, что позволит сократить рабочие позиции.

Количество позиций загрузки определяется по формуле:

$$K_{\text{поз.з}} = \frac{t_3 \cdot K_d}{T_0 \cdot 60}, \quad (2)$$

где $t_3 = 6$ (мин) – время загрузки заготовки на спутник; K_d – число деталиустановок, проходящих через позицию в течение месяца, которое в свою очередь можно найти по формуле:

$$K_d = K_{\text{ду}} \cdot N_m. \quad (3)$$

В результате расчета по формуле (3) значений $K_{\text{ду}}$ и N_m , получено 360 штук деталиустановок. Подстановкой в выражение (2) данных параметров определяется количество позиций загрузки: $K_{\text{поз.з}} = 0,112$.

Таким образом, необходимое количество позиций загрузки принимается равным 1. Рассчитаем необходимое количество позиций разгрузки:

$$K_{\text{поз.р}} = \frac{t_p \cdot K_d}{T_0 \cdot 60}, \quad (4)$$

где $t_p = 4$ (мин) – время снятия заготовки со спутника. Подставив в формулу (4) известные параметры, получено $K_{\text{поз.р}} = 0,075$. Необходимое количество позиций разгрузки принимается равным 1.

Данные позиции можно объединить в одну – «загрузки/разгрузки» используя формулу:

$$K_{\text{поз.общ}} = \frac{(t_3 + t_p) \cdot K_d}{T_0 \cdot 60}. \quad (5)$$

Рассчитав параметры по формуле (5), получим $K_{\text{поз.общ}} = 0,187$. Следовательно, необходимое количество позиций «загрузки/разгрузки» принимается равным 1.

Для оценки точности изготовления деталей необходимо наличие позиции контроля для проверки каждой пятой детали [3]. Число позиций контроля можно определить по формуле:

$$K_{\text{поз.к}} = \frac{t_{\text{к.общ}} \cdot K_{\text{дк}}}{T_0 \cdot 60}, \quad (6)$$

где $t_{\text{к.общ}}$ – суммарное время контроля одной деталиустановки, которое рассчитывается по формуле (7):

$$t_{\text{к.общ}} = t_{\text{кп}} \cdot (n - 1) + t_{\text{ко}}, \quad (7)$$

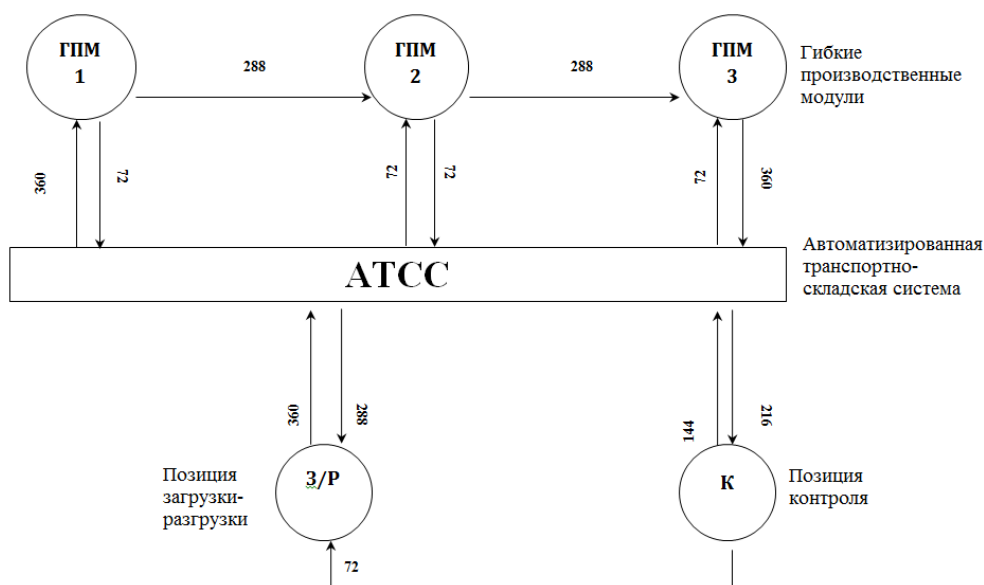
где $t_{\text{кп}} = 3$ (мин) – время на промежуточный контроль; $t_{\text{ко}} = 15$ (мин) – время на окончательный контроль; $n = 3$ – среднее количество производственных модулей.

Число деталиустановок ($K_{\text{дк}}$), проходящих контроль за месяц, рассчитывается по формуле (8):

$$K_{\text{дк}} = \frac{K_d}{n_1}, \quad (8)$$

где $n_1 = 5$ – на контроль поступает каждая 5-я деталь. Подставляя параметры $t_{\text{к.общ}}$ и $K_{\text{дк}}$ в формулу (6), найдем $K_{\text{поз.к}} = 0,078$.

Для обеспечения производительности ГПС примем $K_{\text{поз.к}} = 1$.



Первичная схема ГПС

Следующим важным параметром для создания ГПС является оптимальное количество штабелеров [4]. Для определения их количества

воспользуемся первичной схемой ГПС, составленной на основе проведенных выше расчетов. По данной схеме определяется количество из-

делий, перемещающихся между технологическим оборудованием и автоматической транспортно-складской системой исходя из общего количества обрабатываемых заготовок и количества заготовок, отправленных на контроль. Данные значения обозначены на рисунке над стрелками, показывающими направление движения технологического процесса.

Используя данную схему, получаем, что количество штабелеров равно двум: один штабелер необходим для обслуживания позиций контроля, загрузки-разгрузки и АТСС (автоматизированная транспортно-складская система), второй перемещает заготовки от технологического оборудования к АТСС [5].

Таким образом, описанная выше методика позволяет скомпоновать наиболее рациональный вариант схемы ГПС. Однако у данного метода есть и недостатки – невозможность определить очередность загрузки деталей для уменьшения времени простоя станков. С целью его устранения планируется объединение нескольких методик и синтезирование их в общую полноценную структуру, позволяющую

спланировать, разработать и организовать наиболее рациональную схему ГПС. Данное решение будет являться полноценным конечным этапом в разработке автоматизированной системы технологической подготовки производства корпусных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванюк, А. К.* К вопросу об интеграции САМ-систем в АСТПП корпусных деталей прибора связи / А. К. Иванюк, В. Г. Барабанов // Евразийский союз ученых. – 2014. – № 8 (часть 8). – С. 53–56.
2. *Андреев, Г. Н.* Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства / Г. Н. Андреев, В. Н. Новиков, А. Г. Схиртладзе. – М.: Высшая школа, 2002. – 415 с.
3. *Капустин, Н. М.* Формирование виртуальной производственной системы для выпуска изделий в распределенных системах / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов // Машиностроитель. – 2002. – № 6. – С. 42–46.
4. *Колесов, И. М.* Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроительных специальностей вузов / И. М. Колесов. – М.: Высшая школа, 1999. – 591 с.
5. *Вороненко, В. П.* Автоматизированное производство / В. П. Вороненко, А. Г. Схиртладзе, В. П. Брюханов. – М.: Высшая школа, 2001. – 304 с.

УДК 681.523.24

Ю. Г. Бурков, В. А. Горюнов¹, Д. А. Дудников², А. Ю. Чулюнин³, В. В. Корзин⁴

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СТРУЙНОГО ЭЛЕМЕНТА

Волжский институт строительства и технологий

¹Волгоградский государственный технический университет

²Институт проблем управления РАН

³Научно-исследовательский институт механики МГУ

⁴Волжский политехнический институт

E-mail: korzinv@mail.ru

Статья посвящена моделированию процессов переключения струйного элемента с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Выполнен расчет переходных процессов, происходящих в рабочей камере струйного элемента. Приведены полученные изображения струйных течений в камере элемента.

Ключевые слова: струйный элемент, пневматический струйный генератор, флюидика, электромагнитные поля, пожаробезопасность, взрывобезопасность.

This work is devoted to modeling of processes of switching fluidics element using the software package ANSYS Fluent. Calculations of transients occurring in the working chamber of the fluidics element. Shows the obtained images of fluidics streams in the member's chamber.

Keywords: jet element, air jet generator, fluidics, electromagnetic fields, fireproof, explosion-proof.

Внешние воздействия электромагнитной природы существенно влияют на живучесть электронных систем управления (СУ), среди которых присутствуют естественные дестабилизирующие факторы (грозовые разряды, радиационные потоки космического пространства, электромагнитные поля и др.), а также искусственные (ионизирующие излучения, сверхвысокочастотные излучения, лазерные излучения и пр.).

В последнее время повысился интерес к построению резервных СУ на струйных элементах [1], которые работоспособны в условиях, характеризуемых низкими и высокими давлениями и температурами, электромагнитными излучениями, интенсивной радиацией, ударными нагрузками [2]. Однако существенно низкое быстродействие по сравнению с электронной аппаратурой ограничивает использование струйной

техники в построении СУ. В [3] было показано, что главными факторами повышение быстродействия струйных элементов являются их миниатюризация, использование легких газов и повышение величины отношения давления питания и давления окружающей среды. Наряду с этим важным является качество функциональных характеристик, которые определяются аэрогидродинамическими процессами переключения струй, распространения сигналов давлений и расходов в коммуникационных каналах и т. п. Рабочий процесс в камере струйного генератора рассмотрен в [4, 5]. Особо заметное влияние оказывают

линейные размеры каналов струйных элементов. В статье на примере струйного генератора рассматривается влияние различных параметров на характеристики элемента.

Для анализа и оценки работы струйного генератора был использован программный пакет ANSYS Fluent для расчета переходных процессов, происходящих в его рабочей камере. Расчет проводился в двумерной постановке. Течение рабочей жидкости – сжимаемого газа – описывалось с помощью системы нестационарных осредненных уравнений Навье-Стокса (URANS) и энергии, которые записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - h\vec{J} + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{u})), \tag{3}$$

где ρ – плотность газа, μ – вязкость газа, x_i, x_j – пространственные координаты, t – время, δ_{ij} – символ Кронекера, \vec{u} – вектор скорости газа; u_i, u_j – компоненты скорости газа; k_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности; $E = C_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; T – температура газа; $-\rho \overline{u_i u_j}$ – тензор рейнольдсовых напряжений, которые согласно гипотезе Буссинеска записываются в виде:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \tag{4}$$

где μ_t – турбулентная вязкость, для вычисления которой используются полуэмпирические модели турбулентности. В данной работе используется двухпараметрическая модель SST, поскольку она лучше описывает пристеночные и отрывные течения [1]. Выражения для вычисления

турбулентной вязкости в модели SST имеют следующий вид [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k, \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega, \tag{6}$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right)}, \tag{7}$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ω – скорость диссипации кинетической энергии; G_k, G_ω – источники генерации k и ω ; Γ_k и Γ_ω – коэффициенты диффузии для k и ω соответственно; Y_k и Y_ω – диссипативные источники для k и ω ; α^*, a_1, F_2 – константы модели турбулентности [2].

Для замыкания системы уравнений (1)–(7) используются следующие граничные условия:

- На входе в расчетную область..... Давление $P = 4000$ Па
Температура $T = 300$ К
Интенсивность турбулентности 5 %
Масштаб турбулентности 1 м
- На контуре канала..... Условие прилипания $U = 0$
- На выходе..... Давление $P = 0$ Па
«Мягкие» граничные условия для температуры и параметров турбулентности

Построение сеточной модели осуществлялось в программном комплексе ICEM CFD. Для разбиения расчетной области на контрольные объемы использовалась неструктурированная расчетная сетка типа «тэтра», размерность которой составила 1 млн элементов. У поверхности твердых стенок строился призматический слой ячеек с тем учетом, чтобы безразмерный параметр $y \leq 2$. Это условие необходимо для правильной работы выбранной модели турбулентности. Шаг по времени составил $\tau = 10^{-6}$ с, длительность расчета 1100 шагов.

Исходя из полученной при численном моделировании картины переключения были выделены основные этапы переключения силовой струи и распространения волн давления.

На рис. 1 представлен процесс установления струи в рабочей камере элемента после подачи питания. По обе стороны струи идет процесс образования вихрей, которые формируются случайным образом. Рабочая среда эжектируется и из каналов управления. Первоначальный поток струи питания сбрасывается в атмосферные окна и частично поступает в выходной канал. Случайным образом исходя из мгновенных сопротивлений выходных и атмосферных каналов струя питания устанавливается вдоль левой стенки рабочей камеры. На диаграмме можно видеть ядро струи и ее основное направление. Численные значения скоростей потока представлены справа от шкалы скоростей. Время работы струйного генератора показано внизу рисунка.

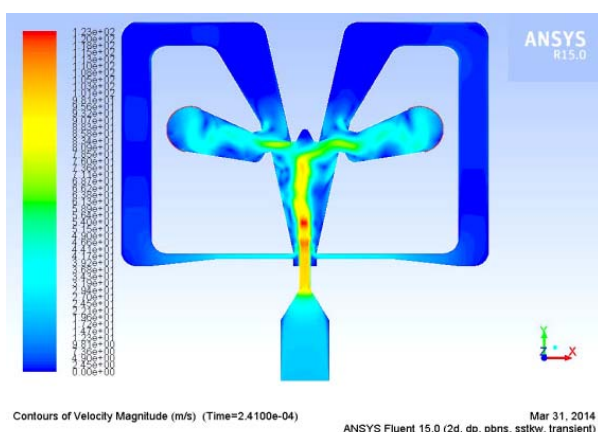


Рис. 1. Процесс установления струи в рабочей камере элемента после подачи питания

На рис. 2 показано, как происходит набор давления в левом выходном канале, что приводит к появлению давления управления в левом управляющем канале. Струя начинает отклоняться вправо. При этом происходит поступление рабочей среды от силовой струи в правый канал управления и распространение волны давления по нему навстречу формирующемуся в правом выходном канале потоку рабочей среды. Нестабильное поведение силовой струи объясняется еще неустановившимся течением рабочей среды в камере элемента.

Рис. 2. Набор давления в левом выходном канале

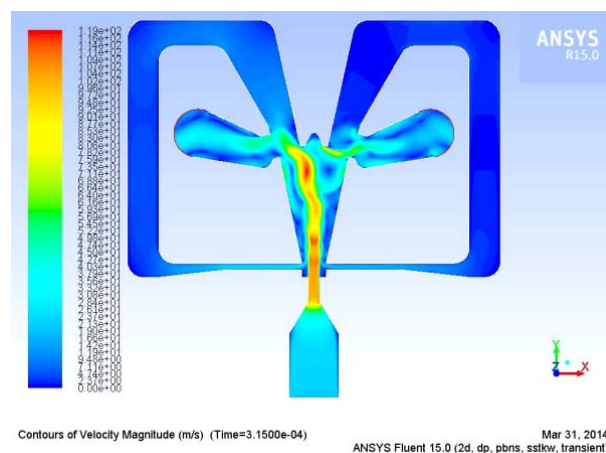


Рис. 2. Набор давления в левом выходном канале

На рис. 3 видно, что уже почти отклонившаяся вправо струя сбрасывается в левое атмосферное окно и пока не может преодолеть вихрь отраженного потока, формируемый справа от нее дефлектором. В правый выходной канал начинается выброс пульсаций давления и расхода, которые формируют потоки пульсирующей рабочей среды отраженного потока и которые могут являться источником ложных срабатываний генератора.

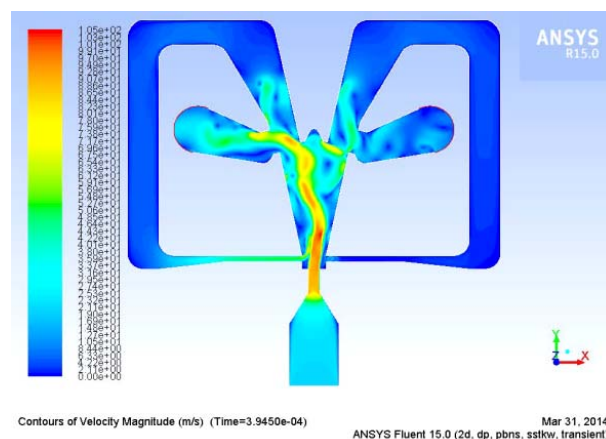


Рис. 3. Сброс струи в левое атмосферное окно

На рис. 4 видно, как струя опять устанавливается в «среднее» положение, отклонившись от левой стенки.

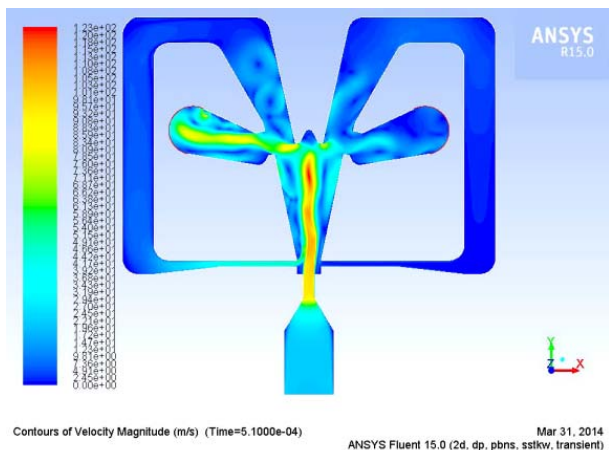


Рис. 4. Установка струи в среднее положение

Основной поток сбрасывается в левый атмосферный канал. По обе стороны струи формируются отраженные потоки. В обоих выходных каналах формируются пульсации давления. В рассматриваемый момент в левом выходном канале они больше, что и определяет поступление управляющего давления и расхода в левый канал управления по обратной связи генератора и перемещение силовой струи к правой стенке.

При этом мощность нового отраженного потока, формирующегося слева от силовой струи, сравнима с мощностью силовой струи. Этот мгновенный поток, отразившись от левой стенки рабочей камеры, направляется сначала против силовой струи, прижимает ее к правой стенке и потом разрывает ее. Только последующее перемещение силовой струи к правой стенке рабочей камеры ослабляет этот отраженный поток и он начинает эжектироваться силовой струей. Силовая струя восстанавливает свою целостность. Пульсации давления в левом выходном канале приводят к пульсациям давления в левом управляющем канале, что также вызывает нестабильность положения силовой струи, что дает начальные пульсации давления в правый выходной канал. Под влиянием давления в левом управляющем канале струя окончательно переходит к правой стенке элемента.

На рис. 5 показано, как поток рабочей среды в правом выходном канале начинает переключать силовую струю снова к левой стенке рабочего элемента.

Происходит формирование правого отраженного потока. В процессе его формирования виден разрыв силовой струи, отклонившейся от правой стенки. Таким образом, возникают пульсации давления в правом выходном канале.

Одновременно начинает поступать расход в левый канал управления, в то время пока ядро струи отклоняется влево.

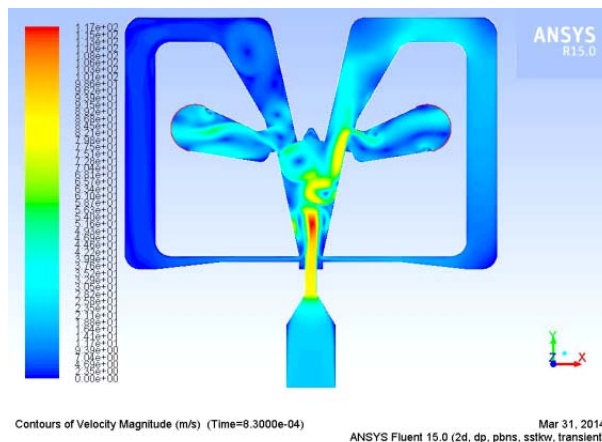


Рис. 5. Переключение силовой струи к левой стенке рабочей камеры элемента

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что:

- картина переключения силовой струи получена впервые численным методом расчета. Она отличается от общепринятой картины переключения [6, 7], которая существовала ранее. Полученные численные данные полей скоростей дают наглядную картину процесса переключения струйного элемента, согласующуюся с экспериментальными данными;

- на высокочастотных режимах работы переключение силовой струи происходит не под влиянием установившегося расхода в выходных каналах, а под влиянием выбросов расхода и давления, получающихся в выходных каналах элемента в процессе переключения струи;

- в каналах обратной связи волны давления распространяются как по направлению течения рабочей среды, так и против него. При увеличении частоты генератора этот переходный процесс начинает принимать постоянный характер с небольшой переменной составляющей. При этом с увеличением частоты генератора постоянная составляющая увеличивается, а переменная уменьшается. В конечном итоге в обеих обратных связях генератора появляется постоянный расход, поступающий в оба канала управления. Процесс переключения генератора останавливается. Достигнутая в этот момент частота генератора и является предельной;

- процесс переключения силовой струи в рабочей камере элемента может также иметь и акустическую природу. Перемещение силовой струи по кромкам дефлектора, атмосфер-

ным и выходным каналам с высокой скоростью вызывает появление акустических волн. С увеличением частоты генератора частота акустического шума увеличивается;

– полученная картина течения показывает, что оптимизация размеров струйного генератора позволит значительно увеличить его быстродействие. С точки зрения увеличения быстродействия необходимо переключать только ядро струи, а не развитую струю, имеющую эжекционные турбулентные составляющие. Оптимизацию размеров возможно провести, используя программный пакет ANSYS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касимов, А. М. Схемно-технические решения построения аппаратуры резервного канала комплекса командных приборов системы управления летательным аппаратом / А. М. Касимов, Э. М. Мамедли, А. В. Коротков, Е. В. Пустовалов, П. А. Харитонов // Датчики и Системы, 2005. – № 12. – С. 2–7.
2. Касимов, А. М. Вопросы реализации резервной системы управления / А. М. Касимов, Э. М. Мамедли, Л. И. Мельников, Л. Т. Чернявский // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: Изд. Центр РГТУ. – 2005. – С. 507–509.
3. Касимов, А. М. Радикальное повышение быстродействия элементной базы резервных систем управления летательными аппаратами / А. М. Касимов, Э. М. Мамедли, А. И. Попов, Л. Т. Чернявский // Датчики и Системы, 2005. – № 4. – С. 29–33.
4. Чаплыгин, Э. И. Математическая модель струйного расходомера / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики, 2004. – Т. 74, вып. 6. – С. 16–19.
5. Chaplygin, E. I. Mathematical model of a fluid flowmeter / E. I. Chaplygin, Yu. V. Zemskov, V. V. Korzin // Technical Physics, Vol. 49, № 6, 2004, pp. 677–680.
6. Лебедев, И. В. Элементы струйной автоматики / И. В. Лебедев, С. Л. Трескунов, В. С. Яковенко. – М.: Машиностроение, 1973. – 360 с.
7. Дудников, Д. А. Исследование аэрогидромеханических методов построения струйных логических схем и разработка многотактных устройств: дис. ... канд. техн. наук / Дудников Д. А. – Волгоград, 1995.

УДК 621.314.6

Д. А. Давыдов, С. Г. Поступаева, Н. В. Пройдакова

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Статья посвящена анализу систем автоматизированного мониторинга сетевой инфраструктуры предприятия, целью которого является разработка собственной автоматизированной системы мониторинга.

Ключевые слова: анализаторы протоколов, сетевые мониторы, базы данных, операционные системы, сетевой трафик, простой протокол сетевого управления, системный журнал.

The article is devoted to the analysis of systems for automated monitoring of the network infrastructure, to develop its own automated monitoring system.

Keywords: Protocol analyzers, network monitors, databases, operating systems, network traffic, simple network management Protocol, the system log.

Постоянный контроль работы локальной сети, составляющей основу любой корпоративной сети, необходим для поддержания ее в работоспособном состоянии. Контроль – это необходимый первый этап, который должен выполняться при управлении сетью. Ввиду важности этой функции ее часто отделяют от других функций систем управления и реализуют специальными средствами. Такое разделение функций контроля и управления полезно для больших и средних сетей, для которых установка интегрированной системы управления экономически целесообразна. Использование автономных средств контроля помогает адми-

нистратору сети выявить проблемные участки и устройства сети, а их отключение или реконфигурация он может выполнять в этом случае вручную. Процесс контроля работы сети обычно делят на два этапа – мониторинг и анализ.

На этапе *мониторинга* выполняется более простая процедура – сбор первичных данных о работе сети: статистики о количестве циркулирующих в сети кадров и пакетов различных протоколов, состоянии портов концентраторов, коммутаторов и маршрутизаторов и т. п.

Этап *анализа* – это более сложный и интеллектуальный процесс осмысления собранной на этапе мониторинга информации, сопоставления

ее с данными, полученными ранее, и выработки предположений о возможных причинах замедленной или ненадежной работы сети.

Задачи мониторинга решаются программными и аппаратными измерителями, тестерами, сетевыми анализаторами, встроенными средствами мониторинга коммуникационных устройств, а также агентами систем управления. Задача анализа требует более активного участия человека и использования таких сложных средств, как экспертные системы, аккумулирующие практический опыт многих сетевых специалистов.

Все многообразие средств, применяемых для анализа и диагностики вычислительных сетей, можно разделить на несколько крупных классов.

1. Агенты систем управления, поддерживающие функции одной из стандартных *MIB* (*Management Information Base*) – база данных информации управления, используемая в процессе управления сетью в качестве модели управляемого объекта в архитектуре агент-менеджер, и поставляющие информацию по протоколу *SNMP* или *CMIP*. Для получения данных от агентов обычно требуется наличие системы управления, собирающей данные от агентов в автоматическом режиме.

2. Встроенные системы диагностики и управления (*Embedded systems*). Эти системы выполняются в виде программно-аппаратных модулей, устанавливаемых в коммуникационное оборудование, а также в виде программных модулей, встроенных в операционные системы. Они выполняют функции диагностики и управления только одним устройством, и в этом их основное отличие от централизованных систем управления. Примером средств этого класса может служить модуль управления многосегментным повторителем *Ethernet*, реализующий функции автосегментации портов при обнаружении неисправностей, приписывания портов внутренним сегментам повторителя и некоторые другие. Как правило, встроенные модули управления «по совместительству» выполняют роль *SNMP*-агентов, поставляющих данные о состоянии устройства для систем управления.

3. Анализаторы протоколов (*Protocol analyzers*). Представляют собой программные или аппаратно-программные системы, которые ограничиваются в отличие от систем управления лишь функциями мониторинга и анализа трафика в сетях. Хороший анализатор протоколов

может захватывать и декодировать пакеты большого количества протоколов, применяемых в сетях, – обычно несколько десятков. Анализаторы протоколов позволяют установить некоторые логические условия для захвата отдельных пакетов и выполняют полное декодирование захваченных пакетов, то есть показывают в удобной для специалиста форме вложенность пакетов протоколов разных уровней друг в друга с расшифровкой содержания отдельных полей каждого пакета.

4. Оборудование для диагностики и сертификации кабельных систем. Условно это оборудование можно поделить на четыре основные группы: сетевые мониторы, приборы для сертификации кабельных систем, кабельные сканеры и тестеры.

5. Сетевые мониторы (называемые также сетевыми анализаторами) предназначены для тестирования кабелей различных категорий. Сетевые мониторы собирают также данные о статистических показателях трафика – средней интенсивности общего трафика сети, средней интенсивности потока пакетов с определенным типом ошибки и т. п. Эти устройства являются наиболее интеллектуальными устройствами из всех четырех групп устройств данного класса, так как работают не только на физическом, но и на канальном, а иногда и на сетевом уровнях.

При увеличении количества сетевого оборудования и серверов, задействованных в корпоративной инфраструктуре, увеличивается и количество проблем, требующих вмешательства и решения со стороны администратора [1]. Когда устройств и систем, требующих постоянного контроля, становятся сотни – появляется необходимость во внедрении системы мониторинга. Задачи мониторинга:

- сбор данных о работе коммутаторов, серверов и сервисов;
- оповещение о возникновении проблем;
- накопление и анализ собранных данных.

Большинство производителей сетевого оборудования предлагают собственные решения мониторинга сети, как платные, так и бесплатные. Пример – *Cisco Prime, Juniper Junospace*. Подобные решения полностью покрывают потребность в контроле за состоянием сети, но только в случае инфраструктуры, построенной на продукции производителя. Поэтому для решения задачи остается использовать либо сразу несколько систем производителей оборудования и каким-либо образом интегрировать их

между собой, либо выбрать одно из сторонних решений.

Прежде всего, следует рассмотреть основные службы, подсистемы и протоколы, которые могут использоваться для мониторинга сетевой инфраструктуры [2]:

– *Syslog* (*system log* – системный журнал) – стандарт отправки сообщений, широко распространенный в *unix*-, а так же *GNU/Linux*-системах. Помимо этого, поддерживается практически управляемым сетевым оборудованием, позволяет собирать данные самодиагностики системы, оповещения о произошедших событиях.

– *SNMP* (*Simple Network Management Protocol* – простой протокол сетевого управления) – стандартный протокол управления устройствами в *ip*-сетях. Предоставляется данные для управления в виде переменных, описывающих конфигурацию управляемых устройств. Эти переменные могут быть запрошены системой мониторинга у управляемых устройств. Широко поддерживается производителями сетевого оборудования. Данные, которые можно получить по *SNMP* от устройства, зависят от *MIB*, базы управляющей информации, реализованной производителем устройства.

– *Netflow* – сетевой протокол для учета сетевого трафика. Позволяет осуществлять сбор данных с маршрутизаторов о количестве прошедшего через устройство трафика, с указанием протокола, адресами и портами источника и назначения. Такие данные могут быть полезны при анализе потоков данных в сети и исследовании инцидентов.

Рассмотрим несколько наиболее распространенных решений мониторинга инфраструктуры, выявим преимущества и недостатки [3]:

Cacti – веб-приложение с открытым исходным кодом, написанное на *PHP* и *C*. Распространяется бесплатно. Предназначено для мониторинга сетевой инфраструктуры и построения графиков. Для хранения собранных данных использует *RRD* (*Round-robin database*, кольцевая база данных). Для работы с графиками используется *RRDTool*. Данные с устройств собираются в основном с помощью *SNMP*. Возможно расширение функционала с помощью внешних плагинов, так же написанных на *PHP*. Является наиболее распространенным решением для визуализации и сбора данных. После установки вся настройка осуществляется через графический интерфейс. Обладает минималь-

ными возможностями выявления проблем и отправки оповещений.

Достоинства веб-приложения **Cacti**:

– распространенность, широкая поддержка сообществом;

– расширяемый функционал.

Недостатки данного веб-приложения:

– ориентированность на построение графиков и опрос по *SNMP*;

– необходимость использования плагинов для создания системы оповещений об аномалиях;

– сложность написания плагинов (по сравнению с другими системами);

– все опросы происходят с локальной системы, удаленные проверки невозможны.

Таким образом, **Cacti** требует серьезной доработки для использования в качестве основной системы мониторинга и наиболее разумного сочетания с другими системами, будучи использованным исключительно для построения графиков, хранения и экспорта данных.

Nagios – одна из самых популярных систем мониторинга. Открытые исходные коды, распространяется бесплатно. Простая и расширяемая архитектура, позволяет быстрое написание и адаптацию расширений. Возможна установка на любую *unix*-подобную систему (*GNU/Linux*, *FreeBSD*, *Solaris*). Обладает широкими возможностями по настройке системы оповещений о проблемах, эскалации. Возможен удаленный мониторинг через *SSL*-, *SSH*-туннели с помощью *NRPE* (*Nagios Remote Plugin Executor*). За счет распространенности имеет множество доступных плагинов на все случаи жизни. Имеется возможность проактивного решения проблем, средства для построения распределенного мониторинга. Все настройки хранятся и изменяются в файлах конфигурации. Позволяет определение иерархии устройств, уменьшая количество уведомлений о проблемах на нижестоящих устройствах при отказе вышестоящего.

Достоинства системы **Nagios**:

– распространенность, широкая поддержка сообществом;

– возможность создания распределенной системы, выполнения удаленных проверок;

– простой формат файла конфигурации, возможность автоматизировать внесение новых устройств в систему.

Недостатки данной системы:

– практически отсутствуют встроенные средства визуализации, построения графиков;

- нет возможности конфигурации через графический интерфейс;
- запуск каждого плагина как отдельного процесса в ходе работы системы;
- после изменения конфигурации требуется перезапуск *Nagios*;
- большой минимальный интервал между проверками.

Icinga – открытая система мониторинга. Исходные тексты *Icinga* распространяются в рамках лицензии *GPL*.

От *Nagios* проект *Icinga* также отличается переработанной архитектурой, переведенной на использование прослоек *IDOMOD* и *IDO2DB*, позволяющих организовать хранение данных мониторинга и конфигурационной информации в СУБД *MySQL*, *Oracle* или *PostgreSQL*. Структура *Icinga* оптимизирована для развертывания распределенных систем мониторинга, при которой возможно создание нескольких агентов мониторинга, осуществляющих проверки и направляющих результаты на основной узел. В состав *Icinga* входит более гибкий и удобный модульный *web*-интерфейс, переписанный на языке *PHP*, активно использующий *AJAX* и представляющий статистику в виде графиков. Для обеспечения интеграции с внешними сервисами предусмотрено несколько *API*: *XML*, *JSON*, *SOAP*.

Достоинства системы **Icinga**:

- мониторинг распределенных систем;
- мобильный интерфейс для смартфонов;
- непрерывное развитие;
- *Nagios* обратная совместимость;
- 100 % бесплатный и с открытым исходным кодом.

Недостатки данной системы:

- необходимость серьезной адаптации системы для мониторинга конкретной сетевой инфраструктуры;
- не обеспечена отказоустойчивость;
- сложность в настройке.

Zabbix – система построения распределенного мониторинга, исходные коды открыты, поддерживается латвийской компанией *Zabbix SIA*. Для хранения данных использует базу данных. Поддерживает различные способы уведомления о проблемах. Конфигурация системы централизована, старшие по иерархии сервера мониторинга контролируют настройки подчиненных серверов. Возможна установка *zabbix*-сервера на любую *unix*-подобную операционную систему. Широкие встроенные возможно-

сти визуализации. Есть система обнаружения объектов мониторинга.

Недостатки системы **Zabbix**:

- необходимость серьезной адаптации системы для мониторинга конкретной сетевой инфраструктуры;
- сложность написания расширений (по сравнению с *Nagios*);
- все данные истории хранятся в базе, что ограничивает масштабируемость и неэффективно;
- не обеспечена отказоустойчивость.

Advanced Host Monitor – позволяет контролировать локальные ресурсы (объем свободного дискового пространства, размер каталогов или файлов, контрольные суммы файлов), а также сервисы, процессы, *SNMP*-устройства и т. д. При изменении статуса устройства монитор может выполнить набор заданных действий: выдать звуковое или визуальное предупреждение, послать *e-mail* (например, на пейджер или сотовый администратору сети), сформировать *HTML*-отчет, запустить внешнюю программу. Для разных заданий можно определить разные расписания, разные наборы действий при изменении статуса. *Advanced Host Monitor* умеет вести *log*-файлы в *HTML*, *DBF* и текстовом форматах с различной степенью детализации. Имеет встроенный *viewer* и анализатор *log*-файлов.

Достоинства системы **Advanced Host Monitor**:

- различные тесты позволяют контролировать практически любой параметр сервера или другого сетевого устройства;
- 30 методов реакции на события, комбинируемые в гибкие профайлы;
- пакет включает агенты для мониторинга *Linux*, *FreeBSD* и *Solaris*-систем.

Недостатки данной системы:

- не обеспечена отказоустойчивость;
- является платной системой с закрытым кодом;
- нет возможности централизованного управления.

Наиболее подходящим для решения задачи построения целостной системы мониторинга состояния корпоративной сети является сочетание *Advanced Host Monitor* и внешней утилиты сбора и хранения данных. За счет простой, расширяемой архитектуры данная связка позволит полностью покрыть потребность в сборе, хранении и анализе происходящих событий.

Учитывая достоинства и недостатки описанных систем необходимо разработать авто-

матризованную систему мониторинга сетевой инфраструктуры предприятия. Задачи системы автоматизированного мониторинга сетевой инфраструктуры сформулируем следующим образом. Система должна оповещать системных администраторов о состоянии оборудования визуальными и звуковыми сигналами. Система мониторинга должна обладать следующими функциями:

- добавление, редактирование и удаление категорий объектов;
- добавление, редактирование и удаление объектов;
- вывод текущей информации об объекте;
- добавление, редактирование и удаление объектов по паролю;
- автоматическое присвоение статусов объекту мониторинга;

- общая настройка времени опроса для объектов;
- возможность просмотра статусов объектов через *Web*-интерфейс;
- возможность подключения к серверу мониторинга по *API*;
- просмотр информации через приложение для ОС *Windows*;
- звуковое оповещение об изменении статуса;
- всплывающее оповещение из трея об изменении статуса;
- отображение истории изменения статусов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://www.itdojo.com/synner/html/synner2/synner2_p1.htm
2. Таненбаум, Э. С. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл, 5-е изд. – СПб. : Питер, 2012. – 960 с.
3. <http://citforum.ru/nets/articles/authentication/>

УДК 621.757:519

А. Г. Кесоян, Н. Г. Кремлева, Е. Ю. Быстров

НЕЗАВЕРШЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ КОМПЛЕКТОВАНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрены условия автоматизированного комплектования прецизионных деталей в соединения. Изложены аналитические зависимости для расчета величины незавершенного производства при комплектовании деталей из уменьшенных размерных групп.

Ключевые слова: комплектование, прецизионные соединения, незавершенное производство, замыкающее звено, точность.

Conditions of precision parts' automatized gathering in joints have been considered. Analytic dependences for calculation of work-in-process value at gathering of parts from reduced dimensional groups have been stated.

Keywords: gathering, precision joints, work-in-process, master link, accuracy.

Перспективным направлением в развитии технологии сборки высокоточной продукции является совершенствование метода групповой взаимозаменяемости (ГВ). Основную задачу обеспечения точности прецизионной сборки составляет отбор в комплекты таких деталей, размеры которых позволяют выдерживать требуемую величину замыкающего звена.

Предпосылкой к решению данной задачи является уменьшение группового допуска, что расширяет условия взаимозаменяемости за счет возможности образовывать соединения базовых деталей одной группы с присоединяемыми деталями нескольких групп. При этом сложность определения достижимых результатов требует автоматизации процесса расчета сборочных комплектов с использованием ЭВМ.

Общим недостатком существующих методов обеспечения требуемой точности является отсутствие решения задачи сборки прецизионных соединений в аналитическом виде для различных схем комплектования деталей, что резко сужает возможности, а в некоторых случаях не позволяет прогнозировать достижимые результаты на этапе проектирования технологического процесса сборки.

Рассмотрим сборку деталей трехзвенной размерной цепи отверстие-вал-зазор (A_1, A_2, A_Δ) с групповым допуском, уменьшенным в n раз по сравнению со сборкой с групповой взаимозаменяемостью. Условия размерного комплектования расширяются на разность первоначального $T_{гр}$ и уменьшенного в n раз $T_{грn}$ групповых допусков [1]. В качестве примера для

сборки при $n=3$ условия комплектования схематически показаны стрелками на рис. 1. Пунктиром выделены дополнительные размерные группы, способные образовать соединения обусловленной точности с крайними размерными группами, расположенными внутри первоначальных групповых допусков, $A_{\Delta\min}$ и $A_{\Delta\max}$ – соответственно наименьший и наибольший размеры замыкающего звена.

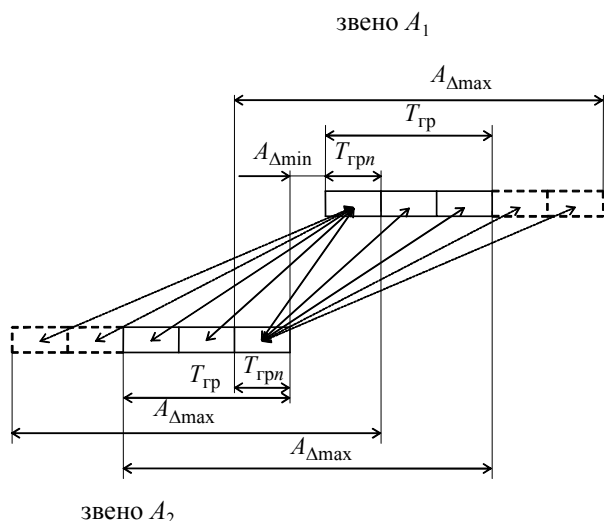


Рис. 1. Схема комплектования прецизионных деталей

При обычной сборке с ГВ, которой соответствует групповой допуск $T_{гр}$, в соединение вступают детали только одной группы звена A_1 с одной группой звена A_2 , причем детали соседних групп звена A_1 не могут образовать соединение требуемой точности с деталями данной группы звена A_2 и могут составлять незавершенное производство. При уменьшенном в три раза групповом допуске $T_{грn}$ одна из сопрягаемых деталей каждой группы может быть собрана с парной деталью пяти различных групп.

Возможность подобного перебора деталей в комплектах, образующих узел с точностью, лежащей в пределах допуска на размер замыкающего звена, позволяет не только увеличить

число взаимозаменяемых групп, но и дособрать остаток деталей одной размерной группы с парными деталями соединения из других размерных групп. Таким образом, расширяются условия комплектования, и возникает возможность даже при неодинаковых допусках на изготовление сопрягаемых деталей сократить, а иногда полностью исключить незавершенное производство, что в значительной мере уменьшает объем производственных заделов. Данный метод достижения требуемой точности соединений может быть назван сборкой с межгрупповой взаимозаменяемостью (МГВ) деталей [2].

Согласно возможности перебора групп деталей при увеличенном их количестве, т. е. при уменьшенном групповом допуске, как видно из схемы на рис. 1, в сборку могут вступать группы менее точно изготавливаемой детали, которые ранее не участвовали в образовании прецизионных соединений.

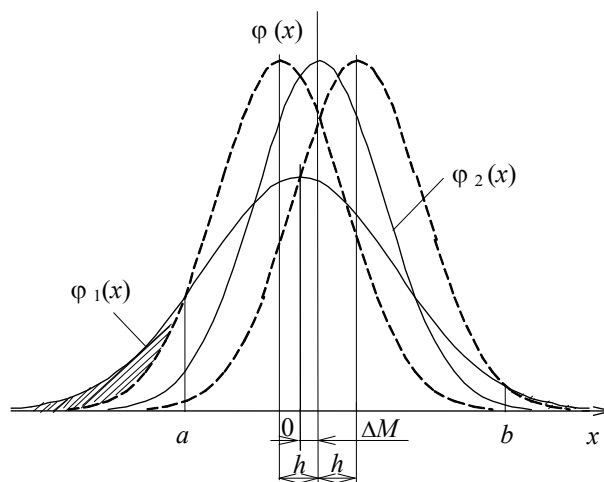


Рис. 2. Схема образования незавершенного производства при сборке с межгрупповой взаимозаменяемостью

На рис. 2 представлена схема образования незавершенного производства при сборке с МГВ, на которой его количественное представление выражается заштрихованной площадью и определится по формуле:

$$Q = \int_{-\infty}^a \{ \phi_1(x) - \phi_2[(x - \Delta M + h)k_r] \} dx + \int_b^{+\infty} \{ \phi_1(x) - \phi_2[(x - \Delta M - h)k_r] \} dx, \quad (1)$$

где a и b – абсциссы крайних точек пересечения соответственно смещенных кривых законов распределений размеров сопрягаемых поверхностей, $k_r = \sigma_1(x)/\sigma_2(x)$ – коэффициент относительной точности изготовления партий сопрягаемых деталей, ΔM – отклонение центров группирования разме-

ров деталей в производственных партиях после сдвига распределений на величину средней допустимой точности в соединениях.

Если распределения $\phi_1(x)$ и $\phi_2(x)$ подчиняются нормальному закону с математическими ожиданиями и средними квадратическими от-

клонениями соответственно $M_1(x)$, $\sigma_1(x)$ и $M_2(x)$, $\sigma_2(x)$, то плотности вероятности распределений имеют вид:

$$\phi_1(x) = \frac{1}{\sigma_1(x)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_1(x)^2}\right], \quad (2)$$

$$\phi_2(x) = \frac{1}{\sigma_2(x)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-h-\Delta M)^2}{2\sigma_2(x)^2}\right], \quad (3)$$

при условии, что $M_1(x)=0$, т. е. совпадает с осями начала координат.

Для определения координат точек a и b приравнены уравнения (2) и (3), произведено логарифмирование и в результате преобразований получено:

$$a = \frac{1}{k_T^2 - 1} \left[(\Delta M - h)k_T^2 - \sqrt{(\Delta M - h)^2 k_T^2 + 2(k_T^2 - 1)\ln k_T} \right], \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{k_T^2 - 1} \left[(\Delta M + h)k_T^2 + \sqrt{(\Delta M + h)^2 k_T^2 + 2(k_T^2 - 1)\ln k_T} \right]. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) переменные ΔM , a и b выражаются в единицах $\sigma_1(x)$.

В результате произведенных преобразований выражение (1) принимает вид:

$$Q = \Phi\left[(b - \Delta M - h)k_T\right] - \Phi\left[(a - \Delta M + h)k_T\right] + \Phi(a) - \Phi(b), \quad (6)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp(-t^2/2) dt$ – функция Лапласа.

На рис. 3 приведены графики рассчитанной по формуле (6) зависимости объема Q незавершенного производства от увеличения n числа размерных групп при конкретных условиях, определяемых значениями k_T и TA_Δ (TA_Δ принято в единицах σ_1). Исследования проведены для относительных значений TA_Δ принятыми 1, 2 и 3 (соответственно штрихпунктирная, штриховая и сплошная линии на графиках).

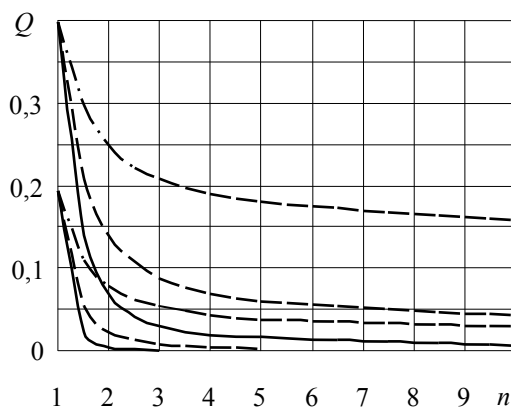


Рис. 3. Зависимость объема незавершенного производства от n при различных значениях k_T и допуска на размер замыкающего звена TA_Δ

Значения величины k_T приняты равными 1,5 и 2,4 в соответствии с рекомендуемыми ГОСТ 25347–82 посадками прецизионных соединений при сборке партий деталей, изготовленных с разностью в один и два качества. На графиках рис. 3 верхнее семейство кривых соответствует $k_T = 2,4$, нижнее – $k_T = 1,5$.

Как видно из графиков, применение метода МГВ позволяет сократить незавершенное производство деталей на 50–70 % при уменьшении группового допуска в 2–3 раза. Разработанные соотношения можно использовать для расчета допусков деталей при сборке, как с групповой, так и с межгрупповой взаимозаменяемостью на стадии проектирования изделий, а также при разработке технологических процессов прецизионной сборки, осуществляя выбор рекомендуемых величин групповых допусков. Возможность выбора рациональных допусков деталей, обеспечивающих полную собираемость партий соединений, значительно упрощает процесс автоматизации комплектования, так как исключает появление несобираемых остатков в накопительных устройствах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кесоян, А. Г. Автоматизированное комплектование прецизионных деталей в соединения / А. Г. Кесоян, Н. Г. Кремлева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 11). – С. 62–64.
2. Кесоян, А. Г. Анализ условий взаимозаменяемости деталей при автоматизированном комплектовании прецизионных соединений / А. Г. Кесоян, Н. Г. Кремлева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 21 (148) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 12). – С. 67–69.

УДК 621.91.02

*Е. Г. Крылов, А. М. Макаров, Н. В. Козловцева***АВТОМАТИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

Для повышения качества организационно-технологической подготовки режущего инструмента для автоматизированного станочного оборудования предложено использовать методологию функционального моделирования. Разработана функциональная модель системы инструментального обеспечения по методологии IDEF0.

Ключевые слова: режущий инструмент, система инструментального обеспечения, функциональное моделирование, формализация.

Authors propose to use the methodology of functional simulation for improving quality of technical and organizational preparation of a cutting tool for automated machining equipment. A functional model of tool management system using methodology IDEF0 was developed.

Keywords: cutting tool, system tool support, functional modeling, formalization.

В условиях динамично меняющейся рыночной конъюнктуры гибкость является определяющим фактором технико-экономической эффективности и развития производства. Обеспечение конкурентоспособности предприятий, использующих автоматизированные линии и системы, требует применения не только современного высокотехнологичного оборудования и оснастки, но и новых организационных структур и подходов, которые позволят существенно сократить потери времени при выпуске новых видов продукции. Повышению эффективности реконфигурируемых автоматизированных производств посвящены работы Т. Г. Гришиной [1], А. В. Аверченкова [2], Д. В. Лобанова [3], А. В. Капитанова [4].

Во многих отраслях промышленности, таких как авиастроение, судостроение, транспортное машиностроение, приборостроение все чаще находят применение материалы с улучшенными физико-механическими свойствами (повышенным сопротивлением износу, температуре, коррозии, пластическим деформациям). Обработка изделий из таких материалов на автоматизированном станочном оборудовании сопряжена с рядом трудностей. Исследованиями [5] установлено, что многие рекомендации по выбору рациональных режимов обработки, марки инструментального материала и типа режущего инструмента для обработки полимеров, композитов, керамики, высокопрочных и тугоплавких сплавов ограничены и зачастую требуют проверки и коррекции в конкретных технологических условиях.

Сокращение объемов выпуска продукции отечественных заводов и высокая энергоёмкость производства многих видов инструмен-

тальных материалов и инструмента в сочетании с растущими ценами на электроэнергию привело к резкому снижению изготовления всех видов инструмента и активному его замещению импортными аналогами. По данным статистики, доля покупного инструмента достигает 80 % в системе инструментального обеспечения предприятий. Основными иностранными поставщиками режущего инструмента являются компании Sandvik Coromant (Швеция), Kennametal (США), Iscar (Израиль), Walter AG (Германия). Режущий инструмент иностранного производства, как правило, превосходит отечественный по качеству и разнообразию номенклатуры, но имеет более высокую стоимость, и его высокие характеристики зачастую могут быть обеспечены только в специально созданных производственных условиях [6].

Конструкции современных режущих инструментов одного функционального назначения различаются структурной компоновкой и геометрическими параметрами режущих, корпусных и крепежных элементов, число вариантов которых может достигать нескольких сотен комбинаций. На малых и средних предприятиях, работающих в условиях многономенклатурного производства, выбор конструкции режущего инструмента часто основывается на рекламных материалах, личном или коллективном производственном опыте [7]. Это обусловлено отсутствием методики, позволяющей на основании формализованных параметров сформировать системное описание номенклатуры режущего инструмента на предприятии и выбрать конкретного ее представителя на основе технических и экономических критериев. Для реализации задач импортозамещения в области стан-

коинструментальной промышленности (постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 328) актуальной является разработка новых научно обоснованных методов проектирования структур процессов металлообработки с целью снижения расходов на покупку режущего инструмента и сокращения времени на переналадку оборудования.

Повысить эффективность принимаемых решений на этапе организационно-технологической подготовки производства возможно за счет методологии функционального моделирования IDEF0 [8], которая позволяет оптимизировать работу как отдельных служб, так и предприятия в целом. Основу IDEF0-технологий составляет структурный анализ связей в сложном объекте, выявление «слабых» мест и выработка решений по оптимизации функционирования объекта. Технологические операции описываются входами, выходами, контрольными воздействиями и механизмами. Применительно к системе инструментального обеспечения (СИО) автоматизированного участка или цеха на основе IDEF-моделирования возможно:

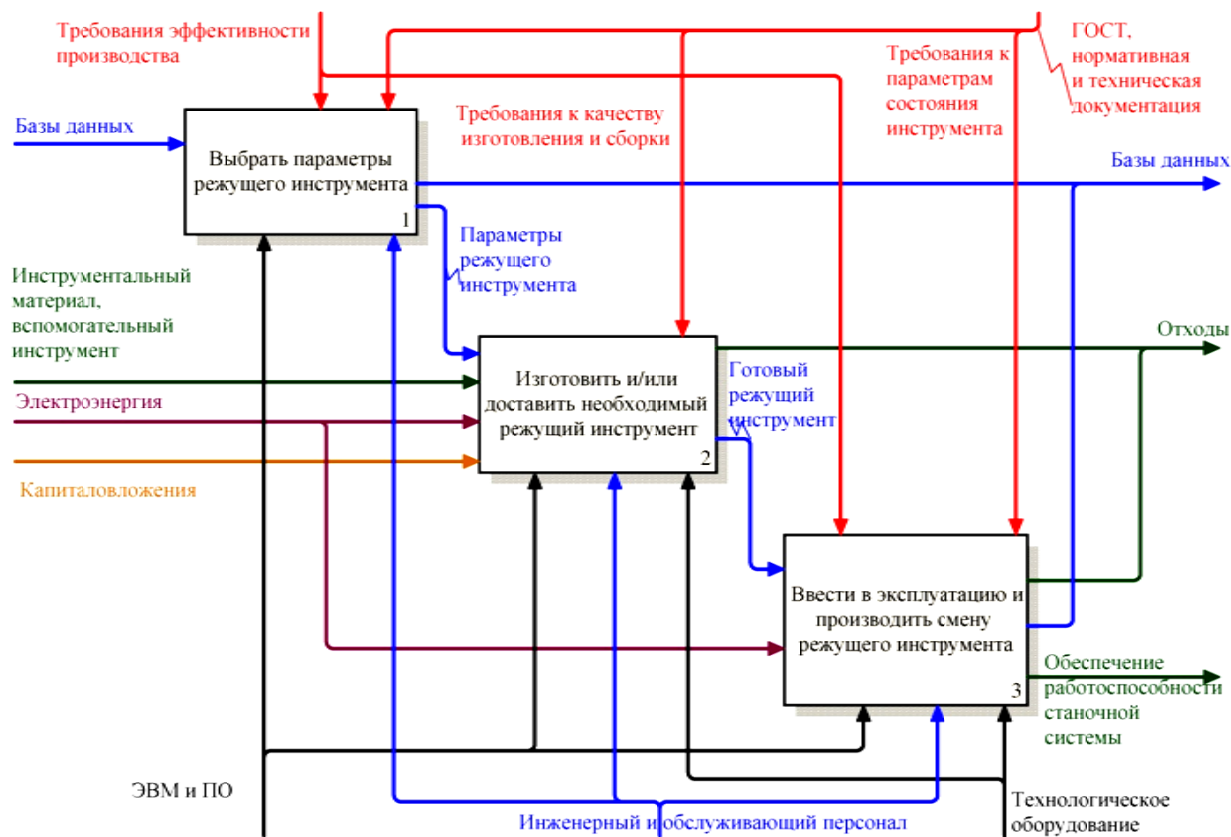
1) получить представление о работе СИО как о выполнении совокупности процессов и определить ее место в производственной системе;

2) осуществить декомпозицию при создании структурной модели СИО, наглядно иллюстрирующей структуру и взаимосвязи ее составляющих;

3) узнать информацию о процессах и их взаимосвязях в СИО, причем эта информация может быть извлечена из модели и представлена в виде отдельной базы данных, которая может в дальнейшем использоваться для решения разнообразных задач.

Расчет и использование количественных характеристик в процессе моделирования позволяет:

- оценить оптимальность организации СИО и ее составляющих;
- определить источники потерь времени;
- проконтролировать целенаправленно вносимые в систему изменения, которые ведут к организации оптимальной работы СИО;
- сократить объем и предотвратить образование незавершенного производства.



Модель СИО в IDEF0

На рисунке показана диаграмма IDEF0 для СИО станочного оборудования в автоматизи-

рованном производстве. Диаграмма выполнена с помощью программного продукта ERwin

Process Modeler компании Computer Associates BPWIN. Операции на диаграмме IDEF0 расположены в порядке доминирования – с левого верхнего угла диаграммы в правый нижний. В левом верхнем углу размещается самая важная операция или операция, выполняемая первой. Стрелка, направленная с выхода вышестоящей операции на вход или управление нижестоящей, является прямой связью; стрелка, направленная с выхода нижестоящей операции на вход или управление вышестоящей, является обратной связью. Отсутствие обратных связей, функции без выхода или управления, дублирующиеся функции указывают на несовершенство анализируемых процессов. Построенные по результатам анализа деятельности предприятия структурные модели могут становиться предметом оптимизации любое количество раз до достижения наилучших результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гришина, Т. Г. Вероятностное обоснование и принятие решений при управлении автоматизированным производством / Т. Г. Гришина // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 1. – С. 48–52.

2. Аверченков, А. В. Автоматизированный выбор металлорежущего инструмента для механической обработки заготовок деталей машин / А. В. Аверченков // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 9. – С. 27–31.

3. Лобанов, Д. В. Автоматизация организационной подготовки инструмента для обработки композиционных материалов / Д. В. Лобанов, А. С. Янюшкин // Автоматизация и современные технологии. – 2013. – № 3. – С. 3–9.

4. Капитанов, А. В. Технологическое проектирование автоматизированных станочных систем многономенклатурного производства / А. В. Капитанов // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 3. – С. 34–38.

5. Крылов, Е. Г. Рациональный выбор режущего инструмента в автоматизированном производстве / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 10. – С. 3–6.

6. Автоматизированная система выбора технологических решений для оборудования с ЧПУ / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, А. Б. Мишкевич, В. В. Литвинцева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 11). – С. 67–69.

7. Функциональное моделирование процесса выбора режущего инструмента / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров, Н. В. Козловцева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 11). – С. 64–67.

8. Методология функционального моделирования IDEF0: Руководящий документ. – М. : Госстандарт России, 2000. – 75 с.

УДК 621.783.223:681.5.037.22

М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров, М. А. Круглов

ОЦЕНКА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧЬЮ ПО ЧАСТОТНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрены переходные характеристики системы управления методической нагревательной печью для трех отапливаемых зон. Получены предельные параметры настройки интегральных регуляторов зон по частотному показателю колебательности.

Ключевые слова: методическая печь, интегральный регулятор, переходная характеристика, частотный показатель колебательности.

Transient responses of continuous reheating furnace control system for three heated zones have been considered. Extreme adaption parameters of zone controllers by frequency oscillation index have been obtained.

Keywords: continuous furnace, integral controller, transient response, frequency oscillation index.

К промышленным системам управления предъявляются особые требования по работоспособности, и, в первую очередь, они должны обладать определенным запасом устойчивости, т. е. переходные процессы, возникающие в них, должны затухать достаточно интенсивно [1]. Методические нагревательные печи работают в неустановившемся режиме значительную часть времени [3, 4]. В связи с этим большое значение имеет оценка запаса устойчивости систем управления процессом нагрева в печах. Подоб-

ная оценка проведена для системы автоматического управления нагревом заготовок в методических печах стана 2000 ЗАО «ВМК «Красный Октябрь», реализованной на интегральных регуляторах [5, 6]. Для этого определены максимально допустимые коэффициенты передачи И-регуляторов для каждой из трех отапливаемых зон печи – первой сварочной, второй сварочной и томильной.

Данной процедуре должно предшествовать построение графика переходной характеристи-

ки объекта по экспериментальным точкам и проведение касательной в области ее наибольшего наклона.

В результате обработки протоколов нагрева печей стана 2000 [7, 8] получены экспериментальные значения элементов векторов времени t_0 и переходной характеристики h_0 , а также установившееся значение характеристики. После ввода этих значений в пакете MathCAD по экспериментальной характеристике фиксируются выбранные координаты точки касания t_p , h_p и ее установившееся значение $h_{уст}$. Затем задается ориентировочное значение постоянной времени T_0 и строится прямая линия в соответствии с выражением [1]:

$$y = \frac{h_{уст}}{T_0} \cdot (t - t_p) + h_p.$$

Если данная прямая оказывается не касательной, то значение T_0 корректируется так, чтобы линия переместилась до касания переходной кривой. Значение запаздывания определяется по формуле [1]:

$$\tau_0 = t_p - \frac{T_0}{h_{уст}} \cdot h_p.$$

Для графика переходной характеристики первой сварочной зоны (рис. 1) были выбраны следующие координаты точки касания: $t_p = 3$ мин; $h_p = 0,6$; касательная получается в этом случае при $T_0 = 2,2$ мин и $\tau_0 = 1,486$ мин. Коэффициент передачи объекта $k_0 = 0,872$. На рис. 1 переходная характеристика h_0 изображена сплошной ломаной, а касательная y – пунктирной прямой.

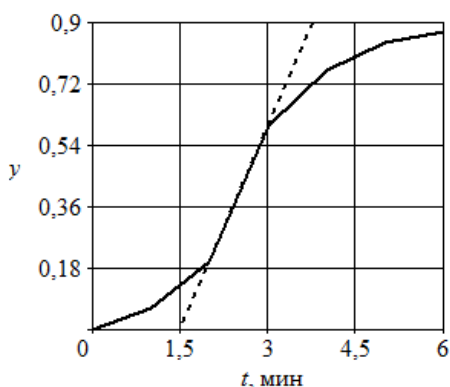


Рис. 1. График переходной характеристики первой сварочной зоны

Обработанную таким образом переходную характеристику можно аппроксимировать характеристикой аperiodического звена второго порядка с последовательно включенным звеном запаздывания. Это дает достаточно хорошее

приближение для зоны методической нагревательной печи с точки зрения динамических свойств по каналу «расход топлива – температура центра сляба». Коэффициент передачи $k_{мод}$ и постоянная времени аperiodического звена $T_{мод}$ выбираются равными k_0 и T_0 , а запаздывание $\tau_{мод}$ равным τ_0 . Передаточная функция такой модели определяется как [1]:

$$W_{мод}(s) = \frac{k}{(T_{мод}s + 1)^2} \cdot \exp(-\tau_{мод}s). \quad (1)$$

В соответствии с выражением (1) получена передаточная функция первой сварочной зоны:

$$W_{мод}(s) = \frac{0,872}{(2,2s + 1)^2} \cdot \exp(-1,486s).$$

Для систем регулирования с интегральной составляющей в алгоритме функционирования регулятора условие устойчивости замкнутого контура выглядит следующим образом [1]:

$$|\Phi(j\omega_{рез})| \leq M_{доп},$$

где $|\Phi(j\omega_{рез})|$ – модуль комплексной частотной характеристики (КЧХ) разомкнутого контура; $M_{доп}$ – заранее назначенное допустимое значение частотного показателя колебательности контура, а именно, относительного значения резонансного пика КЧХ.

При определении предельно допустимого значения коэффициента передачи регулятора $k_{п}$, находящегося в замкнутом контуре системы, следует построить характеристику разомкнутой системы $W_{р.с}(j\omega)$ при произвольном значении этого коэффициента и начертить на той же плоскости окружность радиуса $M = M / (M^2 - 1)$, центр которой расположен на отрицательной вещественной полуоси на расстоянии $u = M^2 / (M^2 - 1)$. Требуемое соотношение между радиусом M -окружности r и координатой ее центра u выглядит следующим образом:

$$r = u / M. \quad (2)$$

Если расчеты автоматизированы, выражение (2) может быть включено в программу расчетов и задача сводится только к подбору u , при котором окружность коснется КЧХ разомкнутого контура.

На рис. 2 построены КЧХ разомкнутого контура при единичном коэффициенте передачи И-регулятора (сплошная кривая) и касающаяся ее M -окружность (пунктирная кривая) при значении $M = 1,8$, что соответствует степени затухания колебаний $\psi = 0,85$ в колебательном звене. На этом рисунке $q(\omega)$ и $q_m(\omega, u)$ – мнимые составляющие КЧХ и M -окружности

соответственно, а $p(\omega)$ и $p_m(\omega, u)$ – их вещественные составляющие. В результате подбора положения центра окружности получено значение $u = 6,628$.

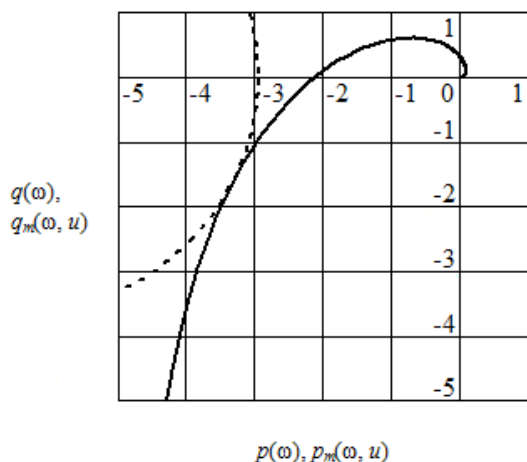


Рис. 2. КЧХ разомкнутого контура и M -окружность

Затем рассчитывается значение максимально допустимого коэффициента передачи И-регулятора для первой сварочной зоны по формуле [1]:

$$k_{п} = \frac{M_{\text{доп}}^2}{(M_{\text{доп}}^2 - 1) \cdot u}. \quad (3)$$

Из выражения (3) получено значение $k_{п} = 0,218$. Подобные операции произведены для регуляторов второй сварочной и томильной зон. В результате расчетов получены предельные значения коэффициентов настройки 0,211 и 0,172 соответственно.

Предложенная оценка запаса устойчивости для И-регуляторов позволит на этапе проекти-

рования систем управления осуществить выбор параметров настройки И-регуляторов, при котором переходные процессы, возникающие в замкнутых контурах, будут затухать наиболее интенсивно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердобинцев, Ю. П. Выбор комплексного критерия оптимизации процесса нагрева в методической печи / Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик, К. Ф. Куадио // Известия ВолгГТУ. межвуз. сб. науч. ст. № 7 (110) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 9). – С. 111–113.
2. Serdobintsev, Y. P. Algorithm of optimal modes calculation for slab heating in a continuous furnace / Y. P. Serdobintsev, M. P. Kukhtik // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2014. – No. 2. – Mode of access : <http://www.science-sd.com/457-24551>
3. Сердобинцев, Ю. П. Алгоритм рационального комплектования садки слябов методической печи / Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик, А. М. Макаров // Металлург. – 2014. – № 2. – С. 72–75.
4. Кухтик, М. П. Стационарная модель температурного поля садки металла в методической толкательной печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 114–116.
5. Кухтик, М. П. Алгоритм оптимизации процесса нагрева слябов в методической печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 11). – С. 73–75.
6. Кухтик, М. П. Методика учета воздействия простоев на процесс нагрева слябов в методической печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 21 (148) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 12). – С. 80–82.
7. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / В. Я. Ротач. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.

УДК 621.798.34

А. М. Макаров, Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик
КОНСТРУКТИВНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА
ЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГИБКИХ КОНТЕЙНЕРОВ
 Волгоградский государственный технический университет
 E-mail: app@vstu.ru

Для автоматизации захвата, раскрытия, удержания при наполнении и закрытия для прошивки гибких контейнеров на основе структурно-функциональной схемы разработано семейство рычажно-шарнирных захватных устройств (РШЗУ), содержащих рычажно-шарнирный механизм с захватами в виде пальцев и привод их перемещения в виде одного или нескольких пневматических цилиндров. Проанализировано влияние количества звеньев рычажно-шарнирных механизмов на конструктивно-технологическую сложность захватных устройств. РШЗУ могут применяться на автоматических линиях расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

Ключевые слова: расфасовка, рычажно-шарнирные захватные устройства, гибкий контейнер, структурно-функциональная схема.

In terms of the structural and functional scheme family of lever-hinged gripping devices (LHGD) has been developed for automation of capturing, opening, retention at filling and closing for stitching of flexible containers. LHGD contains lever-hinged mechanism with grippers in the form of fingers and drive of their move as one or several pneumatic cylinders. Influence of lever-hinged mechanisms links' number on constructive-technological complexity of gripping devices has been analyzed. LHGD can be used on transfer lines of packaging of bulk materials in flexible containers.

Keywords: packaging, lever-hinged gripping devices, soft container, structural and functional scheme.

Для расфасовки сыпучих грузов используются специальные виды потребительской (коробки, пачки, пакеты, банки) и транспортной (гибкие контейнеры, бочки, барабаны) тары. Гибкие контейнеры (ГК) являются наиболее распространенной транспортной (а часто и потребительской) мягкой упаковкой вместимостью от пяти до 50 кг. Они имеют корпус в виде рукава, дно и горловину. ГК широко применяются для перевозки и хранения различных сыпучих продуктов в пищевой, химической промышленности, при производстве строительных материалов и конструкций, сельском хозяйстве и других отраслях экономики.

Для захвата, раскрытия и удержания расфасовочной тары при наполнении могут быть использованы различные захватные устройства (ЗУ), при этом общими требованиями к ним яв-

ляются высокая надежность захвата и удержания, максимальная простота конструкции, возможность работы в агрессивных, запыленных и взрывоопасных средах.

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

Составим таблицу анализа функций типовой схемы захватных устройств для ГК. Для этого разделим данную ТС на элементы. Выделим главные элементы, обозначим их E и объекты окружения, обозначим V . Определим функции f каждого элемента системы, а результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1

Анализ функций захватных устройств для гибких контейнеров

Элемент		Функция	
Обозначение	Наименование	Обозначение	Описание
E_1	Привод	f_1	Приводит в движение передаточный механизм (ПМ), передает энергию от источника (V_1) к ПМ (E_2)
E_2	Передаточный механизм	f_2	Передает движение и усилие от привода (E_1) к захватному механизму (E_3).
E_3	Захватный механизм	f_3	Захватывает и удерживает объект манипулирования (V_2)

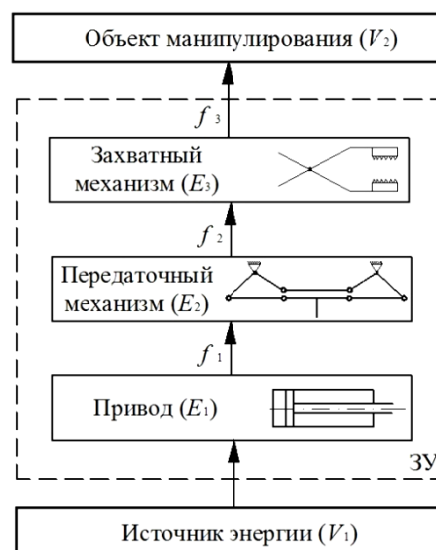
Захватные устройства для мягкой тары можно представить состоящими из трех основных элементов: захватный механизм, передаточный механизм и привод. Кроме того, в их состав могут входить вспомогательные элементы для выполнения дополнительных операций.

На основе данных табл. 1 составим структурно-функциональную схему ЗУ для гибких контейнеров (представлена на рисунке).

Захватный механизм является основным рабочим органом ЗУ, непосредственно взаимодействующим с объектом манипулирования [1].

Передаточный механизм ЗУ необходим для передачи воздействия от привода к захватному механизму. При синтезе ЗУ для гибких контейнеров в качестве передаточного механизма рационально использовать рычажно-шарнирный ПМ, который в раскрытом виде будет соответствовать форме горловины раскрытого ГК. При этом количество его звеньев (от четырех и более) определяется исходя из совокупности нескольких параметров, основными из которых являются сложность изготовления, количество

точек удержания объекта, соответствие формы раскрытого ПМ форме сечения загрузочного патрубка, необходимое количество приводов, опорных и дополнительных элементов для управления движением захватного устройства.



Структурно-функциональная схема ЗУ для гибких контейнеров

В табл. 2 представлены варианты схем возможных исполнений передаточных рычажно-шарнирных механизмов (РШМ) с разным числом звеньев n , шарниров m , приводов z (точки приложения усилий со стороны привода обозначены P , а направление их действия показано стрелкой) и упругих элементов k . Наибольший допустимый диаметр $D_{пат}$ загрузочного патрубка рассчитан по формуле при допущении его соответствия диаметру окружности, вписанной

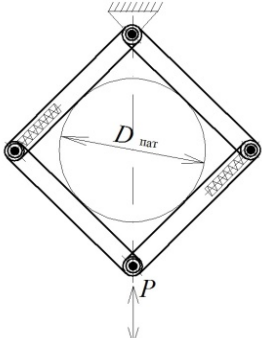
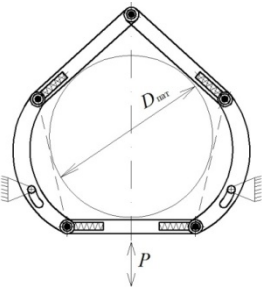
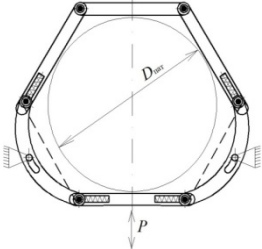
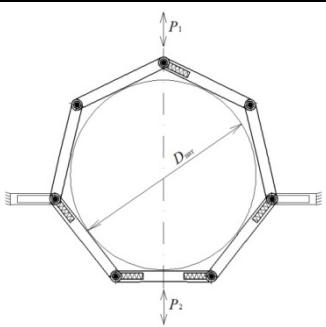
в равносторонний многоугольник исходя из ширины гибкого контейнера B :

$$D_{пат} = \frac{2B}{n \operatorname{tg}\left(\frac{360}{n}\right)}$$

Рычажно-шарнирные механизмы с числом звеньев более шести достаточно сложны с точки зрения изготовления и эксплуатации. При этом их использование не позволяет значительно увеличить производительность.

Таблица 2

Варианты схем исполнения РШМ с различным числом звеньев

Кол-во звеньев n	Вариант исполнения	Количество шарниров m	Кол-во ПЦ в приводе z	Кол-во упр. элем. k	Диаметр патрубка $D_{пат}$
4		4	1	2	$B/2$
5		7	1	4	$B/1,8$
6		8	1	4	$B/1,75$
7		7	2	5	$B/1,7$

В данном виде исполнения наиболее рациональным является использование шестишвенного рычажно-шарнирного передаточного механизма.

При проектировании захватных устройств для манипулирования расфасовочной тарой обычно используют пневматический привод как наиболее безопасный и распространенный на производстве, при этом усилия, создаваемые для удержания ГК, не столь высоки, а размеры тары, следовательно, и исполнительных элементов ЗУ, достаточно большие.

В зависимости от назначения ЗУ могут оснащаться дополнительными приспособлениями [1] для выполнения ориентирующих перемещений, а также приспособлениями для выполнения некоторых технологических операций (например, устройством для прошивки ГК или для крепления ГК на загрузочном патрубке). В качестве дополнительных приспособлений могут выступать сопла для очистки сжатым воздухом поверхности тары, устройства для сброса наполненного ГК с загрузочного патрубка, средства нанесения маркировки на поверхность ГК, приспособления для контроля веса пустого или наполненного ГК, пневматические ножницы для отрезки лишних элементов и т. д.

При разработке захватных устройств для гибких контейнеров следует учесть необходимость не только их захвата и удержания при наполнении, но и их раскрытия и закрытия.

Разработанные на основе структурно-функциональной схемы и теоретически обоснованные конструкции захватных устройств [2–6], построенные на основе рычажно-шарнирного передаточного механизма с пневматическим

приводом перемещения захватных элементов в виде пальцев, могут быть использованы на существующих автоматизированных линиях расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры, либо при проектировании новых автоматических линий. Это позволит добиться повышения производительности за счет комплексной автоматизации работы расфасовочного оборудования и освободит оператора от тяжелой, травмоопасной и утомительной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козырев, Ю. Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов: учеб. пособие / Ю. Г. Козырев. – М.: КНОРУС, 2011. – 312 с.
2. Пат. 88339 РФ, МПК В 65 В 67/12. Устройство для захвата, раскрытия и удержания мешков / Л. А. Рабинович, Г. П. Барабанов, А. М. Макаров; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет; заявл. 30.03.2009; опубл. 10.11.2009.
3. Пат. 2469928 РФ, МПК В 65 В 7/02, В 65 В 5/00. Устройство для автоматического раскрытия, удержания и закрытия мешков / А. М. Макаров, Л. А. Рабинович, Ю. П. Сердобинцев; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет; заявл. 31.05.2011; опубл. 20.12.2012.
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; URL: www.science-education.ru/100-5113 (дата обращения: 27.12.2014).
5. Макаров, А. М. Синтез рычажно-шарнирных захватных устройств для манипулирования мягкой расфасовочной тарой / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев // Изв. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 117–119.
6. 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.

УДК 658.52.011.56:519.17

Ю. П. Сердобинцев, А. К. Иванюк

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРУППОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: ivanyuk_aleksei@mail.ru

Автоматизация производства корпусных деталей, изготовленных из легких алюминиево-магниевого сплава, становится актуальной в современном производстве в связи с применением обрабатывающих центров с ЧПУ. Наиболее удобным является использование теории графов при построении группового технологического процесса для широкого номенклатурного ряда деталей корпусного вида. При использовании данной методики может быть достигнуто снижение производственных затрат, уменьшение времени простоя технологического оборудования, в частности, станков с ЧПУ, повышение гибкости всей системы производства.

Ключевые слова: автоматизация производства, корпусные детали, теория графов, гибкие производственные модули (ГПМ), технологические операции.

Automation of production of the case details made of light aluminum-magnesium alloys becomes actual in modern production in the connection with application of the processing centers with numerical program control. The most convenient is use of the theory of counts, at creation of group technological process for a wide nomenclature number of details of a case type. When using this technique decrease in production expenses, reduction of an idle time of processing equipment, in particular can be reached machines with numerical program control, increase of flexibility of all system of production.

Keywords: production automation, case details, theory of counts, flexible production modules (FPM), technological operations.

Групповая технология построения ГПС на базе отдельных модулей ГПИМ, объединенных транспортной системой и выполняющие определенные технологические операции, применяется, когда необходимо обработать большую номенклатуру деталей, имеющих технологическое и геометрическое сходство, т. е. большое число совпадающих операций для изготовления всех деталей [1].

Актуальной является разработка группового технологического процесса для корпусных деталей. В качестве примера рассмотрено семь изделий и приведены технологические маршруты обработки на станках:

1. Ф1-Ф2-Ф3-С1-С2-Р1-Р2; 2. Ф1-Ф2-Ф3-С2-С1-Р2-Р1; 3. Ф1-С2-С1-Ш; 4. Ф1-С2-С1-Ш; 5. Ф1-Ф2-С2-С1; 6. Ф1-Ф2-С1-С2-Р2; 7. Ф1-Ф2-С2-С1-Р1, где приняты обозначения операций соответственно: Ф – фрезерование, С – сверление, Р – резбонарезание, Ш – шлифование.

Для уменьшения времени простоев технологического оборудования необходимо использовать групповую технологию, основанную на объединении деталей, имеющих общие технологические операции.

Вначале составляется группа из всех повторяющихся технологических операций для всех деталей: Ф1-Ф2-Ф3-С1-С2-Р1-Р2-Ш.

Затем подсчитывается количество данных операций, которое будет использоваться для построения матриц, сводящих изделия к групповому объединению [2]. В данном случае количество несовпадающих (разнотипных) операций для заданного множества деталей равно восьми ($K_0=8$). На основе полученных данных строится матрица «Деталь – операция», где в заглавие матрицы по горизонтали – все технологические операции, а по вертикали – условный номер обрабатываемой детали. На пересечении строки и столбца ставится единица при наличии данной операции у соответствующей детали, а при ее отсутствии – ноль.

Таблица 1

Матрица «Деталь – операция»

Деталь	Ф1	Ф2	Ф3	С1	С2	Р1	Р2	Ш
1	1	1	1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	0	0	1	1	0	0	1
4	1	0	0	1	1	0	0	1
5	1	1	0	1	1	0	0	0
6	1	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	1	1	1	0	0

Результаты, отраженные в матрице, можно представить в виде табл. 1, из которой определяется количество совпадающих технологических операций между деталями, которое определяется по формуле $K_{ij} = K_0 - P$, где P – количество несовпадающих операций для каждой пары деталей [3].

На основе полученных данных строится квадратичная матрица (табл. 2). Для каждой детали проходит проверка на наличие одинаковых операций с другими деталями и подсчитывается общее число совпадений. Это число заносится в данную матрицу (к примеру, у 1-й и 3-й детали три совпадающих технологических процесса).

Исходя из табл. 2 детали объединяются в группы по критерию максимального совпадения операций: 1-я группа – (3, 4); 2-я – (5, 6); 3-я – (1, 2); 4-я – (7).

Затем выписываются технологические операции для деталей, входящих в данные группы: (3, 4) – Ф1, С1, С2, Ш; (5, 6) – Ф1, Ф2, С1, С2, Р2; (1, 2) – Ф1, Ф2, Ф3, С1, С2, Р1, Р2; (7) – Ф1, Ф2, С1, С2, Р1.

В результате исходя из полученных групп определяется количество производственных модулей, входящих в производственную систему.

Для определения данного количества воспользуемся методом структурных графов, в которых вершинами являются групповые технологические операции, а связи между ними определяют очередность выполнения этих операций.

Таблица 2

Матрица соответствия операций

Деталь	1	2	3	4	5	6	7
1	–						
2	8	–					
3	3	3	–				
4	3	3	8	–			
5	5	5	6	6	–		
6	6	6	5	5	7	–	
7	6	6	5	5	7	6	–

При построении графов проводится анализ на наличие сильно связанных элементов, при нахождении которых необходимо граф подвергнуть перестройке путем выделения типичных модулей [4].

7 Построим графы для каждой группы и переструктурируем их при необходимости.

Граф 1-й группы: (3, 4) – Ф1, С1, С2, Ш, где технологические операции для детали 3 – Ф1-С2-С1-Ш; для детали 4 – Ф1-С2-С1-Ш.

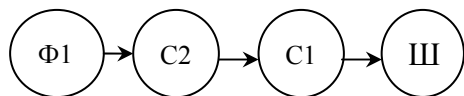


Рис. 1. Упорядоченный граф 1-й группы

В данной группе тесные связи отсутствуют. Из упорядоченного графа для группы № 1 (рис. 1), выпишем получившиеся модули: $M_1 = (\Phi 1)$; $M_2 = (C2)$; $M_3 = (C1)$; $M_4 = (\text{Ш})$.

Графы для следующих групп строятся аналогично построению графов для первой группы.

Граф 2-й группы: (5, 6) – Ф1, Ф2, С1, С2, Р2, где технологические операции для детали 5 – Ф1-Ф2-С2-С1; для детали 6 – Ф1-Ф2-С1-С2-Р2.

В исходном графе данной группы (рис. 2) можно выделить сильно связанные элементы и объединить их в один модуль.

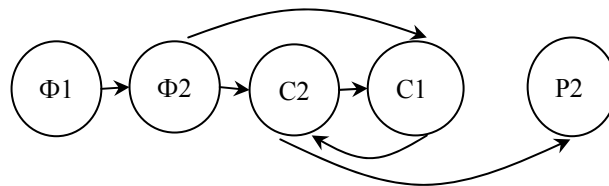


Рис. 2. Исходный граф группы № 2

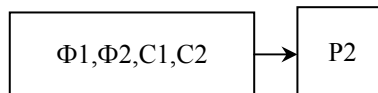


Рис. 3. Упорядоченный граф 2-й группы

Из упорядоченного графа для группы № 2 (рис. 3) выпишем получившиеся модули: $M_1 = (P2)$; $M_2 = (\Phi 1-\Phi 2-C1-C2)$.

Граф 3-й группы: (1, 2) – Ф1, Ф2, Ф3, С1, С2, Р1, Р2, где технологические операции для детали 1 – Ф1-Ф2-Ф3-С1-С2-Р1-Р2; для детали 2 – Ф1-Ф2-Ф3-С2-С1-Р2-Р1.

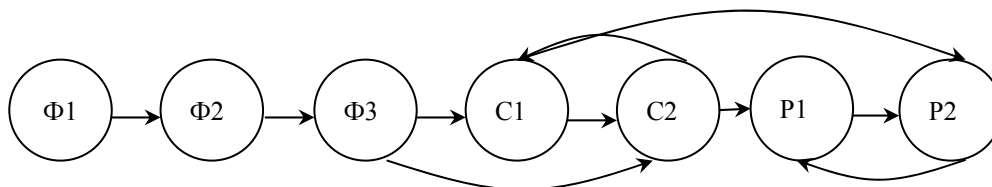


Рис. 4. Исходный граф группы № 3

В исходном графе данной группы (рис. 4) можно выделить сильно связанные элементы и объединить их в один модуль.

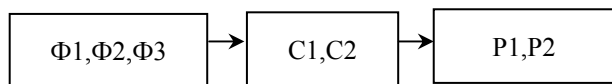


Рис. 5. Упорядоченный граф группы № 3

Из упорядоченного графа для группы № 1 (рис. 5) выпишем получившиеся модули: $M_1 = (\Phi 1-\Phi 2-\Phi 3)$; $M_2 = (C1-C2)$; $M_3 = (P1-P2)$.

Граф 4-й группы: (7) – Ф1, Ф2, С2, С1, Р.

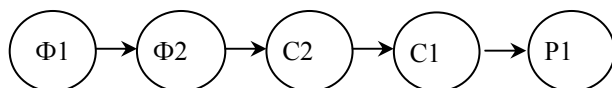


Рис. 6. Упорядоченный граф группы № 4

Из упорядоченного графа для группы № 3 (рис. 6) выпишем получившиеся модули: $M_1 = (\Phi 1)$; $M_2 = (\Phi 2)$; $M_3 = (C2)$; $M_4 = (C1)$; $M_5 = (P1)$.

Выпишем все получившиеся модули из графов для каждой из групп:

$M_1 = (\Phi 1)$; $M_2 = (C2)$; $M_3 = (C1)$; $M_4 = (\text{Ш})$;
 $M_5 = (P2)$; $M_6 = (\Phi 1)$; $M_7 = (\Phi 2)$; $M_8 = (C2)$;
 $M_9 = (C1)$; $M_{10} = (P1)$; $M_{11} = (P1-P2)$;
 $M_{12} = (C1-C2)$; $M_{13} = (\Phi 1-\Phi 2-\Phi 3)$;
 $M_{14} = (\Phi 1-\Phi 2-C1-C2)$.

Проанализировав данные модули можно заметить дублирующие технологические операции, которые можно исключить или совместить с другими модулями [5].

В результате оптимизации получим:

$M_1 = (\text{Ш})$; $M_2 = (P1-P2)$; $M_3 = (C1-C2)$;
 $M_4 = (\Phi 1-\Phi 2-\Phi 3)$.

Исходя из полученных модулей можно построить общий граф для групп исследуемых деталей (рис. 7):

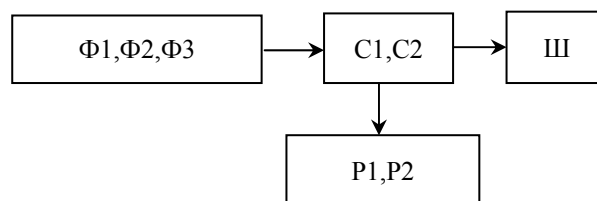


Рис. 7. Общий граф технологической обработки деталей

Для полученных модулей (рис. 7) строим технологическую схему ГПС с таким условием, чтоб количество обратных связей между модулями было наименьшим, либо, по возможности,

чтоб обратные связи между модулями отсутствовали [6].

Таким образом, схема ГПС для данных модулей примет вид:



Рис. 8. Технологическая схема ГПС

Таким образом, использование теории графов для построения группового технологического процесса обработки корпусных деталей позволяет разработать рациональную схему обработки (рис. 8). Использование данной схемы позволяет избавиться от дублирующих операций и ненужных сложных структур. По результатам анализа операции объединяются в модули, и расписывается маршрут обработки для каждой партии деталей. За счет объединения в модули получаем экономию электроэнергии и уменьшение времени использования станков, так как станки находятся в максимально загруженном состоянии (т. е. простои сводятся к минимуму) [7]. Также модульность технологической системы ГПС позволяет не только производить параллельную обработку ряда изделий, но и при необходимости перенастроить линию на выпуск изделий другого типоразмера и другой конфигурации. При объединении данной методики с правильным выбором САМ-системы разработка АСТПП становится более рациональной [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, Г. Н. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства / Г. Н. Андреев, В. Н. Новиков, А. Г. Схиртладзе. – М. : Высшая школа, 2002. – 415 с.
2. Капустин, Н. М. Автоматизация машиностроения / Н. М. Капустин, Н. П. Дьяконова, П. М. Кузнецов ; под ред. Н. М. Капустина. – М. : Высшая школа, 2007. – 224 с.
3. Сердобинцев, Ю. П. Повышение качества функционирования технологического оборудования : монография / Ю. П. Сердобинцев, О. В. Бурлаченко, А. Г. Схиртладзе ; ВолгГТУ. – Старый Оскол : ТНТ, 2013. – 410 с.
4. Капустин, Н. М. Формирование виртуальной производственной системы для выпуска изделий в распределенных системах / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов // Машиностроитель. – 2002. – № 6. – С. 42–46.
5. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения : учеб. для машиностроительных специальностей вузов / И. М. Колесов. – М. : Высшая школа, 1999. – 591 с.
6. Мухин, А. В. Новые концепции организации промышленного производства / А. В. Мухин // Наука производству. – 2001. – № 5. – С. 2–7.
7. Вороненко, В. П. Автоматизированное производство / В. П. Вороненко, А. Г. Схиртладзе, В. П. Брюханов. – М. : Высшая школа, 2001. – 304 с.
8. Иванюк, А. К. К вопросу об интеграции САМ-систем в АСТПП корпусных деталей прибора связи / А. К. Иванюк, В. Г. Барабанов // Евразийский союз ученых. – 2014. – № 8 (часть 8). – С. 53–56.

УДК 621.311

Т. Б. Сурова, В. В. Филиппов, Н. В. Махиянова

КОНТРОЛЬ НАД СОСТОЯНИЕМ ГОЛОВНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ЛИНИИ, ПИТАЮЩЕЙ ТРАНСФОРМАТОРНУЮ ПОДСТАНЦИЮ ПРИ ИСЧЕЗНОВЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Орловский государственный аграрный университет

E-mail: vadim233065@yandex.ru

Описан способ контроля над состоянием головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию при исчезновении напряжения в ней, разработана структурная схема и описана ее работа с изображением выходных сигналов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, вводной выключатель шин подстанции, датчик напряжения, головной выключатель.

Describes a method for controlling the state of the brain switch line supplying the transformer substation voltage failure in it, developed a block diagram and described her work with the image of the output signals.

Keywords: power transformer, main switch tires substation voltage sensor head switch.

Исчезновение напряжения в линии, питающей трансформаторную подстанцию, возможно по следующим обстоятельствам: плановое отключение; аварийное отключение; ложное отключение головного выключателя (ГВ); отказ отключения секционирующего выключателя (если он установлен в этой линии) и отключение головного выключателя ГВ; а также вероятны и другие причины.

Если плановое отключение линии однозначно определяет отключенное состояние ГВ, то при иных ситуациях информация о состоянии ГВ остается неизвестной. Для однозначного определения включенного или отключенного состояния ГВ разработан способ контроля состояния головного выключателя линии, а также предложена структурная схема контроля над состоянием ГВ при исчезновении напряжения в линии [1].

Контроль осуществляется следующим образом. С момента исчезновения напряжения на трансформаторе начинают отсчет времени выдержки автоматического повторного включения АПВ ГВ линии, при этом в момент окончания этого отсчета контролируют появление

напряжения на трансформаторе. Если оно не появилось, то в линию посылают зондирующий импульс, измеряют время его прохождения до точки отражения, вычисляют расстояние до этой точки и сравнивают его с расстоянием до места установки ГВ. Если вычисленное расстояние больше, чем расстояние до места установки ГВ, то делается вывод о включенном состоянии ГВ линии. Если же вычисленное расстояние равно расстоянию до места установки ГВ, то делается вывод о его отключенном состоянии [2].

Структурная схема контроля (рис. 1) состоит из датчика напряжения ДН 9, элементов: НЕ 10 и 12, ПАМЯТЬ 11, ЗАДЕРЖКА 13, ОДНОВИБРАТОР 14, И 15, блока обработки информации БОИ 16, генератора зондирующих импульсов ГЗИ 17, приемника зондирующих импульсов ПЗИ 18 и регистрирующего устройства РУ 19.

На рис. 1 приняты обозначения: 1 и 3 – головной и вводной выключатели; 2 – силовой трансформатор; 4–8 – линии, отходящие от шин подстанции.

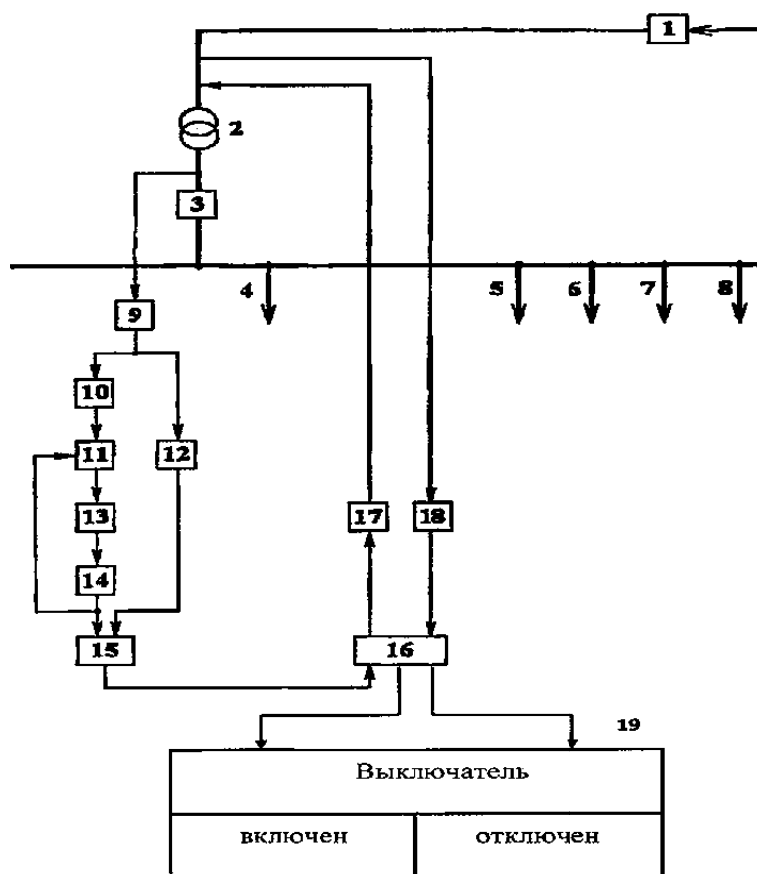


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема трансформаторной подстанции и структурная схема контроля

Работа этой схемы осуществляется следующим образом. В нормальном режиме работы сети на выходе ДН 9 есть сигнал (рис. 2, диагр. 1) при этом на выходе элемента НЕ 10 сигнала нет (рис. 2, диагр. 2) также нет сигнала на выходе элемента НЕ 12 (рис. 2, диагр. 4), по-

этому схема находится в режиме контроля.

На рис. 2 моменты времени: t_0 – начальный момент времени; t_1 – момент времени исчезновения напряжения на трансформаторе; t_2 – момент окончания времени выдержки АПВ ГВ-1.

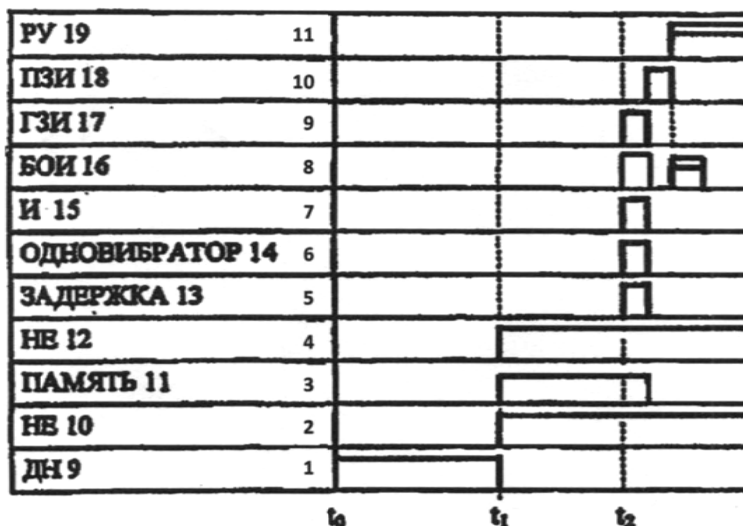


Рис. 2. Диаграммы выходных сигналов элементов структурной схемы

При исчезновении напряжения на трансформаторе 2 по какой-либо причине с выхода ДН 9 сигнал исчезнет (рис. 2, диагр. 1, момент времени t_1) и появятся выходные сигналы с элементов НЕ 10 и 12 (рис. 2, диагр. 2 и 4 соответственно). Сигнал с элемента НЕ 10 поступит на вход элемента ПАМЯТЬ 11, запомнится им (рис. 2, диагр. 3) и поступит на вход элемента ЗАДЕРЖКА 13. С выхода этого элемента сигнал появится через время выдержки АПВ ГВ 1 (рис. 2, диагр. 5) и поступит на вход элемента ОДНОВИБРАТОР 14. Этот элемент произведет одно колебание (рис. 2, диагр. 6), этот сигнал «сбросит» память с элемента ПАМЯТЬ 11 (рис. 2, диагр. 3, момент времени t_2), и он также поступит на первый вход элемента И 15. При этом на втором входе уже будет сигнал с элемента НЕ 12 (рис. 2, диагр. 4), поэтому он сработает и появится его выходной сигнал (рис. 2, диагр. 7). Сигнал этого элемента поступит на вход БОИ 16. При этом с его выхода в ГЗИ 17 пойдет сигнал (рис. 2, диагр. 8), который обеспечит посылку этим генератором зондирующего импульса в линию (рис. 2, диагр. 9). Этот импульс, дойдя до точки отражения, вернется обратно, поступит в ПЗИ 18 и с его выхода (рис. 2, диагр. 10) поступит в БОИ 16. Этот элемент определит время прохождения задерживающего импульса до точки отражения, вы-

числит расстояние до этой точки и сравнит его с расстоянием до места установки ГВ 1. И, если вычисленное расстояние будет больше, чем расстояние до места установки ГВ 1, то с первого выхода БОИ 16 (рис. 2, диагр. 8) в РУ 19 поступит сигнал, который обеспечит появление в нем информации о том, что ГВ 1 включен (рис. 2, диагр. 11). А если вычисленное расстояние равно расстоянию до места установки ГВ 1, то со второго выхода БОИ 16 (рис. 2, диагр. 8) в РУ 19 поступит сигнал, который обеспечит появление в нем информации о том, что ГВ 1 отключен (рис. 2, диагр. 11).

Таким образом, при использовании предложенной структурной схемы можно контролировать состояние головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию, при исчезновении в ней напряжения. Это позволит при возникновении аварийных и ненормальных режимов сократить время на устранение возникших неисправностей, что будет способствовать повышению надежности электроснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент № 2505906. Способ контроля включенного состояния головного выключателя линии, питающей трансформаторную подстанцию при исчезновении напряжения в ней / Суоров Л. Д., Суорова Т. Б., 2014.
2. Бородин, И. Ф. Автоматизация производственных процессов / И. Ф. Бородин. – М.: Колос, 1998 – 280 с.

УДК 621.311

В. В. Филиппов

КОНТРОЛЬ ВКЛЮЧЕНИЯ СЕТЕВОГО РЕЗЕРВА ДЕЛИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКОЙ

Орловский государственный аграрный университет

E-mail: vadim233065@yandex.ru

Описан способ контроля включения сетевого резерва делительной автоматикой, разработана структурная схема и описана ее работа с изображением выходных сигналов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, автоматическое включение резерва, датчик убывания рабочего тока, датчик возрастания рабочего тока, реле минимального напряжения, регистрирующее устройство.

Describes a method for controlling switching network provision indexing automation, developed a block diagram and described her work with the image of the output signals.

Keywords: power transformer, automatic source, decreasing the operating current sensor, the sensor increase in operating current, undervoltage, the recording device.

Сельские распределительные сети обладают большой протяженностью и разветвленностью. Это в отдельных случаях позволяет получить условно-замкнутую кольцевую сеть (рис. 1). Секционирование линий, образующих такую сеть, обеспечивает возможность резервирования

отдельных участков линий. Подключение резервируемых участков осуществляется с помощью сетевых пунктов автоматического включения резерва (АВР). Признаком для включения выключателя сетевого резерва является исчезновение напряжения с одной из сторон [1].

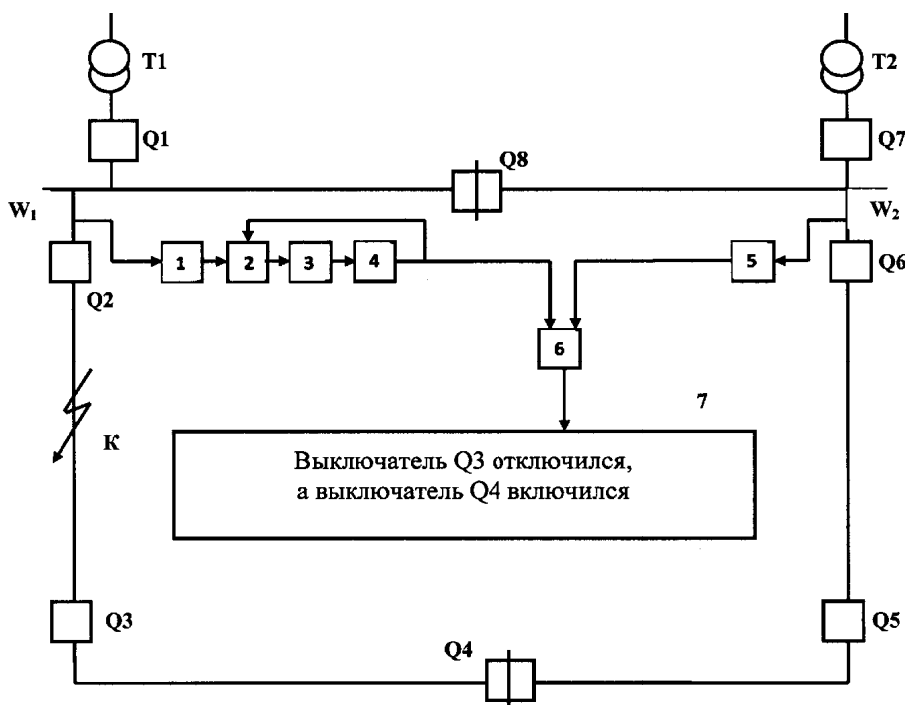


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема двухтрансформаторной подстанции и структурная схема контроля

Схема (рис. 1) содержит: T_1 , T_2 – трансформаторы силовые; Q_1 , Q_7 – выключатели вводные; Q_2 , Q_6 – выключатели головные; Q_3 , Q_5 – выключатели секционирующие; Q_4 , Q_8 – выключатели сетевого и шинного пунктов АВР соответственно.

Исчезновение напряжения в секционированной линии W_1 (или W_2) может произойти по при-

чине возникновения устойчивого короткого замыкания (КЗ) на головном участке линии, например, в точке К, или по причине срабатывания делительной автоматики, установленной на выключателе Q_3 (рис. 1). Для получения информации о включении сетевого резерва делительной автоматикой разработан способ контроля включения сетевого резерва делительной автоматикой [2].

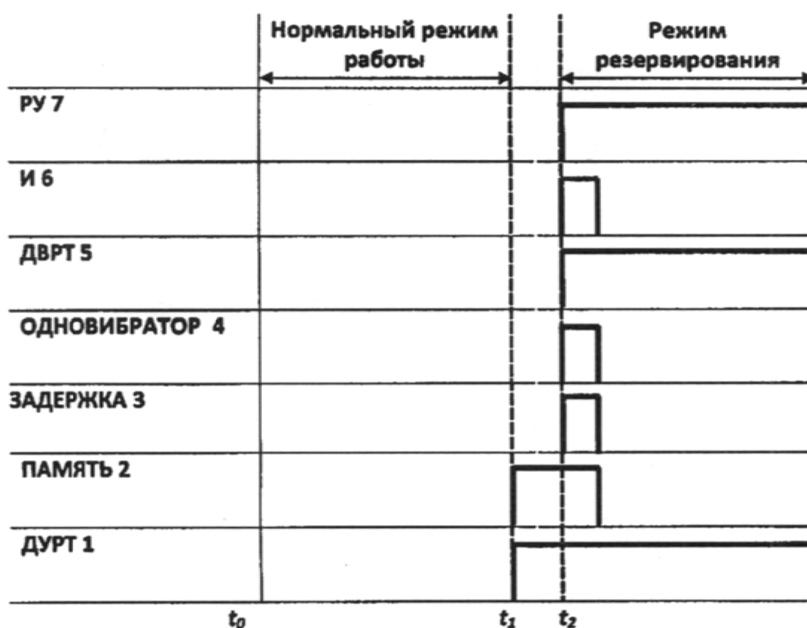


Рис. 2. Диаграммы выходных сигналов структурной схемы

На рис. 2 моменты времени: t_0 – начальный момент времени; t_1 – момент времени срабатывания делительной автоматики; t_2 – момент времени включения сетевого резерва.

Согласно этому способу контролируют уменьшение рабочего тока в линии основного источника питания на значение, определяемое нагрузкой участка линии, смежного с сетевым пунктом АВР. При этом через время выдержки срабатывания защиты сетевого пункта АВР ожидают увеличение рабочего тока в линии резервного источника питания на такое же значение, что и его уменьшение в линии основного источника питания. И, если это произойдет, то делают вывод о включении сетевого резерва после срабатывания делительной автоматики секционирующего пункта линии кольцевой сети [3].

Для реализации такого контроля разработана структурная схема (рис. 1), которая состоит из логических элементов: датчик убывания рабочего тока ДУРТ 1; ПАМЯТЬ 2; ЗАДЕРЖКА 3; ОДНОВИБРАТОР 4; датчик возрастания рабочего тока ДВРТ 5; логический элемент И 6; регистрирующее устройство РУ 7.

Схема работает следующим образом. В нормальном режиме работы сети выключатели $Q1$, $Q2$, $Q3$, $Q5$, $Q6$ и $Q7$ включены, а выключатели $Q4$ и $Q8$ отключены, на выходе ДУРТ 1 сигнала нет, поэтому схема находится в режиме контроля.

При уменьшении напряжения на устройстве делительной автоматики секционирующего пункта с выключателем $Q3$ до значения срабатывания реле минимального напряжения оно

срабатывает и секционирующий выключатель $Q3$ отключится. Это приведет к уменьшению рабочего тока в линии основного источника питания, при этом ДУРТ 1 сработает, появится его выходной сигнал (рис. 2, диагр. 1, момент времени t_1). Отключение выключателя $Q3$ приведет к исчезновению напряжения на сетевом пункте АВР и его выключатель $Q4$ через время выдержки АВР включится. При этом отключенный участок линии основного источника питания, расположенный смежно с пунктом АВР, подключится к линии резервного источника питания. Это приведет к увеличению рабочего тока в линии резервного источника питания, поэтому сработает ДВРТ 5, на его выходе появится сигнал (рис. 2, диагр. 5, момент времени t_2), который поступит на второй вход элемента И 6. Сигнал ДУРТ 1 в момент времени t_1 поступит на вход элемента ПАМЯТЬ 2, запомнится им (рис. 2, диагр. 2) и поступит на вход элемента ЗАДЕРЖКА 3, и через время выдержки АВР выключателя $Q4$ (рис. 2, диагр. 3) поступит на вход элемента ОДНОВИБРАТОР 4. Он произведет одно колебание (рис. 2, диагр. 4), этот сигнал «сбросит» память с элемента 2 (рис. 2, диагр. 2) и поступит на первый вход элемента И 6, на втором входе которого уже существует сигнал с ДВРТ 5, поэтому он сработает (рис. 2, диагр. 6). Его выходной сигнал поступит в РУ 7, и в нем появится информация о том, что секционирующий выключатель $Q3$ отключился, а выключатель $Q4$ сетевого пункта АВР включился (рис. 2, диагр. 7).

Реализация разработанной структурной схемы разрешает получить информацию о включении сетевого резерва после срабатывания делительной автоматики секционирующего пункта линии кольцевой сети. Это позволит обслуживающему персоналу правильно оценить ситуацию и принять необходимые меры для восстановления нормальной схемы электропитания, что уменьшает экономические по-

тери от недоотпуска электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белов, Н. В. Электротехника и основы электроники / Н. В. Белов, Ю. С. Волков. – Санкт-Петербург, 2012. – 421 с.
2. Шавров, А. В. Автоматика / А. В. Шавров, А. П. Колониец. – М. : Колос, 1999. – 264 с.
3. Конюхова, Е. А. Электроснабжение объектов : учеб. пособие / Е. А. Конюхова. – М. : Издательство «Мастерство», 2002. – 320 с.

УДК 681.532.6

А. А. Чикова, Е. С. Чеснокова, И. В. Волков, А. М. Макаров
**АДАПТИВНОЕ ЛЕЧЕБНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО
 С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Для решения задачи повышения комфорта человека во время отдыха и сна за счет оптимизации положения тела и головы, массажа всего тела, для стимуляции кровообращения при профилактике и лечении пролежней, а также при послеоперационной реабилитации пациентов и для повышения комфорта людей с ограниченной подвижностью разработано адаптивное лечебно-оздоровительное устройство, содержащее пневматические исполнительные элементы и автоматическую систему управления.

Ключевые слова: лечебно-оздоровительное устройство, адаптация, массаж, автоматическая система управления.

The adaptive therapeutic device containing pneumatic executive elements and automatic control system has been developed for solving of human comfort increase problem during rest and sleep due to optimization of body and head position, all body massaging, for stimulation of blood circulation at prophylaxis and treatment of bedsores as well as at postoperative rehabilitation of patients and for increase of comfort of people with limited mobility.

Keywords: therapeutic device, adaption, massaging, automatic control system.

В настоящее время на фоне повышения уровня жизни населения повышаются требования потребителей к уровню комфорта. Сон и отдых занимают значительную часть жизни, поэтому качеству и функциональности поверхности для сна и отдыха (например, матраса) уделяется все большее внимание. Уже созданы матрасы, наполненные водой, оснащенные электроприводом, матрасы с памятью формы и т. д.

Кроме того, к кроватям и матрасам в лечебных и оздоровительных учреждениях часто предъявляются особые требования, связанные с необходимостью выполнения дополнительных функций при уходе за тяжелыми и лежачими больными, при послеоперационном восстановлении и т. д. (например, для массажа тела пациента или его поворота через определенное время).

Обзор и анализ рынка матрасов показывают, что наибольшей популярностью сегодня пользуются матрасы с независимыми пружинными блоками. Такие конструкции обладают хорошим ортопедическим эффектом. Каждая

пружина располагается в индивидуальном чехле и не имеет связи с близлежащей пружиной. В итоге каждый такой элемент работает отдельно от близлежащего, что позволяет обеспечивать поддержку тела человека.

Патентный обзор [1, 2] показал, что существуют различные матрасы и лечебно-оздоровительные устройства, имеющие достаточно широкие функциональные возможности. Тем не менее, они имеют ряд недостатков:

- отсутствие возможности контроля давления воздуха внутри матраса;
- отсутствие возможности автоматически регулировать жесткость в каждой ячейке/зоне и, соответственно, изменять форму поверхности матраса;
- отсутствие возможности обеспечить разное давление (жесткость) в разных ячейках/зонах для повышения комфортности сна человека;
- отсутствие возможности измерять и регулировать температуру поверхности матраса для оказания дополнительного теплового воздействия на массируемые зоны тела человека.

Поэтому вопрос создания автоматического устройства с возможностью адаптации формы и жесткости поверхности в зависимости от выполняемых функций является важным и актуальным.

Для решения данной задачи разработано и заявлено в качестве патента на полезную модель (заявка № 2014105075 от 11.02.2014, авторы А. М. Макаров, И. В. Волков, А. А. Чикова) адаптивное лечебно-оздоровительное устройство, которое относится к медицинскому оборудованию и может быть использовано в качестве средства, позволяющего обеспечить комфортный здоровый сон за счет оптимизации положения тела и головы, массажирующего всего тела, стимуляции кровообращения для профилактики и лечения пролежней, а также при послеоперационной реабилитации пациентов и для повышения комфорта людей с ограниченной подвижностью [3, 4].

Лечебно-оздоровительное устройство (рис. 1) состоит из исполнительного механизма 1 и системы управления 2.

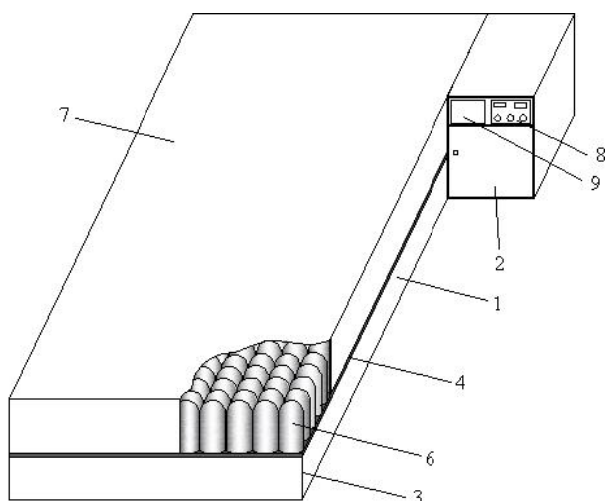


Рис. 1. Общий вид лечебно-оздоровительного устройства

Исполнительный механизм 1 содержит корпус 3, жесткую несущую панель 4 с отверстиями 5 (рис. 2), на которой установлена система периодически расположенных исполнительных элементов 6 в виде двумерной матрицы, обтянутой сверху эластичным материалом 7. Система управления имеет внешние устройства ввода-вывода: панель управления 8 и дисплей 9.

Исполнительные элементы 6 (рис. 2) представляют собой пальцеобразные полые пневматические камеры, имеющие основания 10, боковые стенки 11 и рабочие площадки 12.

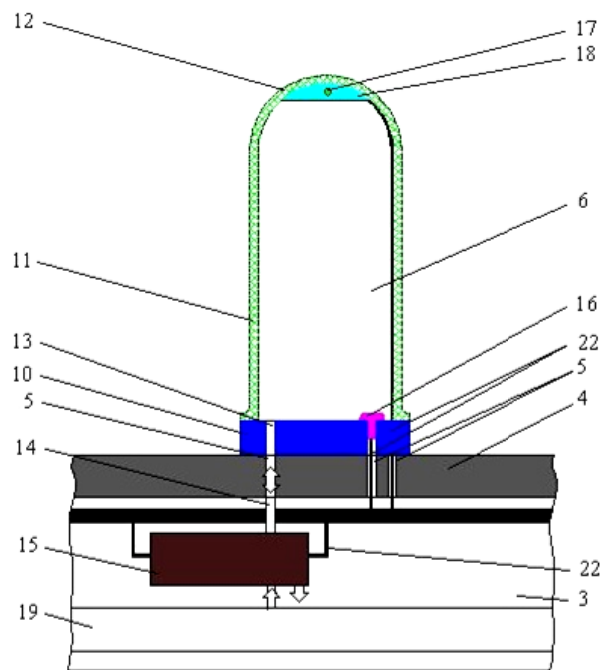


Рис. 2. Общий вид исполнительного элемента в виде пневматической камеры

В основании 10 имеется отверстие 13 с гибкой трубкой 14, связанной с электропневматическим распределителем 15, расположенным в корпусе 3 под несущей панелью 4. На основании 10 пневматической камеры установлен датчик давления 16. Под рабочей площадкой 12 пневматической камеры установлен датчик температуры 17 и нагревательный элемент 18. Исполнительные элементы 6 ориентированы вертикально по отношению к несущей панели 4. Под несущей панелью 4 в корпусе 3 размещены подводящие каналы высокого давления 19, связанные с ресивером 20 компрессора 21 (рис. 3), а также проложены электрические кабели 22, связывающие электропневматические распределители 15, датчики давления 16, датчики температуры 17 и нагревательные элементы 18 с системой управления 2. Компрессор 21 с ресивером 20 могут быть расположены внутри корпуса 3, а могут быть вынесены за пределы лечебно-оздоровительного устройства.

Система управления (рис. 3) также связана с компрессором 21 с ресивером 20 и содержит центральный микропроцессор 23, запоминающее устройство 24, панель управления 8 и дисплей 9.

Работа лечебно-оздоровительного устройства осуществляется следующим образом. С помощью дисплея 9 и панели управления 8 системы управления 2 пользователь задает требуемый режим работы лечебно-оздоровительного устройства, записанный на запоминающем

устройстве 24. Центральный микропроцессор 23, получая информацию от датчика давления, установленного в ресивере 20, управляет работой компрессора 21 для поддержания в ресивере 20 необходимого давления воздуха. В зависимости от режима работы центральный микропроцессор 23 системы управления 2 получает информацию по электрическим кабелям 22 (рис. 2) от датчиков давления 16 и датчиков температуры 17, установленных в исполнительных элементах 6, в зависимости от этого центральный микропроцессор управляет отдельно каждым нагревательным элементом 18, установленным внутри пневматической камеры, и каждым электропневматическим распределителем 15, соединяя пневматическую камеру 6 с каналом высокого давления 19 или атмосферой (низкое давление), либо поддерживает внутри пневматической камеры 6 постоянное давление.

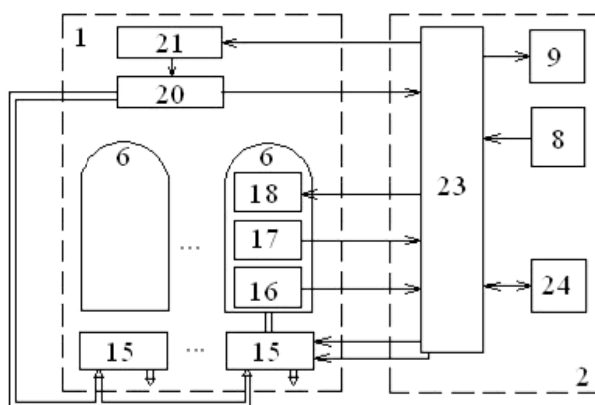


Рис. 3. Функциональная схема системы управления

Использование предлагаемого лечебно-оздоровительного устройства по сравнению с име-

ющимися позволяет не только создавать массажный эффект для тела пациента, в том числе снижать риск возникновения и развития пролежней, но и обеспечивает комфортные условия в течение всего процесса отдыха или сна человека в зависимости от его физических потребностей или предпочтений. При этом устройство позволяет создать различную жесткость и температуру своей поверхности в любой ее точке, тем самым давая возможность получить различную степень воздействия и температуру для различных частей тела человека, либо обеспечить комфортные условия сна для двух лежащих рядом человек. Данное устройство может найти широкое применение не только в медицинских учреждениях, санаториях-профилакториях, повседневной жизни человека, но и в промышленности, например, при транспортировке хрупких, дорогостоящих или взрывоопасных грузов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 83918 РФ, МПК А 61 G 7/057. Медицинская противопролежневая кровать «Волна» / Е. И. Суколин, Е. Н. Чернега ; заявл. 17.03.2009 ; опубл. 27.06.2009.
2. Патент 2236211 РФ, МПК А 61 Н 9/00. Лечебно-оздоровительное устройство / И. Н. Роганин, В. А. Елкин ; заявл. 07.10.2002 ; опубл. 20.09.2004.
3. Чикова, А. А. Адаптивный ортопедический матрас / А. А. Чикова, И. В. Волков, А. М. Макаров // Science in the modern information society II. Vol. 2 : Proceedings of the Conference (Moscow, 7–8 November 2013). Vol. 1 / spc Academic. – North Charleston (USA), 2013. – P. 132–135.
4. Электропневматическое устройство с микропроцессорной системой автоматического управления / Е. С. Чеснокова, А. А. Чикова, И. В. Волков, А. М. Макаров // Актуальные вопросы образования и науки : сб. науч. тр. по матер. междунар. науч.-практ. конф., 30 сент. 2014 г. В 11 ч. Ч. 2 / Консалтинговая компания Юком. – Тамбов, 2014. – С. 151–152.

УДК 621.9.06

А. А. Швеи, А. Р. Авдеев, А. В. Дроботов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБЪЕМНОЙ ПЕЧАТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В настоящее время известно много моделей 3D-принтеров, различающихся по технологиям печати, используемым материалам, производительности, точности, размерам рабочего пространства, сфере применения. В статье приведен сравнительный анализ устройств по выделенным направлениям, предложена их классификация и методика оценки технического совершенства на основе возможностей актуальных моделей 3D принтеров, представлена оценка экономической полезности наиболее популярных моделей.

Ключевые слова: 3D-принтер, станок для объемной печати, объемное прототипирование, аддитивные технологии, 3D-технология печати.

Many different models of 3D-Printers are presented now, they use different printing technologies, materials, have different productivity, accuracy, working space sizes, intended to different fields of application. This article provides 3D-Printers comparative analysis on selected aspects, their classification and technical sophistication rating method based on actual 3D-Printers abilities. Economic profit rating of most popular models also provided in the article.

Keywords: 3D-printer, rapid prototyping, additive manufacturing, 3D-printing technology.

В настоящее время интенсивно развиваются технологии объемной печати, которые позволяют создавать макет детали в короткие сроки для последующего анализа проектируемой конструкции. С их помощью можно сократить трудовые и временные затраты на технологическое проектирование в 2...4 раза. Кроме того, технологии объемной печати начинают применять для изготовления конечной продукции. Сейчас ее доля составляет более 20 % от изделий, производимых на 3D-принтерах. По оценке Т. Волерса из Wohlers Associates, специализирующейся в этой области, прогнозируется рост этого показателя до 50 % к 2020 году [1, 3].

В качестве критериев сравнения 3D-уст-

ройств для печати целесообразно использовать следующие показатели: сфера применения; технология печати; рабочий материал (вещество, из которого изготавливаются изделия); размеры рабочего пространства, V ; скорость печати, S ; точность позиционирования, A ; толщина слоя, T ; стоимость устройства, C .

Принтеры необходимо различать по используемой технологии печати – по принципу формирования слоев (рис. 1). В качестве таких способов могут выступать экструдирование, полимеризация вещества, лучевое спекание и нанесение связывающего вещества. Они отличаются по качеству изготовления, производительности, себестоимости продукции [2].

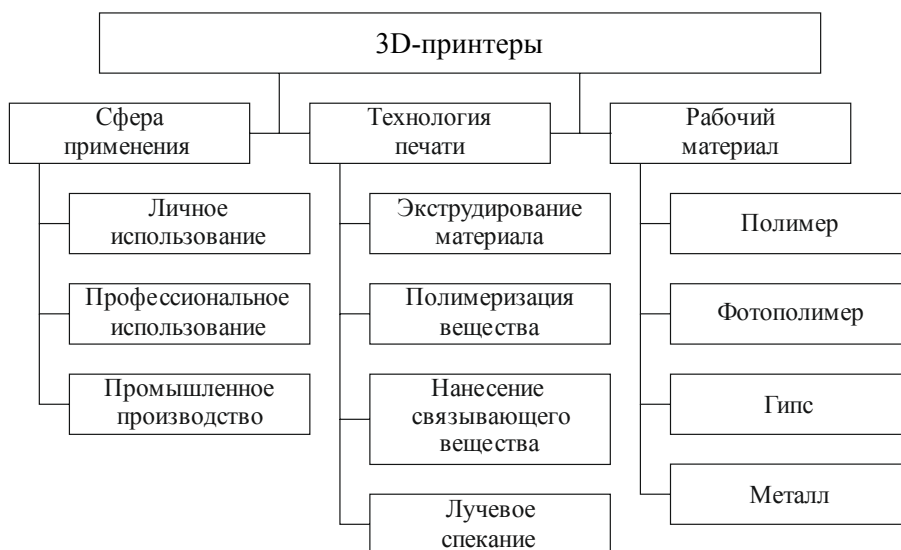


Рис. 1. Классификация устройств объемной печати

Принтеры также различают по используемому рабочему материалу: полимер, фотополимер, гипс или металл. По сфере применения 3D-принтеры разделяют на устройства для личного, профессионального и промышленного использования.

Проведенный обзор этих устройств [4, 5, 6] позволил представить их сравнительный анализ по выделенным выше показателям в табл. 1.

Для проведения объективного сравнения их технологических показателей, предлагается ввести критерий M технологичности 3D-принтера, представляющий собой среднее значение величин оценок: объема V рабочего пространства принтера, $см^3$; скорости S печати, $см^3 / ч$; точности A позиционирования, мм; и толщины T слоя, мм:

$$M = \frac{V + S + A + T}{4}.$$

Для наглядного сопоставления сравниваемых величин рационально представить их в логарифмической форме. Так, для сопоставления величин максимального рабочего пространства V принтера предложено следующее выражение:

$$V = \log(L \cdot W \cdot H),$$

где L – максимальная длина изделия, мм; W – максимальная ширина изделия, мм; H – максимальная высота изделия, мм.

Для определения показателя оценки скорости S печати примем следующую зависимость:

$$S = \log(S_x),$$

где S_x – величина скорости печати, $см^3 / ч$.

Для определения показателя оценки точности A позиционирования целесообразно принять следующую формулу:

$$A = \log\left(1 + \frac{1}{A_x}\right),$$

где A_x – точность позиционирования, мм.

Таким же образом поступаем и с показателем оценки толщины T слоя:

$$T = \log\left(1 + \frac{1}{T_x}\right),$$

$$M = \frac{1}{4} \left(\log(LWH) + \log(S_x) + \log\left(1 + \frac{1}{A_x}\right) + \log\left(1 + \frac{1}{T_x}\right) \right).$$

где T_x – толщины печатаемого слоя, мм.

Тогда выражение для критерия M технологичности примет вид:

Таблица 1

Показатели 3D-принтеров

Название 3D-принтера	Сфера	Технология	Материал	V , мм (см ³)	S_x , см ³ /ч	A , мм	T , мм	C , тыс. руб
RepRap Mendel	Личное использование	Экструдирование	Полимер	200x200x140 (1110)	15	0,1	0,3	17,5
UP! Mini				120x120x120 (1728)	2,52	0,4	0,2	31,5
LulzBot TAZ 3.0				250x275x298 (20500)	27	0,1	0,075	77
3D Systems Cube X				240x265x275 (17490)	2,7	0,2	0,1	87,5
MakerBot Replicator 2X				150x160x250 (6000)	14,4	0,011	0,1	98
FSL3D Pegasus Touch	Профессиональное использование	Полимеризация вещества	Фотополимер	177x177x228 (7140)	22	0,08	0,025	122,5
OWL Nano				150x150x200 (4500)	25*	0,0001	0,01	171,5
Leapfrog Creatr Xeed		Экструдирование	Полимер	350x270x220 (20790)	11	0,012	0,05	315
StratasysObjet30 Pro	294x192 x148,6 (8390)			11	0,1	0,028	875	
3D Systems ProJet 660Pro	Промышленное производство	Нанесение связывающего вещества	Гипс	254x381x203 (19645)	28	0,1	0,089	2975
BeAm VI LF4000		Лучевое спекание	Металл	950x900x500 (427500)	4	0,1	0,1	19250
3D Systems PROX 500			Полимер	381x330x457 (57460)	20	0,1	0,08	20300
Arcam A2XX			Металл	200x200x380 (15200)	80	0,013	0,05	38500
3D Systems PROX 300				250x250x300 (18750)	50	0,1	0,01	39900
EOS M 400	400x400x400 (64000)	20		0,09	0,016	52500		

* – значение определено по косвенным данным.

Значения оценок показателей качества представлены в табл. 2, а сравнение устройств по критерию M технологичности дополнительно приведено в виде диаграммы на рис. 2. По ним видно, что наивысшую оценку получили модели 3D-принтеров, использующие технологии полимеризации и лучевого спекания веще-

ства. Они предпочтительнее по техническим характеристикам, существенно опережая технологии экструдирования и нанесения связывающего вещества. Также, верхние позиции занимают модели, относящиеся к профессиональным и промышленным. Это объясняется тем, что данные модели обладают намного бо-

лее превосходящими точностными характеристиками, чем 3D-принтеры для личного использования, и даже обладая более высокой

стоимостью, профессиональные и промышленные модели имеют лучшее соотношение цена-точность.

Таблица 2

Значения оценок показателей качества 3D принтеров

Название 3D-принтера	<i>V</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>T</i>	<i>C</i>	<i>M</i>
RepRap Mendel	3,05	1,18	1,04	0,64	0,37	1,47
UP! Mini	3,24	0,40	0,54	0,78	0,34	1,24
LulzBot TAZ 3.0	4,31	1,43	1,04	1,16	0,30	1,99
3D Systems Cube X	4,24	0,43	0,78	1,04	0,29	1,62
MakerBot Replicator 2X	3,78	1,16	1,96	1,04	0,29	1,99
FSL3D Pegasus Touch	3,85	1,34	1,13	1,61	0,28	1,98
OWL Nano	3,65	1,40	4,00	2,00	0,27	2,76
Leapfrog Creatr Xeed	4,32	1,04	1,93	1,32	0,25	2,15
StratasysObjet30 Pro	3,92	1,04	1,04	1,56	0,23	1,89
3D Systems ProJet 660Pro	4,29	1,45	1,04	1,09	0,20	1,97
BeAm VI LF4000	5,63	0,60	1,04	1,04	0,17	2,08
3D Systems PROX 500	4,76	1,30	1,04	1,13	0,17	2,06
Arcam A2XX	4,18	1,90	1,89	1,32	0,17	2,32
3D Systems PROX 300	4,27	1,70	1,04	2,00	0,17	2,25
EOS M 400	4,81	1,30	1,08	1,80	0,16	2,25

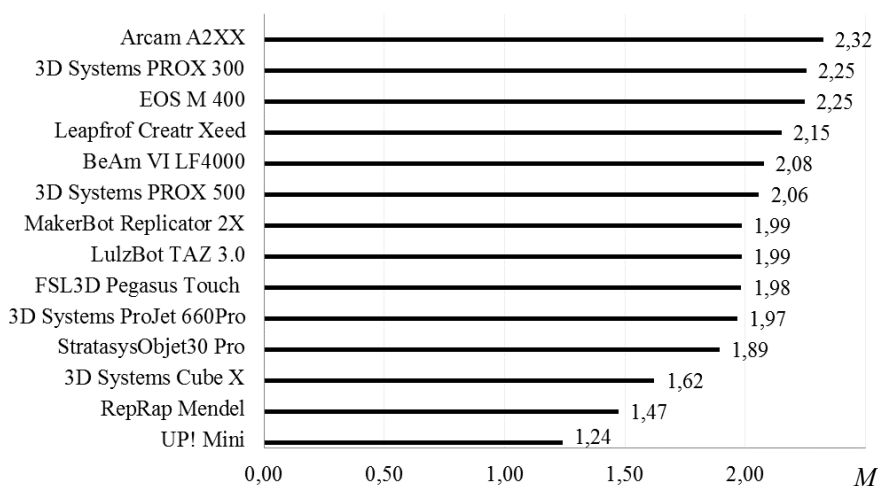


Рис. 2. Диаграмма сравнения устройств по критерию M технологичности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wohlers T. Wohlers Report 2010. – Wohlers Associates. – 2010. – 250 с.
2. Пушкарев, В. В. Компонировка устройств для объемной печати экструдированным расплавом деталей сложной формы / В. В. Пушкарев, А. В. Дроботов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 121–123.
3. Использование объемной печати для производства заготовок из легкоплавких металлов / А. Р. Авдеев, П. В. Фед-

4. Довбыш, В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М. Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко. – ФГУП «НАМИ». – М., 57 с.
5. Aniwaа [Электронный ресурс] / – 2014. – Режим доступа: <http://www.aniwaa.com/>.
6. 3D-Принтеры сегодня [Электронный ресурс] / – 2014. – Режим доступа: <http://3dtoday.ru/>.

Редактор
Н. Н. Кваша

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2015 г. Поз. № 85ж. Подписано в печать 05.06.2015 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 9,11.
Тираж 100 экз. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.