

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

Поляничков Ю. Н., д.т.н., проф.

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

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

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

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

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

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

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

Сидякин Ю. И., д.т.н., проф.

Ханов Г. В., д.т.н., проф.

Тескер Е. И., д.т.н., проф.

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

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

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

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

Плотников А. Л., д.т.н., проф.

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

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.

Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»

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

Тел. издательства ВолГТУ:

(8442) 24-84-06

Факс (8442) 24-84-06

otr@vstu.ru

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

№ 5 (184)
Май
2016

УЧРЕДИТЕЛЬ:

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

Адрес редакции:

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.

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

E-mail: president@vstu.ru

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

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:

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

Editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SERIES
«ADVANCED
TECHNOLOGY IN
MACHINE BUILDING»

IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY

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

Editorial board:

Chairman

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

International index of the journal
ISSN 1990-5297.

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

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

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 5 (184)
May
2016

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

- Абакумова С. Ю. 42
Абдулгазис Д. У. 7
Барабанов В. Г. 55
Бедяева А. В. 58
Белухин Р. А. 35
Бондарев А. А. 32
Веткасов Н. И. 85
Ворончихин Д. В. 16
Ворончихина Н. В. 16
Генералов С. П. 70
Глазков А. В. 55
Гуревич Л. М. 72
Жданов А. А. 11
Зинченко С. Д. 14
Ингеманссон А. Р. 16, 32
Ислямгалиев А. И. 16
Казанцев В. Ф. 19
Капитанов А. В. 61
Карташова М. А. 67
Козачухненко И. Н. 24
Козловцева Н. В. 67
Крайнев Д. В. 16, 24, 32
Кристалль М. Г. 76
Крылов Е. Г. 67
Курченко А. И. 14
Кухтик М. П. 70
Левашкин Д. Г. 27
Макаров А. М. 67, 70
Митрофанов В. Г. 61
Мишустина С. Н. 81
Морозова Л. К. 35
Нго Куанг Чонг 48
Нестеренко П. С. 32
Нигметзянов Р. И. 19
Носенко В. А. 35
Ольштынский С. Н. 42
Плотников А. Л. 11, 72
Полянчиков Ю. Н. 24
Предвечный Д. А. 16
Репин К. А. 39
Сахнов Н. Г. 24
Семерня А. П. 42
Сергеев А. С. 67, 72
Сидякин Ю. И. 42
Смирнов Б. К. 46
Сорокин В. С. 81
Стегачев Е. В. 76
Степанов А. В. 85
Сундуков С. К. 19
Тихонова Ж. С. 72, 76
Умеров Э. Д. 7
Фам Хоанг Чунг 51
Фатюхин Д. С. 19
Фетисов А. В. 35
Фирсов И. В. 11
Харитонов И. А. 70
Чан Ай Ва 42
Чигиринский Ю. Л. 11, 32, 46, 48, 51
Яковлев А. А. 81

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Абдулгазис Д. У., Умеров Э. Д.</i> О возможности формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС присадкой наноглинистых минералов листовой структуры.....	7
<i>Жданов А. А., Плотников А. Л., Чигиринский Ю. Л., Фирсов И. В.</i> Повышение точности токарной обработки нежестких деталей из конструкционных сталей на станках с ЧПУ.....	11
<i>Зинченко С. Д., Курченко А. И.</i> Выбор кабеля для передачи HART-протоколов в промышленной сети.....	14
<i>Ислямгалиев А. И., Предвечный Д. А., Ворончихина Н. В., Ворончихин Д. В., Крайнев Д. В.</i> Вопросы моделирования формирования качества поверхности в процессе механической обработки.....	16
<i>Казанцев В. Ф., Нигметзянов Р. И., Сундуков С. К., Фатюхин Д. С.</i> Особенности ультразвуковой виброударной обработки.....	19
<i>Козачухненко И. Н., Крайнев Д. В., Сахнов Н. Г., Полянчиков Ю. Н.</i> Повышение эффективности процесса резания титановых сплавов за счет использования опережающего пластического деформирования.....	24
<i>Левашкин Д. Г.</i> Анализ влияния точности автоматически сменных узлов на обработку деталей в реконфигурируемых производственных системах.....	27
<i>Нестеренко П. С., Чигиринский Ю. Л., Бондарев А. А., Крайнев Д. В., Ингеманссон А. Р.</i> Математическая модель формирования радиальной составляющей силы резания при точении стали 20ХН.....	32
<i>Носенко В. А., Белухин Р. А., Фетисов А. В., Морозова Л. К.</i> Испытательный комплекс на базе прецизионного профилировального станка с ЧПУ CHEVALIER модели SMART-B1224 III.....	35
<i>Ретин К. А.</i> Методика проведения экспериментальных исследований параметров обработки холодом, влияющей на эксплуатационную точность маложестких валов.....	39
<i>Сидякин Ю. И., Абакумова С. Ю., Ольштынский С. Н., Семерня А. П., Чан Ай Ва</i> О соотношении между степенью наклепа и интенсивностью контактной упругопластической деформации материала в процессах ППД....	42
<i>Чигиринский Ю. Л., Смирнов Б. К.</i> Управление качеством изготовления деталей машин на этапе технологической подготовки механообрабатывающего производства.....	46
<i>Чигиринский Ю. Л., Нго Куанг Чонг</i> Влияние тепловых процессов на характеристики микропрофиля фрезерованной поверхности.....	48
<i>Чигиринский Ю. Л., Фам Хоанг Чунг</i> Особенности механической обработки дуплексных коррозионностойких сталей.....	51

Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<i>Барабанов В. Г., Глазков А. В.</i>	
Использование программного комплекса CODESYS для разработки системы управления автоматизированным стендом для испытания изделий на герметичность.....	55
<i>Бедяева А. В.</i>	
Модификации классических систем управления запасами на промышленных предприятиях.....	58
<i>Капитанов А. В., Митрофанов В. Г.</i>	
Анализ закономерностей развития переналаживаемых производственных систем многонаменклатурного производства.....	61
<i>Крылов Е. Г., Макаров А. М., Сергеев А. С., Козловцева Н. В., Карташова М. А.</i>	
Автоматизация процесса загрузки листового проката для установок плазменного раскроя материалов.....	67
<i>Кухтик М. П., Генералов С. П., Харитонов И. А., Макаров А. М.</i>	
Комплектование садки слябов методической печи в условиях информационно-технологической среды.....	70
<i>Плотников А. Л., Гуревич Л. М., Сергеев А. С., Тихонова Ж. С.</i>	
Физические закономерности формирования микрогеометрии поверхности при лезвийной обработке сталей.....	72
<i>Стегачев Е. В., Кристаль М. Г., Тихонова Ж. С.</i>	
Захватное устройство промышленного робота с предварительным ориентированием предметов производства струями воздуха.....	76
<i>Сорокин В. С., Яковлев А. А., Мищустина С. Н.</i>	
Методика синтеза технических решений систем охлаждения с жидким и газообразным рабочим телом на основе модели физического принципа действия.....	81
<i>Степанов А. В., Веткасов Н. И.</i>	
Моделирование теплонапряженности плоского шлифования с применением твердого смазочного материала с наполнителями из наноматериалов и высокодисперсных материалов.....	85

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.026

Д. У. Абдулгасис¹, Э. Д. Умеров²

О ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНДОТЕРМИЧЕСКИХ И УЛУЧШЕНИЯ ТРИБОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАСЛЯНЫХ СОТС ПРИСАДКОЙ НАНОГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ ЛИСТОВОЙ СТРУКТУРЫ

Крымский инженерно-педагогический университет

E-mail: ¹dilyver78@rambler.ru, ²Ervin777@yandex.ru

В статье показана возможность применения НГМП как теплопоглощающей компоненты СОТС, приводится теоретическое обоснование возможности проявления эндотермического эффекта при дегидратации гидрированной предварительно НГМП в составе масляной СОТС при сверлении конструкционных материалов, с одновременным улучшением триботехнологических свойств. Показана структурная форма адсорбционного слоя воды на поверхности НГМП и механизм проявления эндотермического эффекта. Использование гидрированной НГМП позволяет изменять условия трения на рабочих поверхностях резца и заготовки, что создает предпосылку для повышения стойкости режущего инструмента.

Ключевые слова: эндотермические свойства СОТС, масляные СОТС, триботехнологические свойства СОТС, наноглинистые минеральные присадки.

The article shows the possibility of using nanoclay mineral additives as heat is absorbed by the components of cutting fluids, provided a theoretical justification of the possibility of manifestation of the endothermic effect of the dehydration of a pre-hydrogenated nanoclay mineral additives in the composition of oil cutting fluid for drilling structural materials, while improving tribo processing properties. It is shown that the structural form of the adsorption layer of water on the surface and the mechanism of manifestation NCMA endothermic effect. The use of hydrogenated NCMA allows you to change the conditions of friction on the working surfaces of the tool and the workpiece, which creates prerequisites for increasing the resistance of the cutting tool.

Keywords: endothermic properties of cutting fluids, oil, cutting fluids, coolants tribo processing properties, nanoclay mineral additives.

Постановка проблемы. Лезвийная обработка труднообрабатываемых конструкционных материалов выдвигает высокие требования одновременно и к смазывающим и к охлаждающим свойствам СОТС, в то время как используемые технологические средства, выражено проявляют либо первое, либо второе действие. Это обстоятельство и побуждает к поиску присадок к масляным СОТС, которые сохраняя, а возможно и улучшая смазывающие (триботехнологические) свойства, существенно повышали бы охлаждающее действие.

Анализ литературы. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущих сталей достигается в основном снижением температуры и улучшением триботехнологической обстановки в зоне резания под действием СОТС

[1]. Несмотря на ряд технологических решений по составу и применению последних стойкость режущего инструмента, в особенности сверл, продолжает оставаться достаточно низкой.

В работе [2] была показана возможность значительного повышения теплоотводящей способности масляных СОТС, путем применения эндотермических присадок в виде кристаллогидратов. Однако применение последних имеет и усложняющие проявления, что привело к пересмотру существующих и поиску новых эндотермических присадок к масляным СОТС.

Цель статьи – показать возможность формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС, путем присадки к ним наноглинистых минералов листовой структуры.

Изложение основного материала. В работе [3] выдвинута гипотеза о том, что наиболее доступными, пригодными для использования в качестве присадки к масляным СОТС, с целью достижения проявляющихся одновременно эндотермического и триботехнологического эффектов, могут быть бентониты – природные, нетоксичные, термохимически стойкие наноглинистые минералы листовой структуры. В этой

же работе приведено и экспериментальное подтверждение к выдвинутой гипотезе.

Основной составляющей бентонитов является минерал монтмориллонит – нанодисперсный, листовой структуры алюмосиликат, состоящий из пакетов наноминералов, способных при гидратации набухать (рис. 1), создавая между слоями зоны гидрорасклинивания (гидросмазки).

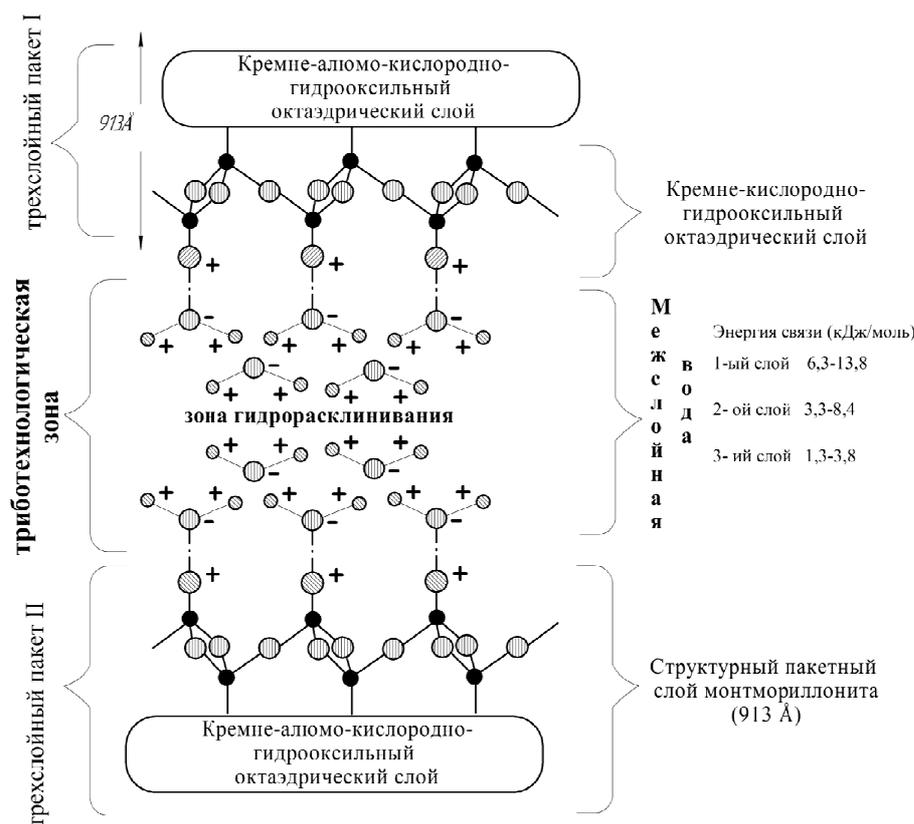


Рис. 1. Структурная схема физико-химического взаимодействия монтмориллонита с водой:
 ○ – OH гидроксил; ⊖ – Al алюминий; ● – Si кремний; ○ – O кислород; ⊙ – H водород

Пакеты являются наименьшей структурной составляющей бентонитов вообще и монтмориллонитов в частности. Толщина пакетов составляет 1,0–10 нм, а линейные размеры не превышают 50–150 нм. Расстояние между пакетами при набухании (гидрировании) может увеличиваться до 2,14 нм [4, 5].

Следует подчеркнуть, что наноструктуры обладают особыми свойствами, которые присущи только нанослоям, нанокристаллам, наночастицам, связанным с так называемым размерным эффектом. Важнейшим для достижения поставленной цели свойством наноглинистой минеральной присадки (НГМП) является способность при набухании к гидрорасклиниванию пакетов поверхностно сорбированной водой. В результате обеспечивается возможность

межпакетного скольжения за счет образующейся гидросмазки, улучшая тем самым триботехнологические свойства масляной СОТС в целом (рис. 2).

Следует отметить, что в современных моторных маслах, в последние годы, используются присадки – модификаторы трения, позволяющие снижать коэффициент трения между трущимися деталями двигателя. К наиболее известным присадкам – модификаторам трения относят графит и дисульфид молибдена. Уникальные свойства объясняются структурой их кристаллических решеток. Связи между их слоями как у графита так и у дисульфида молибдена относительно слабы и допускают возможность сдвига при малых напряжениях, что и обуславливает снижение коэффициента трения [6].

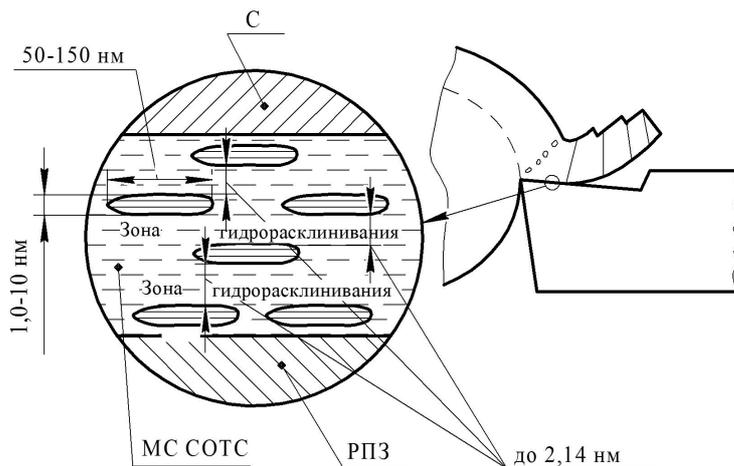


Рис. 2. Монтмориллонит с поверхностно сорбированной водой в масляной субстанции на передней поверхности инструмента:
С – стружка; РПИ – режущая поверхность инструмента; МС СОТС – масляная субстанция СОТС

Использование НГМП к масляным СОТС снимает ряд недостатков присущих применению в качестве присадки к моторным маслам дисульфида молибдена:

1. Сдвиг слоев у дисульфида молибдена может происходить «в сухую», у НГМП, при соответствующей предварительной подготовке, – гидрировании может происходить в сопровождении гидросмазки, т. е. в условиях жидкостного трения, что и отражается в итоге на триботехнологических свойствах.

2. Наноглинистые минералы – достаточно широко распространенные природные полезные ископаемые. Для их подготовки не требуется производства с высококвалифицированным персоналом и высокоточного оборудования.

3. Отпадает необходимость в дисперсантах и стабилизаторах дисперсии, которые необходимы при присадке дисульфида молибдена к моторным маслам.

Температурное воздействие в зоне резания на предварительно расклиненные поверхностно сорбированной водой пакеты наноминералов присаженных к масляной СОТС ведет к интенсивному испарению влаги, обеспечивая этим еще и эндотермический эффект. Пары воды остаются в системе, а при понижении температуры вновь возвращаются в ее структуру, что является одной из особенностей наноглинистых минералов. Так как масло не может взаимодействовать с водой, то после снижения температуры при выходе СОТС из зоны резания, пар сконденсируется и возвратится в структуру минерала, восстанавливая его охлаждающую способность.

Описанный процесс работает по аналогии с гидратацией-дегидратацией кристаллогидра-

тов, описанной в работе [2]. В кристаллогидратах вода находится в дефектах кристаллической решетки, и для отрыва первой молекулы требуется больше энергетических затрат, по сравнению с НГМП. Наноглинистые минералы проявляют эффект дегидратации намного активнее. Термодинамический анализ [7] свидетельствует о том, что эндотермический эффект у монтмориллонита возникает обычно в интервале температур 50–200 °С, с максимумом при 99 °С.

При нагревании адсорбционного слоя воды наноглинистой минеральной частицы до температуры 80–100 °С, наиболее слабые молекулярные связи обрываются первыми, что вызывает первую ступень дегидратации. Затем по мере нарастания температуры до 100–200 °С молекулярные связи со средней связью обрываются вторыми, а при достижении температуры более 200 °С молекулярные связи с более прочной связью оборвутся следующими и т. д., формируя ступенчатый эндотермический процесс дегидратации.

Таким образом, НГМП может быть использована как эндотермическая компонента СОТС по аналогии с кристаллогидратами. Но в отличие от последних, НГМП термически и химически более устойчива, что исключает возможность налипания и пригара ее на поверхности режущего инструмента и станка при высоких температурах.

Подтверждением того, что НГМП может проявлять эндотермический эффект по аналогии с кристаллогидратами, является дериватограмма бентонита, приведенная в работе [8]. В ней находим подтверждение того, что при температуре 100–150 °С происходит первая ступень эндотер-

мического эффекта – удаление адсорбированной и межпакетной воды. Завершающая ступень протекает при температуре 500–650 °С, с удалением гидроксильной группы.

При необходимости, температурный разрыв между первым и завершающим ступенями эндотермического эффекта можно заполнить аналогичными эффектами других минералов либо кристаллогидратов.

Сопоставление температурного диапазона дегидратации НГМП на основе монтмориллонита с рабочей температурой СОТС в зоне резания, замеренной [9,10] экспериментально, путем омыwania резца при различных режимах резания, с расходом 0,15 л/мин показывает, что они вполне соизмеримы и составляют 76...221 °С. По данным [11], температура СОТС, например, при сверлении заготовки из стали 50 сверлом из быстрореза Р6М3, может достигать 270 °С.

Остановим внимание на возможности повторного, либо многократного, использования масляной СОТС с НГМП. В этом случае решающее значение обретает способность рассматриваемой присадки вновь поглощать воду после предшествующего нагрева до рабочих температур СОТС в зоне резания.

Основываясь на работе [8] можно утверждать, что режим предшествующего нагрева может существенно изменить последующие водопоглощающие свойства НГМП. В подтверждение к сказанному, приведем краткую методику и некоторые результаты проведенного эксперимента. Добавляя воду в навеску НГМП довели ее до пастообразного состояния, после чего навеска ступенчато при 200, 300, 400, 500, 600, 800 и 900 °С высушивалась. После каждой ступени сушки и 10 минутной стабилизации температуры, навеску регидрировали.

Эксперименты показали, что при нагреве НГМП до температуры 200 °С, она сохраняет свои свойства регидратации на 61 %. Наиболее ошутимое падение регидратационной способности НГМП наблюдается после ее нагрева до 500 °С. При этом НГМП регидратируется, то есть сохраняет нужные для нас свойства, только на 37 %. Такой температурный порог вполне удовлетворяет возможность его использования в составе СОТС, так как красностойкость быстрореза составляет 500 °С. При дальнейшем нагревании НГМП до 800–900 °С почти полностью теряет свою регидратируемость, а следовательно становится непригодной для повторного использования в качестве присадки к СОТС.

На основании изложенного можно утверждать, что при перегреве НГМП его свойства ухудшаются. Температурным ограничением можно считать 500 °С, тогда как приемлемым температурным оптимумом срабатывания эндотермического эффекта НГМП в масляной СОТС является 200 °С.

Выводы

1. Важнейшим свойством НГМП является способность ее пакетов при гидрировании к гидрорасклиниванию поверхностно сорбированной водой. В результате обеспечивается возможность межпакетного скольжения за счет образующейся гидросмазки, т. е. перехода от сухого на жидкостное межпакетное трение, улучшая тем самым триботехнологические и противозадирные свойства масляной СОТС в целом.

2. С точки зрения пригодности наноглинистых минералов в частности монтмориллонита как присадки к масляным СОТС для повышения теплоотвода из зоны резания, они характеризуются более высокой теплоемкостью водной фазы граничного слоя (зоны гидрорасклинивания) в сравнении с объемной водой.

3. При попадании СОТС с НГМП в зону пониженных температур, разрушенный граничный адсорбционный слой автоматически восстанавливается, т. е. регидрируется выделяя в окружающую среду долю энергии, адекватную полученной при контакте с нагретой поверхностью инструмента. Последняя будет конвективно распределяться в объеме СОТС и выводится из системы в окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Виноградов, Д. В.* Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов : учеб. пособие по курсу «Инструментообеспечение машиностроительных предприятий» / Д. В. Виноградов. – Ч. 1: Функциональные действия. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. – 90 с.
2. *Абдулгасис, Д. У.* Использование эндотермического эффекта дегидратации кристаллогидратов для повышения теплоотводящей способности СОТС на основе растительных масел // Д. У. Абдулгасис // Високи технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХП». – Харків, 2005. – Вип. 2(11). – С. 3–8.
3. *Абдулгасис, Д. У.* Экспериментальные исследования эффективности масляной СОТС с присадкой наноглинистых минералов листовой структуры / Д. У. Абдулгасис, Э. Д. Умеров, Э. Э. Ягьяев, С. Р. Меметов, У. А. Абдулгасис // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – Вип. 83. – 313 с. – С. 3–9.
4. *Абдулгасис, Д. У.* Триботехнологические особенности применения наноглинистых минеральных присадок к масляным СОТС при лезвийной обработке конструкци-

онных материалов / Д. У. Абдулгасис, Э. Д. Умеров, Г. П. Подзноев, У. А. Абдулгасис // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – Симферополь, вып. № 1(49). – 2015. – С. 85–90.

5. На–монтмориллонит. – Технический словарь. Том 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ai08.org/index.php/term...xhtml>.

6. Механизм действия модификатора трения – дисульфида молибдена [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.avsta.ru/files/flib/35.pdf>.

7. Структурные формы и подвижность молекулярной воды в монмориллоните [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://chem.kstu.ru/butlerov_comm/rus/home.htm/.

8. Горюшкин, В. В. Технологические свойства бентонитов палеоцена Воронежской антеклизы и возможности их изменения / В. В. Горюшкин // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2005. – № 1. – С. 166–177.

9. Солоненко, В. Г. Повышение работоспособности режущих инструментов / В. Г. Солоненко. – Краснодар, Ростов-на-Дону: Кубанский гос. технолог. ун-т, Северо-Кавказский отдел Академии проблем качества РФ, 1997. – 223 с.

10. Солоненко, В. Г. Работоспособность шнековых сверл / В. Г. Солоненко, М. Г. Серикова, Л. А. Солоненко. – Краснодар: Кубанский гос. технолог. ун-т, 2004. – 108 с.

11. Ящерицин, П. И. Теория резания : учебник / П. И. Ящерицин, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корневич. – Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.

УДК 621.9.015: 658.512

А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Представлена методика обеспечения точности токарной обработки нежестких деталей на станках с ЧПУ, а также экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: точность токарной обработки, сила резания, стрела прогиба вала, технологические свойства контактной пары.

Presents a methodology of providing of precision of non-rigid parts' turning on CNC machines, as well as experimental data confirming the efficiency of the proposed approach.

Keywords: precision turning, cutting force, an arrow of deflection of the shaft, the technological properties of the contact pair.

Для обеспечения точности токарной обработки нежестких деталей традиционно [1] применяются специальные схемы закрепления с использованием люнетов. Зачастую выбор схемы закрепления осуществляется интуитивно либо по неким не вполне четким правилам в зависимости от соотношения геометрических параметров детали, после чего выполняется проверочный расчет. Однако при отсутствии достоверных математических моделей расчета радиальной составляющей силы резания возникают ошибки в определении величины прогиба нежестких деталей, которые, в свою очередь, могут привести к неверному выбору схемы закрепления, что неизбежно скажется на точности обработки. Кроме того, при использовании такого подхода к обработке нежестких деталей на станках с ЧПУ возникают неудобства, связанные с необходимостью переустановки детали, что во многом противоречит логике работы на подобном оборудовании. Исходя из принципов применения станков с ЧПУ, нужно стремиться

к максимально возможному упрощению схемы закрепления, что невозможно при отсутствии достоверных математических моделей расчета радиальной составляющей силы резания, а, следовательно, и прогиба нежестких деталей.

Теоретические основы предлагаемой методики обеспечения точности токарной обработки нежестких деталей подробно описаны в работах [2; 3; 5]. Основное отличие от традиционного подхода к определению величины прогиба нежесткой детали заключается в использовании оперативной информации о величине термоЭДС контактной пары инструмент-заготовка. За счет использования значения термоЭДС, полученного в процессе пробного прохода, можно снизить погрешность расчета величины радиальной составляющей силы резания (1) до 10–15 %, что позволяет производить более точные, по сравнению с традиционными методами [1], расчеты величины прогиба нежесткой детали.

$$P_y = (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3}, \quad (1)$$

где E_{np} – термоэлектродвижущая сила, при пробном проходе, мВ; A_y, k_y – постоянные, определенные из условий предварительной обработки; t – глубина резания, мм; V – скорость резания, м/мин; S – подача, мм/об.

Описанный подход можно применить на практике двумя способами:

$$y_{\max} = \frac{P_y \cdot L^3}{k_3 \cdot E \cdot J} = \frac{(A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3} \cdot L^3}{k_3 \cdot E \cdot J} \leq Td \cdot k_i, \quad (2)$$

где E – модуль нормальной упругости, кг/мм²; J – момент инерции сечения заготовки в месте прогиба в мм⁴; L – длина детали между двумя крайними точками закрепления; k_3 – коэффициент, зависящий от схемы закрепления; Td – допуск на размер; k_i – коэффициент, зависящий от принятого уровня геометрической точности, равный 0,3; 0,2; 0,12 для уровней A, B, C соответственно.

2. Для корректировки режимов резания таким образом, чтобы выбранная схема закрепления позволяла вести обработку с заданной точностью. Если расчет покажет, что в конкретном случае приемлемые режимы резания (т. е. ре-

1. Для выполнения проверочных расчетов по точности для выбранной схемы закрепления с погрешностью 10–15 %. Если, согласно расчету, точность не обеспечивается, то нужно выбрать другую схему, которая обеспечит большую жесткость закрепления детали.

жимы, которые допустимы технологически, а также с точки зрения производительности, режимы которые могут быть установлены на имеющемся оборудовании) подобрать невозможно, только тогда имеет смысл переходить к выбору другой схемы закрепления. Именно этот вариант целесообразен при обработке нежестких деталей на станках с ЧПУ, поскольку позволяет использовать более простые схемы закрепления, минимизировать необходимость применять люнеты. Формулы расчета корректировочных величин подачи для основных схем закрепления выглядят следующим образом:

а) для схемы закрепления «в патроне»:

$$S_p \leq 0,6 \sqrt{\frac{k_i \cdot Td \cdot 3 \cdot E \cdot J \cdot 10^3}{(L_{заг} - x_p)^3 \cdot (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot V^{-0,3} \cdot 10}}; \quad (3)$$

б) для схемы закрепления «патрон-центр»:

$$S_p \leq 0,6 \sqrt{\frac{k_i \cdot Td \cdot 12 \cdot E \cdot J \cdot L_{заг}^3 \cdot 10^3}{x_p^2 \cdot (L_{заг} - x_p)^3 \cdot (3 \cdot L_{заг} - x_p) \cdot (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot V^{-0,3} \cdot 10}}; \quad (4)$$

в) для схемы закрепления «центр-центр»:

$$S_p \leq 0,6 \sqrt{\frac{k_i \cdot Td \cdot 3 \cdot E \cdot J \cdot L_{заг} \cdot 10^3}{x_p^2 \cdot (L_{заг} - x_p)^2 \cdot (A_y + k_y \cdot E_{np}) \cdot t^{0,9} \cdot V^{-0,3} \cdot 10}}; \quad (5)$$

где x_p – координата резца, мм; 10 – переводной коэффициент силы резания (кгс в Н); 10^3 – коэффициент, который учитывает перевод размерности прогиба из мкм в мм.

Для увеличения производительности при использовании данного подхода можно изменять подачу в процессе обработки через определенный шаг (изменение координаты «Z» резца), например, через каждые 10 мм. На старых системах ЧПУ это заметно увеличивает код

программы, однако на современном оборудовании типа «Fanuc» и «Sinumerik» есть возможности использования встроенных циклов с приращениями, что заметно сокращает объем кода.

Для проверки работоспособности предлагаемого методики выполнен ряд экспериментов, результаты одного из которых приведены ниже. На рис. 1 представлен скриншот расчета подачи по разработанной программе [4]:

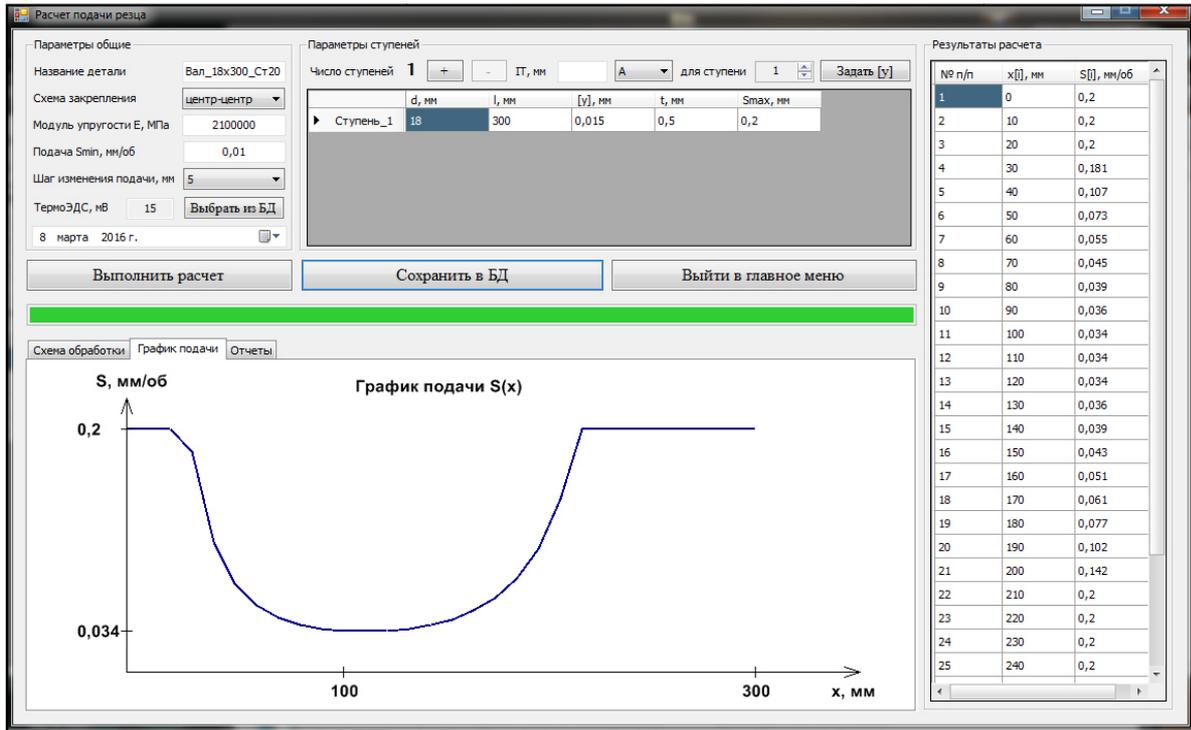


Рис. 1. Скриншот расчета корректирующих значений подачи

Материал детали – сталь 20. Геометрические параметры: $L = 300$ мм; $d = 18$ мм. Режимы обработки: $V = 80$ м/мин; $t = 0,5$ мм. Точение осуществлялось дважды, чтобы уменьшить влияние технологической наследственности и выровнять глубину резания по длине заготовки. Схема закрепления: патрон+центр. Заложённая величина прогиба соответствуют степени гео-

метрической точности А при 9 квалитете: 15 мкм.

На рис. 2 представлены графики радиального биения и смещения оси, построенные по результатам проведенного эксперимента. Как видно из графика, погрешностей, связанных с прогибом детали (т. е. картины бочкообразности), не наблюдается; величина радиального биения лежит в заданных пределах.

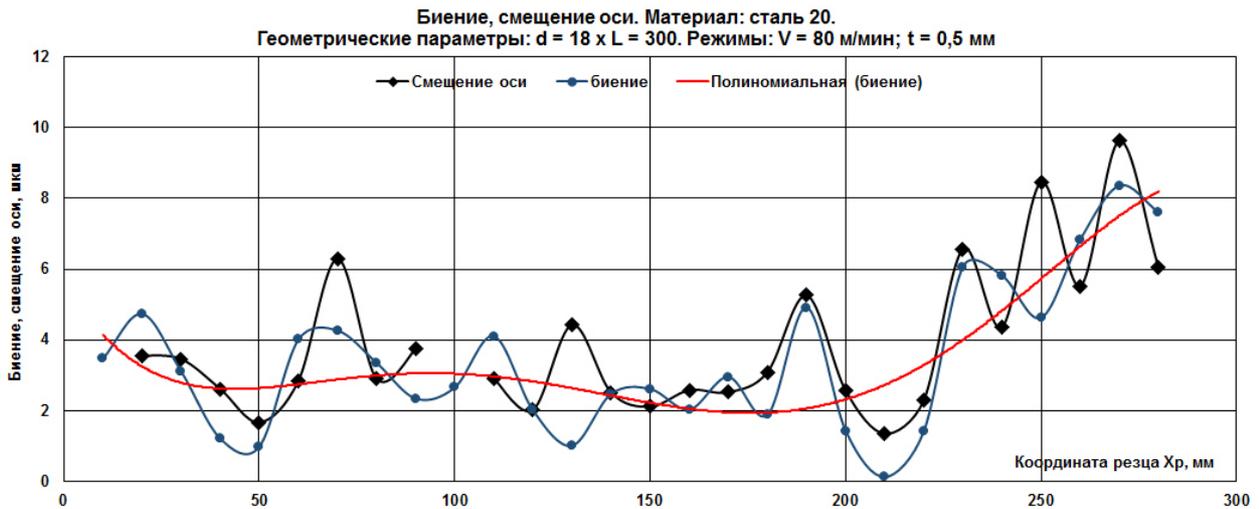


Рис. 2. График смещения оси и биения

Таким образом, предлагаемая методика обеспечения точности токарной обработки нежестких деталей на станках с ЧПУ может успешно исполь-

зоваться при точении конструкционных сталей. Необходима проверка работоспособности рассматриваемого подхода на других марках стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с.
2. Жданов, А. А. Подходы к обеспечению точности токарной обработки жестких валов на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 1 : матер. междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теор. и прикл. исследований '2014», Одесса, 18–30 марта 2014 г. – 2014. – Т. 8. – С. 96–100.
3. Допуск формы как эквивалент величины прогиба детали в подсистеме обеспечения точности токарной обработки жестких валов на станках с ЧПУ [Электронный ресурс] : доклад / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2014 : матер. междунар. науч.-практ. Интернет-конф. (16–26 дек. 2014 г.) / Проект SWorld. – Режим доступа : <http://www.sworld.education/index.php/ru/technical-sciences-414/machines-and-mechanical-engineering-414/24130-414-585>
4. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014618996 от 5 сент. 2014 г. РФ, МПК (нет). Автоматизированная система расчета подачи резца при продольном точении жестких валов на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, В. А. Егунов; ВолгГТУ. – 2014.
5. Способы регулирования точности при обработке жестких валов на токарных станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, А. А. Шмаров, Д. С. Клейков // Известия ВолгГТУ : междуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 39–43.
6. Математическая модель уточнения режимов резания для обеспечения точности токарной обработки жестких валов на станках с ЧПУ / А. А. Жданов, А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов // Научные труды SWorld. – 2015. – Вып. 4, том 3 «Технические науки». – С. 41–47.

УДК 681.327

*С. Д. Зинченко, А. И. Курченко***ВЫБОР КАБЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ HART-ПРОТОКОЛОВ
В ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ****Волгоградский государственный технический университет**E-mail: techmash@vstu.ru

Проанализированы ключевые составляющие и их зависимость для построения и передачи HART-протоколов для расчета максимальной длины кабеля.

Ключевые слова: HART-протокол, емкость кабеля, сопротивление, проводник, максимальная длина.

Analyzed the key components and their relationship to formation and transmission of HART protocols for calculating maximum cable length.

Keywords: HART-Protocol, the cable capacitance, resistance, conductor, maximum length.

Обмен информацией между устройствами, входящими в состав автоматизированной системы (компьютерами, контроллерами, датчиками, исполнительными устройствами), происходит в общем случае через промышленную сеть (fieldbus, полевою шину). В работе В. В. Денисенко [1] приводится, что промышленные сети отличаются от офисных следующими свойствами:

- специальным конструктивным исполнением оборудования, обеспечивающим защиту от пыли, влаги, вибрации, ударов;
- широким температурным диапазоном оборудования (обычно от -40 до $+70$ °С);
- повышенной прочностью кабеля, изоляции, разъемов, элементов крепления;
- повышенной устойчивостью к воздействию электромагнитных помех;
- возможностью резервирования для повышения надежности;
- повышенной надежностью передачи данных;
- возможностью самовосстановления после сбоя;

– возможностью работы в реальном времени (с малой, постоянной и известной величиной задержки);

– работой с длинными линиями связи (от сотен метров до нескольких километров).

В настоящее время насчитывается более 50 типов промышленных сетей (Modbus, PROFIBUS, DeviceNet, CANopen, сеть на основе HART-протокола, LonWorks, ControlNet, SDS, Seriplex, ArcNet, BACnet и др.). Однако широкое распространение получила только часть из них. В России подавляющее большинство АСУ ТП используют сети Modbus и PROFIBUS. В последние годы возрос интерес к сетям на основе CANopen, DeviceNet и HART-протокола. Распространенность в России той или иной промышленной сети связана, в первую очередь, с предпочтениями и активностью российских фирм, продающих импортное оборудование [2]. В качестве итога приведем табл. 1.

Таблица 1

Особенности и преимущества устройств с HART-протоколом

Особенность	Преимущество
Интеллектуальная электроника	Повышенная точность. Расширенные функциональные возможности
HART-«открытый» протокол	Потребитель не ограничен одним поставщиком
Двухпроводная система	Возможность использования существующих двух проводных аналоговых коммуникаций
Смешанная передача аналогового и цифрового сигналов	Совместимость с существующими стандартами для аналоговых сигналов. Готовность к переходу на полностью цифровые системы
Многоточечная система	Позволяет экономить на разводке проводных цепей
Передача информации о состоянии устройства в каждом сообщении	Позволяет получать интегрированные данные

Для связи с полевыми HART-устройствами на относительно коротких расстояниях (до 1500 м) можно использовать витые пары с общим экраном [3]. При более длинных линиях связи необходимо экранировать каждую витую пару, чтобы избежать перекрестных помех. Если кабель длиннее нескольких метров, его сопротивление и емкость могут существенно повлиять на постоянную времени RC-цепи, поэтому стоит ее проверить на соблюдение лимита в 65 мкс. Сопротивление проводов линии также может быть причиной большого падения напряжения источника питания, и это надо учитывать при расчете напряжения источника. Электрические параметры кабеля зависят от диаметра проводника, типа и толщины изоляции. Причем речь идет об изоляции, которой непосредственно покрыты проводники, – внешняя оболочка здесь не в счет. При расчетах емкости проводников имеется в виду емкость именно отдельного проводника по отношению к другим проводникам и экрану (а не взаимная емкость пары проводов). При расчете сопротивления линии надо сложить сопротивления обоих проводов линии. При расчете влияния длины линии на HART-сигнал желательно оперировать реальными значениями параметров, измеренными для конкретного кабеля. Однако прикидочная оценка сопротивления и емкости может быть сделана исходя из свойств диэлектриков и проводников, некоторые из которых приведены в таблицах. Обычно кабели с меньшей электрической емкостью имеют более тонкие проводники и, следовательно, более высокое сопротивление. Типичные комбинации для наиболее распространенных типов кабелей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Емкость различных кабелей

Изоляция	Емкость, пФ/м
ПВХ	300–400
полиэтилен	150–200
пенополиэтилен	75–100

На электронной ресурсе [4] указывается, что помимо емкости кабеля имеют удельное сопротивление, которое зависит от площади сечения. Расчет емкости и сопротивления считается для каждого провода, поскольку мы используем витую пару. В табл. 3 приведены типичные сечение с сопротивлением для двух проводов линии.

Таблица 3

Сопротивления кабеля различного сечения

Проводники		Сопротивление (для двух проводов линии), Ом/км
Площадь, мм ²	Диаметр, мм	
2,0	1,6	17
1,3	1,3	28
0,8	1,0	45
0,5	0,8	70
0,3	0,6	110
0,2	0,5	160

Для обычного приборного кабеля сечением провода 1 мм² с полиэтиленовой изоляцией (200 пФ/м, 36 Ом/км) правило 65 мкс наложит ограничение на длину кабеля 1100 м. Используя более качественный кабель (100 пФ/м, 36 Ом/км),

можно увеличить длину линии связи до 2000 м. Многоточечная структура системы уменьшает возможную длину кабеля. Большое значение в этом случае играет коэффициент CN табл. 4, что иллюстрируется данными [5].

Таблица 4

Максимальная длина для кабелей сечением 1 мм²

Полевые устройства	Изоляция, м		
	ПВХ	полиэтилен	пенополиэтилен
1 (CN=1)	600	1100	2000
многоточ. 10 (CN=1)	500	900	1600
многоточ. 10 (CN=4,4)	85	150	250

Исходя из вышеуказанных характеристик, которые были озвучены выше и, соблюдая технические требования, можно рассчитать максимальную длину кабеля. В простейшем случае она определяется последовательным сопротивлением и параллельной емкостью цепи. В. Н. Половинкин [6] приводит формулу для приблизительного расчета максимальной длины линии связи при условии использования данной константы, а также с учетом влияния параметров кабеля:

$$L_{\max} = \frac{65 \cdot 10^{-6}}{RC} - \frac{C_f + 10000}{C},$$

где L_{\max} – максимальная длина кабеля, м; R – сопротивление (нагрузка, сопротивление кабеля), Ом; C – погонная емкость кабеля, пФ/м; C_f – максимальная внутренняя емкость HART-прибора, пФ.

Для избежания влияния внешних наводок необходимо правильно выполнять заземление. Сигнальная цепь должна быть заземлена в од-

ной точке. Экран кабеля также должен быть заземлен только в одной точке, и он не должен быть соединен с корпусами приборов и клеммных коробок, если последние не изолированы от земли. Эта единственная точка заземления обычно выполняется вблизи главного управляющего устройства.

Таким образом, для сбора информации в системах АСУ ТП с полевых устройств, необходима именно промышленная сеть по ряду преимуществ описанных выше. Имеющиеся большой выбор промышленных сетей на рынке дает возможность применять данные технологии. В данной статье рассмотрена промышленная сеть HART ее достоинства по сравнению с другими аналогами, а так же выбор проводника для данной системы, зависящий от определенных величин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 608 с.
2. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум. – 4-е изд. – М. и др.: Питер, 2003. – 992 с.
3. Руководство по технологиям объединенных сетей / М. Бреснайкер [и др.]; пер. с англ. – 3-е изд. – М.: Издательский дом Вильямс, 2002. – 1040 с.
4. HART communication protocol. Application guide HCF LIT 34 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hartcomm.org>.
5. Корнова, Т. Л. Коммуникационная технология HART для автоматизации технологических процессов / Т. Л. Корнова // Практика приборостроения. – 2003. – № 4. – С. 77–83.
6. Половинкин, В. Н. HART-протокол / В. Н. Половинкин // Современные технологии автоматизации. – 2002, № 1. – С. 6–14.

УДК 621.9.015

А. И. Ислямгалиев, Д. А. Предвечный, Н. В. Ворончихина, Д. В. Ворончихин, Д. В. Крайнев
ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ
В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

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

Приведен анализ вопроса прогнозирования и формирования заданных параметров качества обработанной поверхности. Рассмотрены перспективы моделирования процессов резания, повышения практической значимости и достоверности моделей.

Ключевые слова: качество поверхности, моделирование процессов резания, технологическая наследственность.

The analysis of a question of forecasting and formation of the set parameters of quality of the processed surface is provided. Prospects of modeling of processes of cutting, increase of the practical importance and reliability of models are considered.

Keywords: quality of a surface, modeling of processes of cutting, technological heredity.

Как известно технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений неразрывно связано с обеспечением параметров качества поверхности, которые включают в себя как геометрические характеристики, так и физико-механические свойства поверхностного слоя. Они в свою очередь формируются на всех стадиях процесса изготовления детали под влиянием технологических факторов и режимов обработки. С развитием научных представлений пришло понимание важности внимания к данному вопросу на всех стадиях технологического процесса.

Исследованиями качества поверхностного слоя и технологической наследственности занимались большое количество исследователей [1, 2, 3, 4]. Вопросам обеспечения качества поверхностного слоя посвящены работы В. И. Аверченкова, В. Ф. Безъязычного, В. К. Старкова, А. М. Сулимы, А. Г. Сулова, В. П. Федорова, Т. В. Шаровой, Ю. Г. Шнейдера и других ученых [5].

Данная тематика все еще представляет значительный интерес и по-прежнему является актуальной, что объясняется комплексным характером оценки состояния поверхности. Так к геометрическим характеристикам поверхности относят: макроотклонение, волнистость, шероховатость, субшероховатость, а к физико-химическим – структуру, фазовый и химический состав, наклеп, остаточные напряжения, электронную эмиссию [6].

Однако, значительное количество и взаимное влияние отдельных факторов определяет сложность процесса формирования характеристик поверхностного слоя, а также его описания и прогнозирования. Значительную помощь в указанном направлении могут оказать методы компьютерного моделирования.

В настоящее время с развитием компьютерной техники моделирование производственных процессов, в том числе и процессов резания, стало мощным инструментом, способным решать не только прикладные, но и фундаментальные задачи. Моделирование может помочь раскрыть природу и закономерности изменения характеристик процесса; произвести оценку состоятельности и достоверности теоретических представлений и математических выкладок; спрогнозировать результативность и оптимизировать процесс обработки с целью обеспечения заданных эксплуатационных характеристик обработанной поверхности при минимуме произ-

водственных затрат; вывести управление процессом на новый качественный уровень.

Моделирование является сложным, многоэтапным процессом, объединяющим целую совокупность задач. Здесь, прежде всего, необходимо определить области и границы функционирования системы; все необходимые и наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на характер протекания процесса; управляющие параметры (переменные); качественную и количественную взаимосвязь между входными и выходными параметрами системы; а также принять адекватные математические модели.

На сегодняшний день проведена значительная работа и созданы как теоретические, так и эмпирические зависимости, которые позволяют прогнозировать как отдельные величины параметров качества обработанной поверхности [5, 7], так и их комплексы [6, 8].

Однако, теоретические уравнения носят общий характер, не учитывают случайные факторы и поэтому не имеют практического применения. Эмпирические зависимости имеют узкое конкретное применение и, как правило, базируются на справочных данных о свойствах режущего инструмента, обрабатываемого материала и т. д. Стандарты, установленные на конструкционные стали и сплавы устанавливают значительные допуски на химический состав материалов а значит на колебания физико-механических свойств. Кроме того, реальные колебания свойств твердосплавных инструментов одной марки как внутри партии, так и между партиями спекания одного завода-изготовителя или разных заводов достигает двукратного уровня и более. При этом все партии твердосплавных инструментов укладываются в установленные допуски [9, 10].

Безусловно, это не может сказаться на характере протекания процесса резания. Следовательно, и приведенные в справочной литературе методики назначения режимов резания, а также расчетные формулы оценки ожидаемых показателей качества не лишены определенных недостатков.

Кроме того, приводимые в справочной информации характеристики и зависимости, как правило, применимы к определенному перечню инструментальных и обрабатываемых материалов и не позволяют их применять для новых разрабатываемых и синтезируемых материалов.

А значит, для повышения достоверности и надежности моделей процессов механической

обработки должны быть учтены характеристики, как обрабатываемой детали, так и режущего инструмента.

Нельзя забывать о практической значимости и возможности применения разработок в условиях реального производства. Разработанные модели должны иметь возможность корректировки на основании информации полученной в результате оперативной диагностики режущего материала и обрабатываемой детали.

В работах [11, 12] предлагается получать необходимую информацию о состоянии контактной пары «инструмент–деталь» по величине термоЭДС пробного прохода (на фиксированных режимах резания). Это объясняется тем, что при смене марки, а также химического состава инструментального материала изменяется его теплопроводность. Влияние теплопроводности контактируемых пар на шероховатость проявляется через передачу количества выделенного при резании тепла в инструмент и стальную заготовку. Количество тепла, усвоенного объемом срезаемого металла, определяет долю хрупкого и вязкого разрушения в механизме стружкообразования и оказывает влияние на механизм формирования качества поверхности через температурную прочность металла [10].

Безусловно, оценка контактной пары «инструмент–деталь» по величине термоЭДС позволяет учесть соотношение теплопроводностей рассматриваемой пары и в результате скорректировать режимы резания с целью обеспечения заданных показателей качества поверхности. Но рассматриваемый способ не может в полной мере учесть изменение свойств поверхностного слоя в результате предшествующих операций.

Исследованиями [13, 14, 15] установлено, что резание с ОПД по обрабатываемой поверхности позволяет значительно улучшить микропрофиль получаемой поверхности и оказать влияние на производительность процесса. То есть это подтверждает, что состояние поверхностного слоя оказывает влияние не только на показатели процесса резания, но и на качество обработанной поверхности и шероховатость в том числе. Состояние же поверхностного слоя, как уже отмечалось ранее, определяется во многом предшествующей механической обработкой.

Отсюда можно сделать вывод о целесообразности рассмотрения несколько иной концепции разработки технологических операций и управления режимами обработки, учиты-

вающей информацию о свойствах инструментального и обрабатываемого материала, а также характеристик поверхностного слоя обрабатываемой детали. Для этого необходима оперативная оценка этих показателей.

В настоящий момент уже разработаны ряд методов оперативной оценки характеристик материала обрабатываемой детали, состояния ее поверхностного слоя, режущего инструмента. Среди таковых, можно выделить методы, основанные на замере термоЭДС дифференциальным диэлектрическим методом [16], а также методы ультразвуковой диагностики [17, 18] и другие.

Кроме того, методика ультразвукового исследования позволяет учитывать и неустойчивость процесса резания вследствие колебания плоскости сдвига и других факторов, а, следовательно, учитывать их при управлении процессом резания с целью обеспечения требуемых показателей качества обработанной поверхности [18].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на значительный объем исследований вопроса управления состоянием поверхности детали в процессе обработки существующие методы, приведенные в справочной литературе, не позволяют в полной мере учесть влияние всех воздействующих факторов.

2. Моделирование процессов механической обработки может стать эффективным инструментом, позволяющим: раскрыть природу и закономерности изменения характеристик процесса; произвести оценку состоятельности и достоверности теоретических представлений и математических выкладок; спрогнозировать результативность и оптимизировать процесс обработки с целью обеспечения заданных эксплуатационных характеристик обработанной поверхности при минимуме производственных затрат; вывести управление процессом на новый качественный уровень.

3. В настоящий момент существует возможность оперативной оценки характеристик материала обрабатываемой детали, состояния ее поверхностного слоя, режущего инструмента, что позволяет повысить эффективность управления режимами механической обработки и обеспечения заданных показателей качества обработанной поверхности.

4. Целесообразно изменение концепции разработки и управления технологическими опе-

рациями механической обработки в направлении оперативной оценки характеристик режущего инструмента, обрабатываемого материала и поверхностного слоя детали с целью повышения эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яцерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Яцерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.
2. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 1975. – 223 с.
3. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – М. : Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
4. Блюменштейн, В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
5. Петрешин, Д. И. Разработка и создание самообучающейся технологической системы с адаптивным управлением параметрами качества поверхностного слоя деталей машин : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08, 05.13.06 / Петрешин Д. И. – Брянск, 2010. – 34 с.
6. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
7. Безъязычный, В. Ф. Расчет остаточных напряжений от действия теплового фактора при обработке деталей точением / В. Ф. Безъязычный, М. В. Басков // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 1 (52). – С. 140–144.
8. Блюменштейн, В. Ю. Технологическая наследственность в машиностроении : от качества поверхностного слоя к механике наследования эволюционных структур / В. Ю. Блюменштейн // Сб. тр. VII международной науч.-практ. конф. «Инновации в машиностроении (ИНМАШ-2015)». Кемерово, 23–25 сентября 2015 г. – С. 250–255.
9. Плотников, А. Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ : монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе. – Волгоград : РПК «Политехник», 2003. – 184 с.
10. Чигиринский, Ю. Л. Обеспечение точности и качества поверхностей при многопроходной механической обработке на основе совершенствования информационных и математических средств проектирующей подсистемы САПР ТП : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08, 05.13.06 / Чигиринский Ю. Л. – Саратов, 2014. – 234 с.
11. Сергеев, А. С. Математическая модель формирования шероховатости поверхности при точении сталей на основе оперативного сигнала термоЭДС / А. С. Сергеев, Н. Г. Зайцева, А. Л. Плотников // Обработка металлов. – 2012. – № 3. – С. 20–23.
12. Plotnikov, A. L., Krylov E. G., Frolov E. M. Diagnostics of the state of a multicutter hard alloy tool on the basis of thermoelectric phenomena in the cutting zone / Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, No. 2, pp. 161–165. © Allerton Press, Inc., 2010.
13. Ярославцев, В. М. Эффективность методов опережающего деформационного упрочнения материала срезаемого слоя при обработке резанием / В. М. Ярославцев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 1. – № 1 (100). – С. 119–127.
14. Совершенствование получистового и чистового точения нержавеющей и жаропрочных сталей путем использования опережающего пластического деформирования : монография / Ю. Н. Поляничков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, А. Р. Ингеманссон ; под ред. А. П. Бабичева ; ВолгГТУ. – Тольятти : ЗАО «ОНИКС», 2012. – 154 с.
15. Повышение качества обработки и математическая модель формирования шероховатости поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием / А. Р. Ингеманссон, Н. Г. Зайцева, Д. В. Крайнев, А. А. Бондарев // Вестник УГАТУ (Вестник Уфимского гос. авиац. техн. ун-та). – 2012. – Т. 16, № 4. – С. 165–170.
16. Солдатов, А. А. Неразрушающий контроль пластической деформации методом измерения дифференциальной термоЭДС / А. А. Солдатов [и др.] // Дефектоскопия. – 2012. – № 3. – С. 49–51.
17. Взаимосвязь параметров акустической эмиссии с режимами резания и шероховатостью поверхности при токарной обработке / А. М. Фирсов, А. В. Вдовин, П. В. Перепелкин, И. В. Тимахович // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 2. – С. 70–75.
18. Мирошин, И. В. Методика акустико-эмиссионных исследований наследуемых параметров качества поверхностного слоя в условиях резания и поверхностного пластического деформирования / И. В. Мирошин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 3. – С. 46–49.

УДК. 621.9.048.6

В. Ф. Казанцев, Р. И. Нигметзянов, С. К. Сундуков, Д. С. Фатюхин

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВИБРОУДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

E-mail: mitriy2@yandex.ru

В статье кратко проанализированы сравнительные характеристики ультразвукового выглаживания и виброударной обработки. Рассмотрена динамика ультразвукового упрочнения свободным деформирующим элементом. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований ультразвуковой виброударной обработки.

Ключевые слова: поверхностный слой, ультразвук, упрочнение, ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование.

The article analyzes comparative characteristics of ultrasonic smoothing and vibro-impact treatment. The dynamics of ultrasonic peening free deforming element discussed. The results of experimental and theoretical studies of ultrasonic vibro-impact processing adduced.

Keywords: superficial layer, ultrasonic, hardening, ultrasonic superficial plastic deformation.

Ультразвуковая обработка является одним из наиболее эффективных способов поверхностного пластического деформирования (ППД) [1]. Основными преимуществами способов ППД являются: образование наклепанного слоя, возникновение остаточных напряжений сжатия, снижение шероховатости и повышение микротвердости поверхности.

Ультразвуковые методы ППД можно разделить на выглаживание и виброударную обработку [1, 2].

С точки зрения формирования эксплуатационных свойств поверхности принципиальным отличием перечисленных методов является частота и сила взаимодействия деформирующего элемента (индентора) с обрабатываемой поверхностью.

При высокой частоте и сравнительно небольшой силе удара индентора (при ультразвуковом выглаживании) наблюдается значительное снижение параметров шероховатости поверхности до 2...4 раз. При этом деформация под воздействием ультразвуковых колебаний распространяется на глубину 50 ... 150 мкм.

В случае виброударной ультразвуковой обработки уменьшение высотных и шаговых параметров профиля не столь значительно. Однако глубина деформированного слоя в этом случае возрастает до 250 ... 300 мкм.

Для обеспечения возможности регулирования геометрических и физико-механических свойств поверхности при виброударной ультразвуковой обработке необходимо рассмотрение кинематического взаимодействия индентора и обрабатываемой детали.

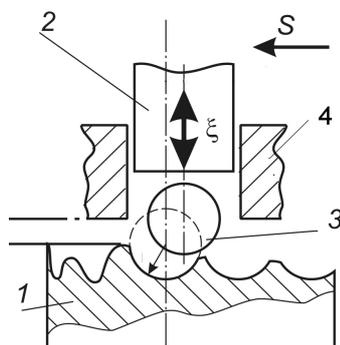


Рис. 1. Схема поверхностного пластического деформирования свободным деформирующим инструментом:

1 – обрабатываемая поверхность; 2 – ультразвуковой волновод; 3 – деформирующий элемент; 4 – кондуктор

При виброударной обработке упрочнение ведется деформирующими элементами, которые находятся в замкнутом объеме (рис. 1).

Этот объем образован обрабатываемой поверхностью, торцом ультразвукового волновода и стенками корпуса приспособления (кондуктора). Деформирующий элемент (элементы) могут свободно перемещаться в этом пространстве. Поверхностное пластическое деформирование в этом случае осуществляется путем передачи импульса деформирующим элементом, полученным при соударении его с торцом ультразвуковой колебательной системы, а затем с обрабатываемой поверхностью.

Рассмотрим подробнее кинематику деформирующего тела (шарика), которое находится в зазоре между торцом излучателя и обрабатываемой поверхностью (см. рис. 1). Движение торцевой поверхности излучателя описывается уравнением:

$$x = h + 2\pi f \xi_m \sin(2\pi f t + \varphi), \quad (1)$$

где h – среднее расстояние между торцом излучателя и обрабатываемой поверхностью; ξ_m – амплитуда колебательных смещений поверхности излучателя; f – частота колебаний; φ – начальная фаза, соответствующая моменту соударения деформирующего тела с поверхностью излучателя; t – время.

При контакте деформирующего тела с поверхностью излучателя, совершающего ультразвуковые колебания, деформирующее тело получает импульс, величина которого зависит от мгновенной скорости излучателя в момент контакта. Скорость деформирующего тела после соударения равняется:

$$V_2 = -q_1(V_1 + 2\pi f \xi_m \cos(2\pi f t + \varphi)), \quad (2)$$

где q_1 – коэффициент, характеризующий степень упругого соударения с поверхностью излучателя; V_1 – скорость движения деформирующего тела до соприкосновения с поверхностью излучателя.

Если пренебречь трением, движение деформирующего тела в зазоре до соударения с обрабатываемой поверхностью будет происходить с постоянной скоростью V_2 . Время до момента касания с обрабатываемой поверхностью:

$$t_1 = \frac{h + 2\pi f \xi_m \sin \varphi}{V_2}. \quad (3)$$

В момент касания скорость шарика будет V_2 , далее происходит удар, в процессе которого поверхность пластически деформируется. Длительность удара $\tau_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{4m}{3HNd}}$, где HNd – твердость обрабатываемого материала, а d и m – диаметр и масса шарика.

По окончании удара шарик отскакивает и начинает двигаться обратно к излучателю со скоростью

$$V_1 = q_2 V_2, \quad (4)$$

где q_2 – коэффициент, характеризующий степень неупругого соударения с обрабатываемой поверхностью.

Время обратного движения шарика равно:

$$t_2 = \frac{h + 2\pi f \xi_m \sin \varphi}{V_1}. \quad (5)$$

События (удары) могут быть непериодической функцией времени, однако важным обстоятельством является то, что в каждый момент соударения шарика с поверхностью излучателя ему передается определенный импульс, который затем тратится на пластическую деформацию обрабатываемой поверхности.

Оценки времени, необходимого для перемещения деформирующего элемента от излучателя до обрабатываемой поверхности и обратно, показывают, что оно много больше периода ультразвуковых колебаний. Поэтому момент касания шарика поверхности излучателя является случайной величиной. В целом, процесс ультразвуковой обработки при наличии зазора является стохастическим. Частота ударов существенно ниже, а их величина является случайной функцией времени. Тем не менее, можно предположить, что средние значения V_1 и V_2 возрастают пропорционально амплитуде колебательной скорости.

Подставляя в формулу для определения максимального диаметра отпечатка амплитуду колебательной скорости, получим:

$$d_{\max} = a^4 \sqrt{\frac{m}{HB \cdot d}} \cdot \sqrt{f \xi_m}. \quad (6)$$

Диаметр пластического отпечатка возрастает с увеличением амплитуды колебательных смещений, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

При упрочнении свободным деформирующим элементом экспериментально показано, что частота ударов существенно меньше частоты ультразвука [1, 2].

Рассмотрим следующую модель. Колебательная система, так же как и в модели [2] может быть представлена в виде шарика на пружине, прикрепленного к массе M . Шарик совершает колебания по закону $\xi(t) = \xi_m \sin(\omega t)$, где ω – круговая частота, t – время.

Между излучателем и обрабатываемой поверхностью находится деформирующий эле-

мент. Предполагается, что жесткость этого элемента очень велика (деформирующий элемент несжимаем).

В некоторый момент времени t_0 соответствующий отклонению шарика от равновесия $\xi_0 = \xi_m \sin(\omega t_0)$ излучатель ударяет по деформирующему элементу и этот импульс вызывает упругую деформацию обрабатываемой поверхности. В этом случае сила контактного взаимодействия:

$$F(x) = \alpha U, \quad (7)$$

где U – смещение шарика (или деформирующего тела), α – коэффициент, определяемый свойствами металла.

После максимального смещения, шарик начинает двигаться обратно и в момент времени, соответствующий фазе $\pi - \omega t_0$, контакт между шариком и деформирующим элементом исчезает. В соответствии с экспериментальными данными, в течение N периодов ультразвуковых колебаний контакта между шариком и деформирующим элементом не будет. Силу, действующую на обрабатываемую поверхность, можно записать в виде

$$F = \begin{cases} \alpha \xi_m [\sin(\omega t - \sin(\omega t_0))] & \text{при } t_0 < t < \frac{\pi}{\omega} - t_0 \\ & \text{при } t < t_0 \\ 0 & \frac{\pi}{\omega} - t_0 < t < NT \end{cases}, \quad (8)$$

где T – период ультразвуковых колебаний, $T = \omega/2\pi$.

Характер сил действующих в процессе контакта, для частного случая $N = 2$ приведен на рис. 2.

Максимум силы в импульсе зависит от амплитуды колебаний и фазы соприкосновения, которая определяется временем t_0 :

$$F_{\max} = \alpha \xi_m^4 (1 - \sin(\omega t_0)). \quad (9)$$

Поскольку вся система находится в равновесии, должно удовлетворяться следующее соотношение:

$$NTF_H = \int_{t_0}^{\frac{\pi}{\omega} - t_0} F(t) dt. \quad (10)$$

Условие связывает силу прижима F_H , ξ_m , t_0 и N . При $N = 1$ формула соответствует ранее полученной [2].

Подставляя выражение (9) в (10) и интегрируя его, получим:

$$F_H = \frac{\alpha \xi_m}{\pi N} \left[\cos(\omega t_0 - (\frac{\pi}{2} - \omega t_0) \sin(\omega t_0)) \right]. \quad (11)$$

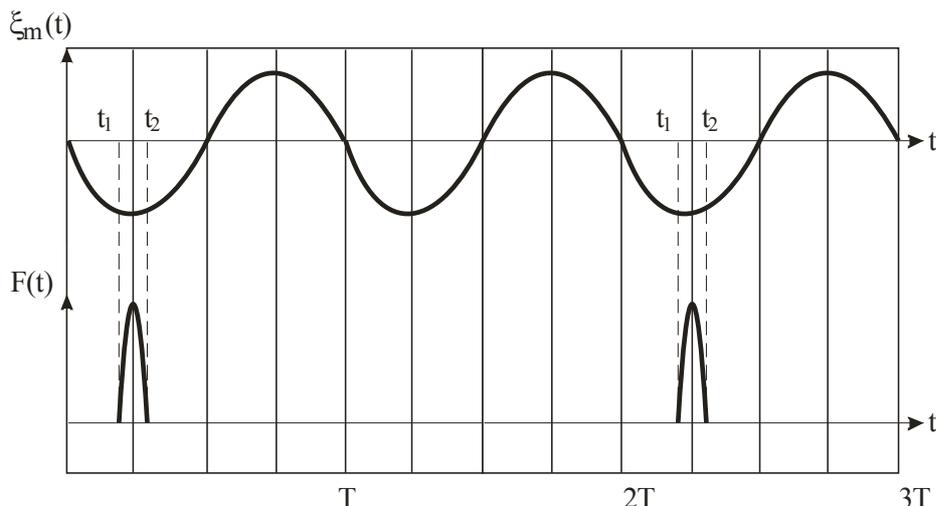


Рис. 2. Характер сил, действующих в процессе контакта между шариком и деформирующим элементом

Выражения (9) и (11) дают зависимость F_{max}, F_H, ξ_m и N , записанную в параметрическом виде относительно параметра $\Theta = \pi/2 - \omega t_0$:

$$\frac{F_{max}}{\alpha \xi_m} = 1 - \cos \Theta, \tag{12}$$

$$\frac{NF_H}{\alpha \xi_m} = \frac{\sin \Theta - \Theta \cos \Theta}{\pi}. \tag{13}$$

При малых Θ приближенное выражение имеет вид:

$$F_{max} \approx \sqrt[3]{\frac{\alpha}{2} (F_H N)^2 \xi_m}. \tag{14}$$

Экспериментальные исследования с помощью скоростной кинокамеры характера импульсного наклепа в режиме ультразвуковой обработки свободным деформирующим элементом позволили изучить динамику перемещения индентора. Киносъемка процесса ультразвукового упрочнения проводилась с помощью скоростной кинокамеры со скоростью съемки 6,576 тыс. кадров/с (рис. 3).

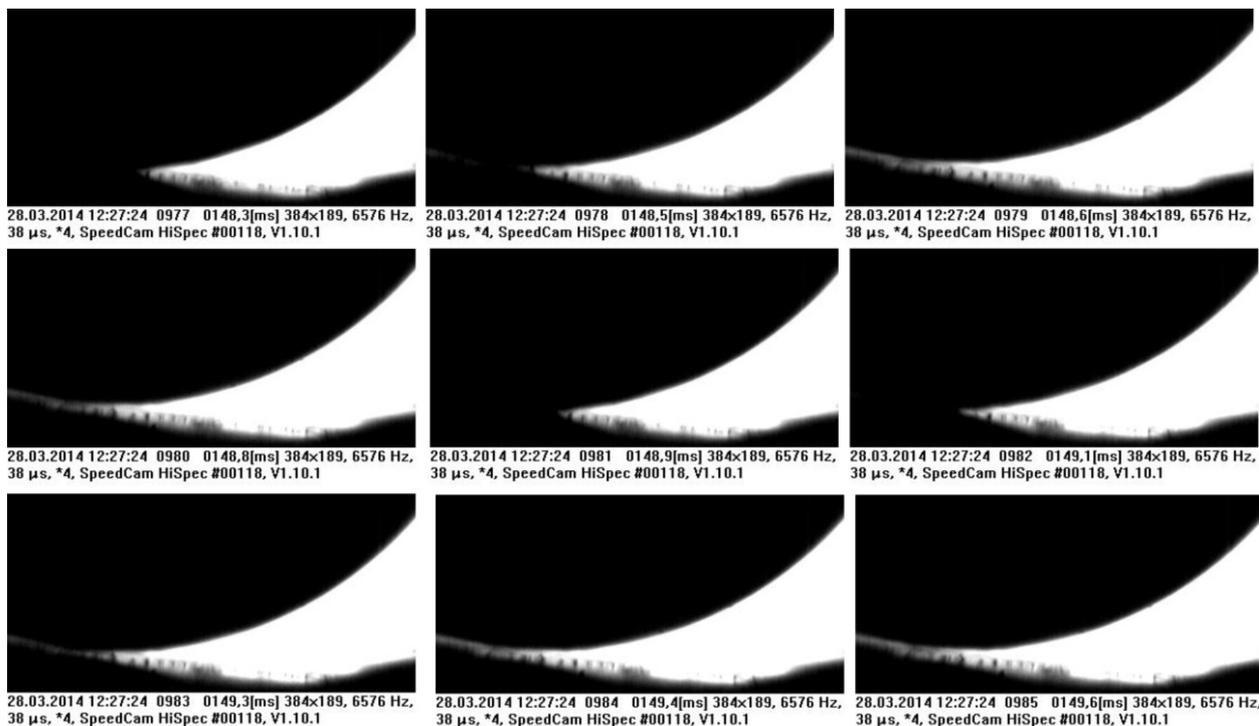


Рис. 3. Кинограмма процесса ультразвукового упрочнения (скорость съемки 6576 кадров /с)

В экспериментах использовалась ультразвуковая колебательная система с рабочей частотой 21,2 кГц при амплитуде колебательных

смещений излучателя $\xi_m = 20$ мкм. Характер движения деформирующего тела (шарика) приведен на рис. 4.

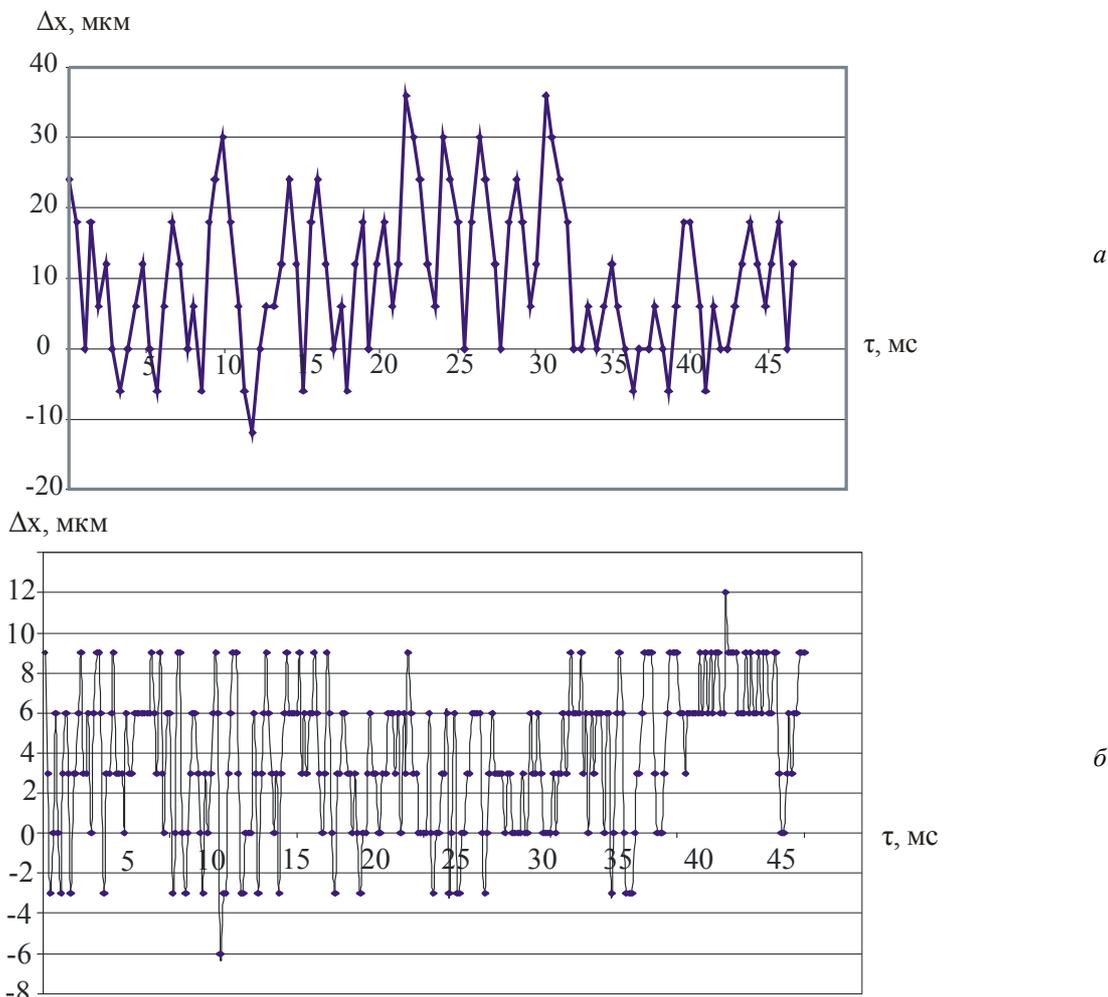


Рис. 4. Динамика изменения положения шарика Δx :
 а – при усилии прижима 5 Н; б – при усилии прижима 50 Н

В результате анализа кинокадров было найдено, что среднее время между двумя последовательными моментами контакта деформирующего тела (шарика) с обрабатываемой поверхностью составляет $1,8 \cdot 10^{-3}$ с, что соответствует частоте ударов порядка 550 Гц (рис. 4, а). Как показали экспериментальные исследования, при соударении с обрабатываемой поверхностью происходит неупругий удар, а скорость шарика в момент соударения с излучателем существенно меньше амплитуды колебательной скорости излучателя.

При увеличении усилия прижима увеличивается частота ударов индентора, а амплитуда уменьшается. При увеличении усилия прижима до 50 Н частота ударов возрастает до 1400 Гц, а амплитуда составляет 12 ... 18 мкм (рис. 4, б).

Выводы

Теоретические и экспериментальные иссле-

дования характера импульсного наклепа в режиме ультразвуковой обработки свободным деформирующим элементом дают возможность изучить динамику перемещения индентора.

Проведенный анализ периодического силового взаимодействия деформирующего элемента и обрабатываемой поверхности при виброударной ультразвуковой обработке позволяет оптимизировать технологические параметры, характеризующие деформацию обрабатываемой поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приходько, В. М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте транспортной техники / В. М. Приходько. – М. : Изд. Техполиграфцентр, 2003. – 253 с.
2. Казанцев, В. Ф. Физические основы технологического применения ультразвука : учеб. пособие / В. Ф. Казанцев. – М. : МАДИ (ГТУ), 2008. – 102 с.

УДК 621.9.015

*И. Н. Козачухненко, Д. В. Крайнев, Н. Г. Сахнов, Ю. Н. Полянчиков***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Приведен анализ факторов, затрудняющих лезвийную обработку титановых сплавов. Рассмотрены направления повышения эффективности обработки.

Ключевые слова: титановые сплавы, шероховатость, износ, режущий инструмент, опережающее пластическое деформирование (ОПД).

The analysis of factors of the titanic alloys complicating process of cutting is provided. The directions of increase of efficiency of processing are considered.

Keywords: titanium alloys, surface roughness, wear, cutting tool, advancing plastic deformation (APD).

В настоящее время развитие авиационной, космической, ракетной техники, а также других отраслей машиностроения ведет к необходимости освоения и увеличения роли новых материалов, в частности титана и его сплавов. Титановые сплавы имеют благоприятное сочетание механических, физических и химических свойств. Их основными достоинствами являются высокая прочность, небольшой удельный вес и коррозионная стойкость [1].

Однако титан и его сплавы плохо обрабатываются резанием. Трудоемкость механической обработки титановых сплавов в 3–4 раза больше, чем для углеродистых сталей, и в 5–7 раз выше, чем для алюминиевых сплавов.

По данным ММПШ «Салют», коэффициент относительной обрабатываемости по отношению к стали 45 составляет 0,35–0,48 для титана и сплавов BT5 и BT5-1 и 0,22–0,26 для сплавов BT6, BT20 и BT22. [2].

Значительно меньшая площадь контакта между стружкой и инструментом, чем при обработке сталей и как следствие увеличение контактного давления ведет к концентрации теплоты трения скольжения на меньшей площади. Низкая теплопроводность титана приводит к чрезвычайно высоким температурам инструмента. Если при резании стали в контактной области температура достигает 300–350 °С, то при резании титановых сплавов в тех же условиях температура превышает 1100–1200 °С. С повышением скорости резания температура в контактной области может повыситься еще выше. Это приводит к перегреву стружки, ее сильному окислению, иногда воспламенению. По-

этому для титана используют относительно невысокие скорости резания от 5 до 80 м/мин [3].

Безусловно, это неблагоприятно отражается на производительности обработки деталей из титана и его сплавов и определяет актуальность исследований в данном направлении.

Для того чтобы решить проблему повышения производительности обработки при соблюдении заданных показателей качества обработанной поверхности и стойкости режущего инструмента необходимо выявить влияние отдельных факторов на характер протекания процесса и их взаимосвязь.

Следует отметить, что причины плохой обрабатываемости титана и его сплавов определяются его свойствами. Под действием пластической деформации, титан изменяется подобно чистым поликристаллическим металлам: по мере увеличения степени деформации происходит измельчение зерен и вытягивание их в направлении деформации. Сопротивление к деформации титана в значительно большей мере зависит от скорости деформации, нежели сопротивление конструкционных металлов, как сталь, алюминий, медь и др. [4].

Вследствие высокой прочности и низкой теплопроводности процесс резания титановых сплавов характеризуется высокими температурами в зоне резания, концентрирующимися в зоне стружкообразования. Росту температуры способствуют увеличение скорости, подачи и глубины резания [5]. Это вызывает структурные превращения и интенсивное взаимодействие с кислородом, азотом, углеродом и водородом из внешней среды. В результате такого

взаимодействия образуются твердые растворы внедрения не только на поверхности, но и в кристаллической решетке, что резко снижает пластичность титановых сплавов и повышает их твердость.

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.

Неблагоприятное влияние на износ инструмента оказывает и истирающая способность титановых сплавов, обусловленная многокомпонентным структурным составом.

Невысокая пластичность, низкая теплопроводность, а также способность титановых сплавов накапливать большие упругие деформации приводит к циклическому характеру стружкообразования, резким колебаниям сил резания, температуры и напряжений в режущем клине. Это вызывает циклическую усталость и интенсификацию износа [6].

Описанные выше явления, сопровождающие процесс резания титановых сплавов, повышенный износ инструмента, а также циклический характер стружкообразования неблагоприятно сказываются на качестве обработанной поверхности. При этом следует учесть, что с ростом скорости резания именно температурный фактор становится доминирующим [7].

Принимая во внимание взаимосвязь процессов деформации и теплообразования [8] можно сделать вывод о том, что обеспечение ресурса повышения производительности возможно за счет воздействия на эти составляющие.

Так с целью повышения эффективности механической обработки титановых сплавов резанием применяют различные способы уменьшения температуры резания, такие как: использование различных смазывающе-охлаждающих жидкостей, обеспечивающих интенсивный отвод тепла из зоны резания [9]; охлаждение обрабатываемых деталей [10] и другие.

Радикальным средством является повышение температуры металла до 300–400 °С. При этом у большинства титановых сплавов сопротивление сдвигу снижается почти в 2 раза при

незначительном окислении, вязкость становится несколько ниже, чем при комнатной температуре, и сопротивление резанию резко уменьшается, что позволяет повысить скорость резания в несколько раз [3].

Другим направлением может стать изменение характеристик поверхностного слоя обрабатываемой детали, в частности резание с опережающим пластическим деформированием. Способ совмещает в себе два приема – поверхностное пластическое деформирование (ОПД), создающее необходимые глубину и степень наклепа, и последующий сьем упрочненного металла в виде стружки [11].

Эффективность предлагаемого способа можно объяснить следующим. Создаваемая ОПД повышенная плотность дислокаций в поверхностном слое заготовки обуславливает снижение работы, 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.

В работе [12] было установлено благоприятное влияние предлагаемого способа при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей. А поскольку можно говорить о схожести процессов резания титановых сплавов и нержавеющей жаропрочных сталей и явлений их сопровождающих [3, 13], то целесообразно ожидать аналогичный эффект.

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. Уменьшение сопротивления пластическому деформированию в контактных объемах и во фронте сдвига также обуславливает снижение температуры. Уменьшаются вертикальная и горизонтальная составляющие силы резания. Снижение тепловыделения при обработке с ОПД предопределяет повышение температурно-деформационной стабильности процесса стружкообразования, а именно уменьшение вы-

сокочастотной цикличности. Снижение нагрева режущего клина, его силового нагружения, ослабление адгезионно-усталостных явлений, интенсивности диффузионного проникновения атомов железа в структуру твердого сплава и пагубного влияния цикличности стружкообразования обуславливает повышение стойкости инструмента. После резания с ОПД в поверхностном слое формируются остаточные сжимающие напряжения. Кроме того, в результате повышения устойчивости процесса резания снижается шероховатость поверхности, что позволяет сократить число технологических переходов, а также улучшается микропрофиль поверхности (в частности, увеличивается длина опорной линии), Все это благоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках детали.

Таким образом, на основе проведенного анализа и результатов применения способа точения с ОПД можно предположить положительное влияние на эффективность обработки титановых сплавов, а также целесообразность проведения дальнейших исследований данной тематики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшкин. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
2. <http://www.npctitan.ru/spravka/mo/>
3. Илларионов, А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов : учеб. пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.
4. Мороз, Л. С. Титан и его сплавы / Л. С. Мороз, Б. Б. Чечулин, И. В. Полин [и др.]. – Санкт-Петербург : Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1960. – 514 с.
5. Жилиев, С. В. Влияние режимов резания на температуру режущей кромки токарных резцов при обработке титановых сплавов / С. В. Жилиев, К. А. Копылов, С. Д. Кульгутинов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова № 1 (49). – 2011. – С. 7–10.
6. Курченко, А. И. Исследование процесса циклического стружкообразования при точении α -титанового сплава / А. И. Курченко, С. И. Кормилицин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. тр. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 20012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 27–30.
7. Курченко, А. И. Влияние вида контактного взаимодействия на температуру резания при точении титановых сплавов / А. И. Курченко, С. И. Кормилицин, И. А. Стребков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. тр. № 11 (173) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 41–46.
8. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания / Н. В. Талантов // Физические процессы при резании металлов: сб. науч. тр. – Волгоград, 1984. – С. 3–37.
9. Ражковский, А. А. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на силы резания при токарной обработке титанового сплава ВТ3 / А. А. Ражковский, А. Г. Кисель, Д. С. Реченко, А. А. Федоров // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (111). – С. 101–104.
10. Седов, Д. И. Повышение эффективности обработки титановых сплавов за счет предварительного охлаждения / Д. И. Седов, Т. Г. Насад // Вестник СГТУ. – 2011. – № 1 (52). – С. 89–96.
11. Пат. 2399460 РФ, МПК В 23 В 1/00. Способ обработки деталей резанием с опережающим пластическим деформированием / Ю. Н. Полянчиков [и др.]; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2010.
12. Полянчиков, Ю. Н. Совершенствование полустого и чистового точения нержавеющей и жаропрочных сталей путем использования опережающего пластического деформирования / Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, А. Р. Ингеманссон; науч. ред. А. П. Бабичев; ВолгГТУ – Тольятти : ЗАО «ОНИКС», 2012. – 155 с.
13. Курченко, А. И. Влияние процесса циклического стружкообразования при точении труднообрабатываемых материалов на износ инструмента / А. И. Курченко, С. И. Кормилицин, А. Л. Плотников // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. тр. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 36–39.

УДК 65.011.56:658.51.061.5

*Д. Г. Левашкин***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИ СМЕННЫХ УЗЛОВ
НА ОБРАБОТКУ ДЕТАЛЕЙ В РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ**

Тольяттинский государственный университет

E-mail: LevashkinD@rambler.ru

В статье рассмотрены вопросы обеспечения точности обработки деталей с применением автоматически сменных узлов и перекомпонования рабочей позиции перекомпонуемых производственных систем. Показано суммирующее влияние точности базирования автоматически сменных узлов на точность многосторонней обработки деталей. Для решения вопросов многосторонней обработки деталей предложена модель автоматически сменного узла – носителя деталей для моделирования вопросов обеспечения точности базирования на рабочей позиции перекомпонуемой производственной системы. Приведена конструкция носителя, выполненного в виде правильной прямоугольной призмы, где на боковых гранях расположены базирующие отверстия, а установку комплекта приспособления и детали выполняют в плоскости каждой грани. При этом обеспечивается пространственная повторяемость положения деталей относительно технологических узлов рабочей позиции и равная жесткость корпуса носителя в направлениях многосторонней обработки деталей. В статье рассмотрена модель системы равномерно расположенных базирующих отверстий для моделирования точности базирования носителя. На основе размерного анализа показано влияние взаимного расположения каждого базирующего отверстия носителя на точность обработки детали. Показано, что на точность многосторонней обработки деталей оказывают влияние силовые смещения корпуса носителя, возникающие вследствие наложения переменных внешних силовых факторов механической обработки. Показан переменный характер силового нагружения корпуса носителя как аспекта, определяющего переменный характер возникающих силовых смещений при многосторонней обработке деталей. Таким образом, совместное рассмотрение представленных аспектов обеспечения жесткости и точности базирования позволит решить задачи обеспечения точности многосторонней обработки деталей на носителях.

Ключевые слова: перекомпонуемые производственные системы, автоматически сменный модуль, спутник автоматической линии, гибкая производственная система, многосторонняя обработка деталей, точность, жесткость.

Annotation: The article covers the issues of assurance of accuracy and stability of parts processing using the auto-replaceable assemblies and the repackaging of active position of reconfigurable manufacturing systems. The summing influence of auto-replaceable assemblies locating accuracy and their body stability on the accuracy of multisided processing of parts is demonstrated. To solve the issues of multisided processing of parts the author suggested the model of auto-replaceable assembly – carrier of parts for simulation of the issues of locating accuracy and carrier body stability assurance in active position of configurable manufacturing system. The author gives the design of a carrier made in the form of right prism on the lateral faces of which the basing holes are located, and the installation of the tool set and a part is carried out on each face. This construction assures the dimensional repetitive accuracy of the parts location relative to production assemblies of the active position and the equal carrier body stability in directions of multisided processing of the parts. The article describes the model of the system of equally spaced basing holes for simulation of carrier location accuracy. The effect of relative position of each carrier basing hole on the accuracy of the part processing is shown on the base of dimensional analysis. This aspect is determinant for carrying out multisided processing of the parts on the carrier. It was proved that the accuracy of multisided processing of the parts depends on the forced displacements of the carrier body arising due to overlap of variables of external force factors of machine processing. The author carried out the analysis of variety of force actions directions that allowed to determine the force factors and to speak about the study of optional designs of dimensional loading of the carrier body. The author considered the variable type of force loading of the carrier body as the aspect specifying the variable type of arising forced displacements during multisided processing of the parts. Thus, joint considering of proposed aspects of stability and locating accuracy assurance will allow to solve the problem of assurance of accuracy of multisided processing of parts on the carriers.

Keywords: reconfigurable manufacturing systems; auto-replaceable assembly; transfer line pallet; flexible manufacturing system; multisided processing of parts; accuracy; stability.

Результатом развития современных автоматизированных станочных систем является переход от стационарных систем с жесткой компоновкой к перекомпонуемым системам, производствам переменной структуры и компоновки (RMS) на основе применения автоматически сменных производственно-технологических мо-

дулей (носителей) [1,2,3]. Реконфигурируемые производственные системы характеризуют быстроту смены технологической базы, расширение номенклатуры выпускаемой продукции, сокращение времени на подготовку производства, а также внедрение эффективных технологий [4–8].

Основой функционирования RMS является перекомпоновка, изменение конфигурации и архитектуры основных и вспомогательных узлов, организация переменных во времени кинематических связей и кинематических структур, процессов управления. Наряду с известными решениями это возможно обеспечить, например, применением в качестве узлов базирования, крепления и транспортировки деталей – автоматически сменные узлы (носители) призматической формы [9,17].

Эффективность внедрения носителей связана с решением вопросов обеспечения их жесткости и точности. Это связано с многообразием направлений действия сил резания при многосторонней, многоступенчатой механической обработке деталей, и необходимостью обеспечения

точности базирования деталей на корпусе носителя, с сохранением идентичности пространственного расположения их базовых и обрабатываемых поверхностей.

Целью данной работы является анализ влияния параметров точности и жесткости автоматически сменных узлов на точность обработки деталей для реконфигурируемых производственных систем.

В результате перекомпоновки RMS, обеспечивается многовариантность производственных процессов обработки деталей одного или нескольких наименований на одной рабочей позиции. Так, для рабочей позиции RMS (рис. 1) носители 2, 3 с размещением исполнительных узлов являются автоматически сменными [1,17–19].

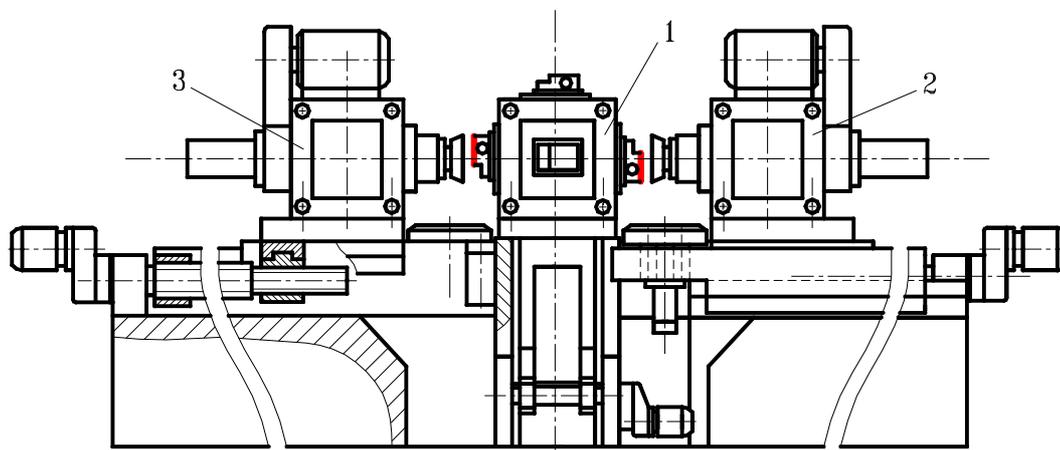


Рис. 1. Общий вид рабочей позиции RMS

Для обеспечения многоступенчатой и многосторонней обработки деталей используют носитель 1. При выполнении обработки деталей на носителе RMS призматической формы, (см. рис. 1) для базирования и крепления деталей на плитках-приспособлениях могут быть задействованы последовательно все шесть граней корпуса.

Однако внедрение носителей призматической формы и развитие процессов их применения в RMS, связано с решением ряда вопросов обеспечения точности и жесткости их изготовления.

Выделим комплект (группу) базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$ из множества $T_i = \{T_1, T_2, \dots, T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m\}$ на плоскости одной грани, расположение которых взаимосвязано (рис. 2).

При многосторонней обработке с применением носителя (рис. 3) на точность обработки

размеров деталей накладываются погрешности расположения базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$ на гранях $G1 \dots G6$, по которым носитель устанавливают на рабочей позиции RMS [20].

В этой связи необходимо учесть влияние расположения каждой грани G и расположения базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$, так как они определяют точность межцентровых расстояний A_{ij} [20,21].

Группу отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ определяют размерные связи: A_{ij}^n – непересекающиеся межцентровые расстояния между отверстиями ($i \neq j = 1, 2, 3, 4, m$), A_{ij}^n – пересекающиеся межцентровые расстояния. Каждое обработанное отверстие T_{ij} обладает набором задаваемых параметров $A_{ij}^n, A_{ij}^m, L_{xij}, L_{yij}, B_{ij}$ (рис. 3), которые определяют положение каждого отверстия относительно грани носителя G .

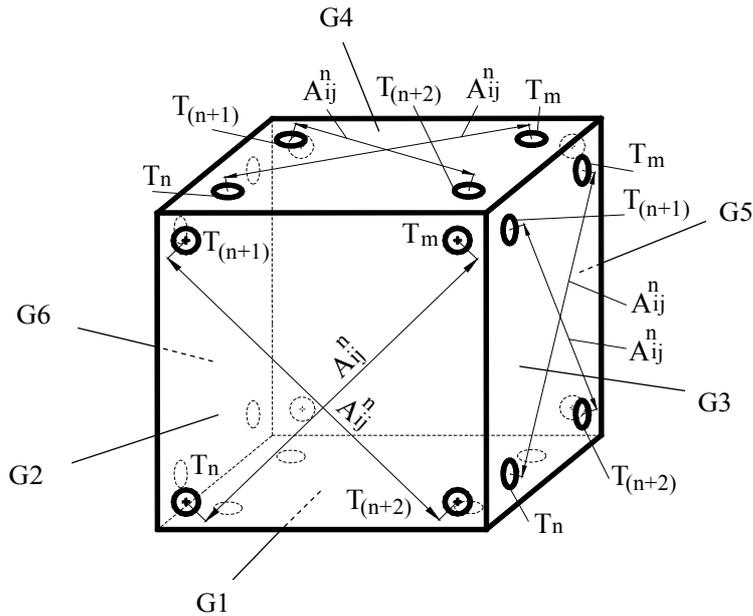


Рис. 2. Модель носителя с базирующими отверстиями на гранях корпуса

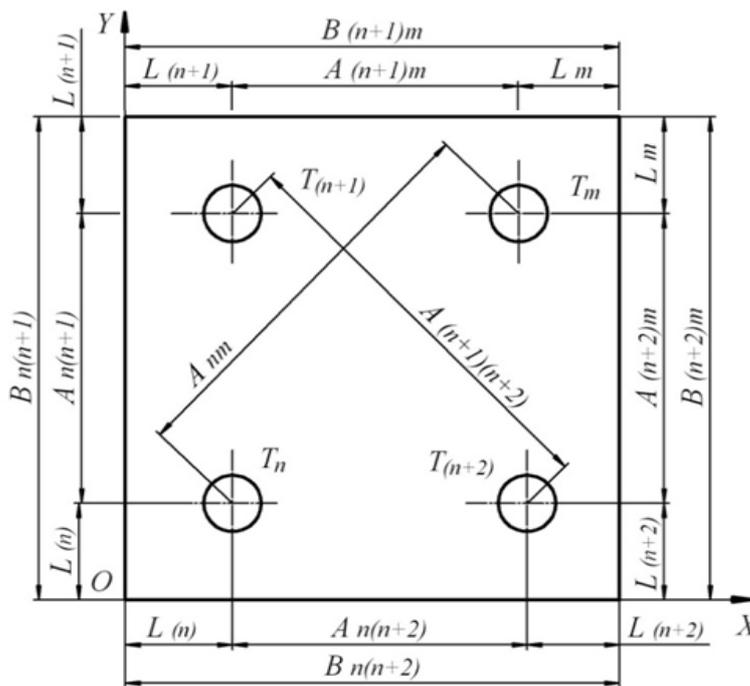


Рис. 3. Операционные расчетные цепи изготовления отверстия T_m

На точность расположения отверстий влияют отклонения межцентровых расстояний A_{ij}^n , A_{ij}^n , с учетом поля допуска базирующего отверстия $T_i - T_{\Delta m}^i$. Точность обработки каждого отверстия характеризуется несколькими замыкающими звеньями размерных цепей. Для отверстия T_n это размеры L_n в направлениях OX , OY . Для отверстия T_{n+1} это размеры $A_{n(n+1)}$, $L_{(n+1)}$. Для отверстия T_{n+2} это размеры $A_{n(n+2)}$, $L_{(n+2)}$, $A_{(n+1)(n+2)}$. Точность обработки отверстия T_m определяется точностью звеньев следующих

цепей, в направлении OX : $B_{n(n+1)}$, $A_{(n+1)m}$, L_m , $L_{(n+1)}$, в направлении OY : $B_{n(n+2)}$, $A_{(n+2)m}$, L_m , $L_{(n+2)}$. Следует рассматривать вариантность размерных цепей, образуемых диагональными размерами по осям OX , OY : $A_{n(n+2)}$, $A_{(n+2)m}$, $A_{(nm)}$; $A_{n(n+1)}$, $A_{(n+1)m}$, $A_{(nm)}$ (рис. 4).

Рассматривая операционные размерные цепи обработки отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ последовательно, можно определить в расчетах номинальные значения неизвестных замыкающих звеньев. Отверстие T_m является замыкающим

в расчетах точности. Это позволяет, используя результаты расчетов определить вариант обработки отверстия T_m (рис. 3), обеспечивающий наибольшую точность его позиционирования относительно соседних отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}$ грани носителя.

При последовательном расчете точности замыкающих звеньев отверстия $T_{n+1} - A_{n(n+1)}, L_{(n+1)}$, отверстия $T_{n+2} - A_{n(n+2)}, L_{(n+2)}$, отверстия $T_m - A_{(n+2)m}, A_{(n+1)m}, A_{(nm)}, L_m$, образующих расчетные цепи: 1) $T_n, T_{n+1} \rightarrow T_m$; 2) $T_n, T_{n+2} \rightarrow T_m$ расчет замыкающих звеньев расчетных цепей осуществляется в последовательности [3]:

1. Определяется номинальное значение замыкающего звена:

$$A_{(k)p} = \sum_{i=1}^n \xi_{(i)} A_i, \quad (1)$$

где $A_{(k)p}$ – расчетный номинал замыкающего звена A_k , A_i – номинал звена A_i расчетной цепи, $\xi_{(i)}$ – передаточное номинала i -го звена расчетной цепи по отношению к номиналу замыкающего звена k , n – число звеньев цепи.

2. Определяют предельные значения замыкающего звена:

$$A_{k(\min)p} = A_{(k)p} - \Delta_k; A_{k(\max)p} = A_{(k)p} + \Delta_k, \quad (2)$$

где $A_{k(\min)p}$ – минимальное расчетное значение замыкающего звена A_k , $A_{k(\max)p}$ – максимальное расчетное значение замыкающего звена A_k , Δ_k – расчетное отклонение замыкающего звена A_k ,

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^n \xi_{(i)} \Delta_i, \quad (3)$$

Δ_i – отклонение звена A_i расчетной цепи.

3. Определяют верхнее V_B и нижнее значение V_H запаса (дефицит) по точности относительно расчетных предельных значений замыкающего звена и его допустимых значений:

$$V_H = A_{k(\min)p} - A_{k(\min)}; V_B = A_{k(\max)p} - A_{k(\max)}. \quad (4)$$

где $A_{k(\min)}$ – минимальное заданное значение замыкающего звена A_k , $A_{k(\max)}$ – максимальное заданное значение замыкающего звена A_k .

4. Рассчитывают смещение (коррекцию) расчетного номинального значения замыкающего звена $A_{(k)p}$ при заданном значении звена $A_{(k)}$:

$$e_k = A_{(k)p} - A_{(k)}. \quad (5)$$

Полученное значение смещения e_k позволяет определить точность замыкающего звена расчетной цепи, по его абсолютному значению. В случае выполнения неравенства: $e_k \neq 0$ определяется величина коррекции расчетного номинального значения замыкающего звена. Используя выражения (4), осуществляют перерасчет предельных значений замыкающего звена. При этом необходимым условием обеспечения заданной точности обработки является выполнение равенства: $e_k = 0$.

По минимальным значениям расчетных параметров $e_k \rightarrow \min, V_B \rightarrow \min, V_H \rightarrow \min$ в процессе обработки определяется направление обхода операционных размерных цепей обработки отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$, а именно: 1) $T_n, T_{n+1} \rightarrow T_m$; 2) $T_n, T_{n+2} \rightarrow T_m$.

Для совмещения во времени процессов изготовления базирующих отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$, предложена алгоритмическая схема обеспечения точности базирования носителя при изготовлении базирующих отверстий $T_n, T_{n+1}, T_{n+2}, T_m$ (рис. 4).

Обработка отверстия T_n . По фактическим отклонениям параметров точности обработки от теоретически заданных осуществляется обработка отверстия T_{n+1} . По фактическим отклонениям параметров точности обработки от теоретически заданных осуществляется обработка отверстия T_{n+2} . По фактическим отклонениям параметров точности обработки от теоретически заданных для отверстий T_{n+1}, T_{n+2} осуществляется обработка отверстия T_m .

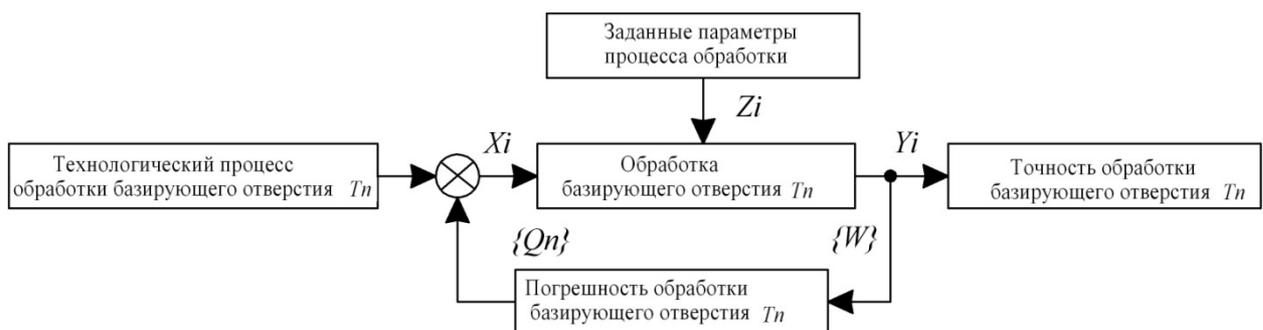


Рис. 4. Схема расчета размерных цепей базирующих отверстий

Согласно схеме на рис. 4, обработка каждого отверстия включает этапы расчета параметров обработки Z_i . Так, для отверстия T_n параметры Z_i позволяют провести технологический процесс обработки X_i с минимальной погрешностью $\{Q_n\}$. Выходные параметры Y_i позволяют корректировать обработку отверстия путем смещения оси режущего инструмента (например, с помощью системы управления станком). Значения фактических отклонений параметров точности обработки Y_i отверстия T_n используются на последующих этапах обработки базирующих отверстий T_{n+1} , T_{n+2} и замыкающего T_m . На этапе обработки отверстия T_{n+2} используются фактические отклонения параметров точности обработки Y_i отверстия T_{n+1} . Этап обработки отверстия T_m отличается наличием потоков информации о состоянии параметров точности изготовления отверстий T_n , T_{n+1} , T_{n+2} .

В результате анализа размерных цепей системы координированных отверстий сформулированы исходные данные и алгоритмическая схема обработки базирующих отверстий носителя.

Решение вопросов обеспечения точности обработки базирующих отверстий позволит повысить точность многосторонней обработки деталей в RMS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Царев, А. М. Перекомпоуемые производственные системы реконфигурируемого производства. Обеспечение жесткости автоматически сменных узлов призматической формы : монография / А. М. Царев, Д. Г. Левашкин. – М. : Компания Спутник+, 2007. – 303 с.
2. Левашкин, Д. Г. Моделирование кинематических структур на основе электромеханических устройств для обеспечения жесткости автоматически сменных узлов / Д. Г. Левашкин // Тр. XVIII Всерос. науч.-практ. конф. «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество». – Новокузнецк : СибГИУ. – 2014. – С. 431–436.
3. Мальшев, В. И. Автоматизация гибридных и комбинированных технологий на основе модернизации станочного оборудования и выбора кинематических связей / В. И. Мальшев, Д. Г. Левашкин, А. С. Селиванов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2010. – № 3. – С. 70–74.
4. Зотов, А. В. Оценка износостойкости направляющих скольжения, подвергнутых плакированию / А. В. Зотов, О. И. Драчев // Металлообработка. – 2013. – № 3 (75). – С. 5–10.
5. Бойченко, О. В. Экспериментальное исследование процессов виброобработки / О. В. Бойченко, О. И. Драчев, Д. В. Гранченко // Сб. матер. Всерос. науч.-техн. конф. с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области машиностроения»: в 3 т. – Тольятти : ТГУ – 2009. – С. 134–135.
6. Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren, Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. International journal of manufacturing technology & management. Proquest ABI/INFORM, 2000, vol.1, pp.113.
7. Mustapha, N, Daoud, A-K., Wassy, I. S. Availability modeling and optimization of reconfigurable manufacturing systems. Journal of quality in maintenance engineering . Emerald Group Publishing Limited, 2003, vol. 9, no. 3. pp. 284–302.
8. Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. Journal of intelligent manufacturing. Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer. Academic Publishers B.V., 2000, vol. 11, no. 11, pp. 403–419.
9. Pérez, R., Dávila, O., Molina, A., Ramírez-Cadena M. Reconfigurable micro-machine tool design for desktop machining micro-factories. 7th IFAC conference on manufacturing modelling, management, and control, MIM 2013, 2013, pp. 1417–1422.
10. Sung-Yong, S., Tava, L. O., Derek, Y-H. An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems: Integrated manufacturing systems, 2001, vol. 12, no. 7, pp.500-511.
11. Koren, Y. Shpitalni, M. Design of reconfigurable manufacturing systems: Journal of manufacturing systems. Elsevier Science Publishing Company, 2011.
12. Patil, S. Van J., Vyatkin V., Pang C., Patil S. On composition of mechatronic components enabled by interoperability and portability provisions of IEC 61499: A case study. 2013 IEEE 18TH International conference on emerging technologies and factory automation, ETFA 2013. IEEE Industrial Electronics Society, University of Cagliari, 2013.
13. Abrishambaf R. Hashemipour M., Bal M. Structural modeling of industrial wireless sensor and actuator networks for reconfigurable mechatronic systems. The international journal of advanced manufacturing technology. Springer-Verlag London Ltd, 2013, vol.64, no. 5-8, pp.793–811.
14. Plitea, N. Lese, D., Pisla, D., Vaida, C. Structural design and kinematics of a new parallel reconfigurable robot. Robotics and computer-integrated manufacturing. Elsevier Science Publishing Company, Inc., 2013, vol.29, no. 1, pp. 219–235.
15. Balasubramanian, S., Brennan, R. W., Norrie, D. H. An architecture for metamorphic control of holonic manufacturing systems. Computers in industry// S. Balasubramanian. Elsevier Science Publishing Company, Inc., 2001, vol. 46, pp. 13–31.
16. Abdi, M. R. Labib A.W. Performance evaluation of reconfigurable manufacturing systems via holonic architecture and the analytic network process. International journal of production research. Taylor & Francis Group, 2011, vol. 49, no. 5, pp. 1319–1335.
17. Пат. 2258593. Многоступенчатое приспособление-спутник / А. М. Царев, Д. Г. Левашкин ; заявл. 10.09.2003; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 23. – 3 с.
18. Царев, А. М. Основные положения метода распределенного базирования и обеспечения точности базирования автоматически сменных узлов на рабочих позициях перекомпоуемых производственных систем / А. М. Царев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – № 2. – С. 61–72.
19. Левашкин, Д. Г. Моделирование обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы / Д. Г. Левашкин // Сб. матер. Всерос. науч.-техн. конф. с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области машиностроения»: в 3 т. – Тольятти : ТГУ. – 2009. – С. 219–225.
20. Матвеев, В. В. Размерный анализ технологических процессов : учебник / В. В. Матвеев. – М. : Машиностроение, 1982. – 264 с.
21. Левашкин, Д. Г. Размерный анализ процесса обработки базирующих отверстий автоматически сменных узлов призматической формы / Д. Г. Левашкин // Тр. II междунар. науч.-техн. конф. «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении» (Резниковские чтения). – Тольятти : ТГУ, 2008. – Т. 1. – С. 212–219.

УДК 621.9.01

П. С. Нестеренко, Ю. Л. Чигиринский, А. А. Бондарев,
Д. В. Крайнев, А. Р. Ингеманссон

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ 20ХН

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Создана математическая модель, описывающая закономерности формирования радиальной составляющей силы резания при точении стали 20ХН. Регрессионный анализ позволил выявить характер зависимости функции отклика и величину влияния на нее каждого из факторов.

Ключевые слова: математическая модель, точение, радиальная составляющая силы резания.

The mathematical model describing the laws of formation of a radial component of the cutting force at turning steel 3120 is created. The regressive analysis has allowed to reveal the character of dependence of function of the response and measure of influence of each of factors on it.

Keywords: mathematical model, turning, radial component of the cutting force.

Одним из наиболее прогрессивных методов повышения точности токарной обработки является применение систем адаптивного управления, эффективность функционирования которых зависит от достоверности заложенных в их основу математических моделей. Однако анализ существующих математических зависимостей показал, что построение на их основе математических моделей управления адаптивными системами не обеспечивает надежности выполняемого процесса резания. Так, например, при расчете по традиционным методикам [1], согласно [2], ошибка в величине радиальной составляющей силы резания достигает 217 %, что обусловлено, в том числе, отсутствием поправки при расчете на свойства инструментального материала. Данное обстоятельство обуславливает необходимость создания уточненных математических моделей описывающих закономерность формирования радиальной составляющей силы резания P_y при конкретных условиях обработки.

Построение математической модели выполнялось для чистового точения ($t = 0,5$ мм) конструкционной легированной стали 20ХН режущим инструментом со сменными многогранными твердосплавными режущими пластинами формы W по ISO 1832-1991 ($\alpha = 0^\circ$; $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $r = 0,8$ мм) на токарно-винторезном станке модели 1М63. Обработка производилась режущими пластинами из следующих материалов: ТН20, Т15К6, ВК6. Измерение величины P_y производилось динамометром ДКМ-2010.

Для построения математической модели была составлена матрица планирования в соответствии с мультипликативной моделью ПФЭ 3^3 . В качестве факторов, определяющих значение функции отклика (P_y), были выбраны: скорость

резания V (90, 135, 180 м/мин), теплопроводность инструментального материала λ (11, 27, 50 Вт/м·К), подача S (0,083; 0,166; 0,256 мм/об). Поскольку рассматриваемые факторы имеют различный масштаб, было выполнено нормирование исходных данных (табл. 1).

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента и результаты опытов

№ опыта	Фактические результаты опыта				Нормированные значения		
	$\Phi_1(U)$	$\Phi_2(S)$	$\Phi_3(\lambda)$	$R(P_y)$	Z_1	Z_2	Z_3
1	90	0,083	11	302	-1	-1	-1
2	90	0,083	27	326	-1	-1	0
...							
26	180	0,256	27	396	1	1	0
27	180	0,256	50	424	1	1	1

Первоначальная формальная оценка существования зависимости функции отклика от каждого из рассматриваемых факторов была получена на основании величин коэффициентов (1) парной корреляции.

$$r_i = \frac{\overline{\Phi_i \cdot R} - \overline{\Phi_i} \cdot \overline{R}}{n \cdot \sigma_{\Phi_i} \cdot \sigma_R}; \quad (1)$$

$$r_i = \frac{\overline{\Phi_i \cdot \Phi_j} - \overline{\Phi_i} \cdot \overline{\Phi_j}}{n \cdot \sigma_{\Phi_i} \cdot \sigma_{\Phi_j}}, \quad (2)$$

где n – количество значений случайных величин Φ_i и R ; $\overline{\Phi_i}$, \overline{R} , $\overline{\Phi_i \cdot R}$ – средние значения случайных величин Φ_i , R и их попарных произведений соответственно; σ_{Φ_i} , σ_R – стандартное отклонение значений Φ_i , R .

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов парной корреляции

Сравниваемые величины		Значение коэффициента парной корреляции	Существование линейной зависимости	Характер линейной зависимости
$\Phi_1(U)$	$R(P_Y)$	-0,5000	вероятно	убывающая
$\Phi_2(S)$	$R(P_Y)$	0,2756	маловероятно	возрастающая
$\Phi_3(\lambda)$	$R(P_Y)$	0,7858	весьма вероятно	возрастающая
$\Phi_1(U)$	$\Phi_2(S)$	0,0000	не существует	–
$\Phi_1(U)$	$\Phi_3(\lambda)$	0,0000	не существует	–
$\Phi_3(\lambda)$	$\Phi_2(S)$	0,0000	не существует	–

Аналогичным образом (2) в первом приближении, оценивалось существование взаимосвязи между факторами. На основании полученных значений коэффициентов (табл. 2), установлено, что выбранные переменные являются попарно независимыми и каждая из них оказывает влия-

ние на величину функции отклика.

Для линейризации исходных регрессионных моделей различных спецификаций и обеспечения выполнения комплекса условий [3, 4] Гаусса–Маркова было произведено нормирование [3], результаты которого представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Нормирование значений для построения линейной модели

№	X_0	Нормированные значения				Натуральные значения			
		факторы			функция	факторы			функция
		$X_1(I)$	$X_2(S)$	$X_3(\lambda)$	$Y(P_Y)$	$\Phi_1(I)$	$\Phi_2(S)$	$\Phi_3(\lambda)$	$R(P_Y)$
1	1	-0.846	-0.920	-0.951	-0.514	90	0,083	11	302
2	1	-0.846	-0.920	-0.242	-0.426	90	0,083	27	326
...									
26	1	0.692	0.753	-0.242	-0.168	180	0,256	27	396
27	1	0.692	0.753	0.778	-0.064	180	0,256	50	424

Таблица 4

Нормирование значений для построения степенной модели

№	X_0	Нормированные значения				Натуральные значения			
		факторы			функция	факторы			функция
		$X_1(I)$	$X_2(S)$	$X_3(\lambda)$	$Y(P_Y)$	$\Phi_1(I)$	$\Phi_2(S)$	$\Phi_3(\lambda)$	$R(P_Y)$
1	1	-0.764	-0.841	-0.877	-0.199	90	0,083	11	302
2	1	-0.764	-0.841	0.170	-0.092	90	0,083	27	326
...									
26	1	0.787	0.856	0.170	0.180	180	0,256	27	396
27	1	0.787	0.856	0.889	0.275	180	0,256	50	424

Таблица 5

Нормирование значений для построения показательной модели

№	X_0	Нормированные значения				Натуральные значения			
		факторы			функция	факторы			функция
		$X_1(I)$	$X_2(S)$	$X_3(\lambda)$	$Y(P_Y)$	$\Phi_1(I)$	$\Phi_2(S)$	$\Phi_3(\lambda)$	$R(P_Y)$
1	1	-0.846	-0.920	-0.951	-0.199	90	0,083	11	302
2	1	-0.846	-0.920	-0.242	-0.092	90	0,083	27	326
...									
26	1	0.692	0.753	-0.242	0.180	180	0,256	27	396
27	1	0.692	0.753	0.778	0.275	180	0,256	50	424

Дальнейшее построение регрессионной зависимости было произведено в соответствии с методикой, изложенной в [3]. В табл. 6 представлены результаты определения значений коэффициентов регрессии и их статистической

значимости, согласно которым при установленном для каждого вида регрессионной модели уровне значимости все анализируемые факторы являются статистически значимыми, а модели – адекватными.

Таблица 6

Сравнение исходных моделей различных спецификаций

Параметр	Спецификация модели		
	линейная	степенная	показательная
Оценка влияния факторов			
Случайные факторы	-0.23	0.06	0.06
Скорость резания V , м/мин	-0.27	-0.31	-0.34
Подача S , мм/об	0.50	0.48	0.46
Коэффициент теплопроводности инструментального материала λ , Вт/мК	0.21	0.15	0.13
Достоверность адекватной модели, %	99.8	99.9	99.9
Критерий Стьюдента	0.003	0.001	0.001
Оценка погрешности			
Табличное значение F -критерия	3.224	3.532	3.532
Расчетное значение f -критерия ($f^* = f^{**}$)	3.242	4.000	3.797
Средняя относительная погрешность, %	8.31	6.02	5.43

Степень влияния случайных факторов у степенной и показательной моделей равна по абсолютной величине 0,06, что говорит о незначительности их влияния и о надежности дальнейших прогнозов радиальной составляю-

щей силы резания при использовании данных моделей. У линейной модели влияние случайных факторов составляет по абсолютной величине 0,23, что существенно и сопоставимо со степенью влияния исследуемых факторов.

Таблица 7

Результаты расчета значений функции отклика

Комбинация режимов обработки	Исходные данные $R(P_x)$	Линейная модель		Степенная модель		Показательная модель	
		$R''(P_x)$	погрешность расчета, %	$R''(P_x)$	погрешность расчета, %	$R''(P_x)$	погрешность расчета, %
1	302	262	13.42	293	2.94	301	0.14
2	326	302	7.28	329	0.93	323	1.09
...							
26	396	416	5.10	416	4.95	384	3.16
27	424	475	11.99	450	6.11	422	0.42

Для оценки погрешности расчета радиальной составляющей силы резания по полученным регрессионным моделям были определены восстановленные величины функции отклика R'' для значений факторов, соответствующих данным табл. 3–5 и установлена статистическая погрешность математических аппаратов для каждой комбинации режимов резания (табл. 7). Так как относительная погрешность показав-

тельной модели ниже аналогичных параметров линейной и степенной модели, и степень влияния случайных факторов в ней минимальна, для дальнейших расчетов выбирается показательная модель. Для удобства использования модели и упрощения вычислений следует выразить ее в виде формулы (3).

$$R_y = 322,45 \cdot (-0,996)^V \cdot 24,05^S \cdot 1,004^\lambda. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что с увеличением скорости резания происходит уменьшение величины радиальной составляющей силы резания, а с увеличением подачи и теплопроводности инструмента величина радиальной составляющей силы резания возрастает, что согласуется с традиционными представлениями теории резания металлов.

Использование полученной уточненной математической модели формирования радиальной составляющей силы резания P_y в качестве математического аппарата алгоритма управления адаптивными системами при указанных в статье условиях обработки позволяет повысить эффективность работы этих систем, и, как следствие, точность обработки.

УДК 621.787.4

В. А. Носенко, Р. А. Белухин, А. В. Фетисов, Л. К. Морозова

**ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ
ПРЕЦИЗИОННОГО ПРОФИЛЕШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА
С ЧПУ CHEVALIER МОДЕЛИ SMART-B1224 III**

Волжский политехнический институт (филиал ВолгГТУ)

E-mail: nosenko@volpi.ru

В статье представлен испытательный комплекс и методика исследования, позволяющие в автоматическом режиме получать и обрабатывать следующие показатели процесса шлифования: составляющие силы резания; радиальный износ шлифовального круга; съем металла; шероховатость обработанной поверхности; количество вершин зерен, оставивших след на единице длины профиля обработанной поверхности, морфологию обработанной поверхности и шлифовального круга.

Ключевые слова: методика исследования, шлифование, коэффициент шлифования, шероховатость, силы резания, количество вершин зерен, морфология поверхности, программное обеспечение.

The test complex and technique of research which allow to receive and process the following indicators of process of grinding in the automatic mode are presented in article: the cutting forces; radial wear of a grinding wheel; metal removal; a roughness of the processed surface; quantity of tops of the grains which have left a mark on unit of length of a profile of the processed surface, morphology of the processed surface and grinding wheel.

Keywords: research technique, grinding, grinding coefficient, roughness, cutting forces, quantity of tops of grains, surface morphology, software.

Создание и модернизация абразивного инструмента, смазочно-охлаждающих технологических сред невозможно без проведения объективных стендовых испытаний. Качество научных исследований различных аспектов процесса шлифования также во многом определяется надежностью определения эксплуатационных показателей, что в свою очередь зависит от применяемого оборудования, средств измерения и регламентирующих методик [1–4].

Основой нового испытательного комплекса является прецизионный профилешлифовальный

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд., исправл. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 944 с.

2. Плотников, А. Л. Проблемы обеспечения расчетной точности токарной обработки в САПР ТП и методы их решения / А. Л. Плотников, Э. И. Мустафаев, А. А. Шмаров // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 7). – С. 87–90.

3. Чигиринская, Н. В. Планирование эксперимента в задачах техники и экономики : учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 93 с.

4. Чигиринский, Ю. Л. Структура электронной таблицы для построения многофакторных регрессионных моделей / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская, Л. А. Качалова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 11). – С. 39–41.

станок с ЧПУ CHEVALIER модели Smart-B1224 III. Для управления станком система SMART III использует не сложный язык диалогового программирования, в котором оператору достаточно заполнить таблицы данных с указанием режимов и функций. Система автоматически рассчитывает управляющую программу и более сложную систему высокого уровня, основанную на программировании стандартными G и M кодами. Уникальный способ моделирования обработки позволяет контролировать процесс и выявить ошибки еще на стадии программирования.

Станок имеет широкий диапазон регулирования скоростей перемещения стола и вращения шлифовального круга. Современный привод обеспечивает высокую точность при высокой скорости обработки.

Испытательный комплекс позволяет исследовать следующие показатели процесса: составляющие силы резания P_y (радиальная составляющая), P_z (касательная составляющая), P_x (осевая составляющая); радиальный износ шлифовального круга; съем металла; шероховатость обработанной поверхности; рельеф и морфологию обработанной поверхности и шлифовального круга, количество вершин зерен, оставивших след на единице длины профиля обработанной поверхности.

Составляющие силы резания и крутящие моменты измеряли с использованием шестикомпонентного силоизмерительного комплекса Amti MC36-1000 ИР, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) L-CARD E14-140 и ноутбука со специальным программным обеспечением Powergraph. Система измерения обладает хорошими динамическими характеристиками и способностью воспринимать колебания с высокой частотой. Перевод электрического сигнала в ньютон осуществляется посредством тарифовочных коэффициентов.

Правка абразивного инструмента выполняется в автоматическом цикле. После правки необходимо привести в контакт рабочую поверхность шлифовального круга и обрабатываемую поверхность заготовки, выбрать на станке необходимую группу нажатием клавиши F6 и ввести координаты круга и параметры шлифования. Затем включается программа PowerGraph на ноутбуке и кнопкой старт – программа шлифования на станке.

В данной серии экспериментов в качестве обрабатываемого материала использовали образцы из быстрорежущей стали Р6М5. Размеры обрабатываемой поверхности: ширина – $14 \pm 0,02$ мм, длина – $150 \pm 0,1$ мм. Шлифование осуществляли кругом характеристики 25ASGF100I10V в зависимости от числа ходов ($t=0,005$ мм/дв. ход, припуск 0,25 мм). Данные трех параллельных измерений обработаны методами математической статистики, получены средние арифметические значения и дисперсия силы на каждом проходе, для вероятности 0,95 определены границы доверительных интервалов на среднее арифметическое.

По характеру изменения составляющих сил резания можно выделить три этапа: перво-

начальной приработки, характеризуемый интенсивным ростом силы резания; этап более плавного роста; этап стабильной работы. С увеличением v_s продолжительность этапа стабильной работы снижается. В частности на $v_s=20$ м/мин о выходе на этап стабильной работы можно говорить условно. Результаты свидетельствуют о значимости различия составляющих сил резания при шлифовании на различных v_s и за период шлифования. Относительная погрешность измерения δ в начале первого этапа достигает 20 %, затем снижается и во второй половине периода шлифования не превышает 5 %, что свидетельствует о хорошей точности измерения составляющих сил резания при наличии трех параллельных опытов.

С целью получения дополнительных показателей процесса, значения составляющих сил резания определены отдельно на прямом ходе (рис. 1, а), где осуществлялась подача на глубину, и обратном. Общие закономерности изменения составляющих сил остались прежними, но доверительные интервалы на средние значения заметно снизились. Погрешность составляющих сил резания для трех параллельных опытов во второй половине процесса не превышает 3 %.

Следует ожидать, что использование высокочувствительного измерительного комплекса позволит получить новые научные данные и при глубинном шлифовании, где вариационный размах составляющих сил резания за период шлифования еще более широк [1, 2]. Для реализации глубинного шлифования станок оснащен системой непрерывной правки абразивного инструмента алмазным роликом и компенсацией износа, скорость подачи стола станка изменяется практически от нуля до 20 м/мин.

Взаимное изменение составляющих сил резания характеризует их отношение P_z/P_y . В теории трения данное отношение называется коэффициентом трения и характеризует силу, препятствующую относительному перемещению трущихся поверхностей. При резании добавляется работа стружкообразования. Для шлифования доля работы трения в общей работе резания весьма значительна и может достигать 95 % [7], что имеет большое значение при шлифовании адгезионно активных металлов [8, 9].

На прямом ходе стола с увеличением v_s отношение P_{z1}/P_{y1} возрастает, что свидетельствует о более интенсивном росте касательной составляющей силы резания (рис. 2, б). За период шлифования отношение P_{z1}/P_{y1} снижается. Та-

ким образом, при общей тенденции роста составляющих силы резания за период шлифования в большей степени увеличивается радиаль-

ная составляющая P_{y1} . Изменение отношение P_z/P_y можно рассматривать в качестве критерия стабильности процесса шлифования [10].

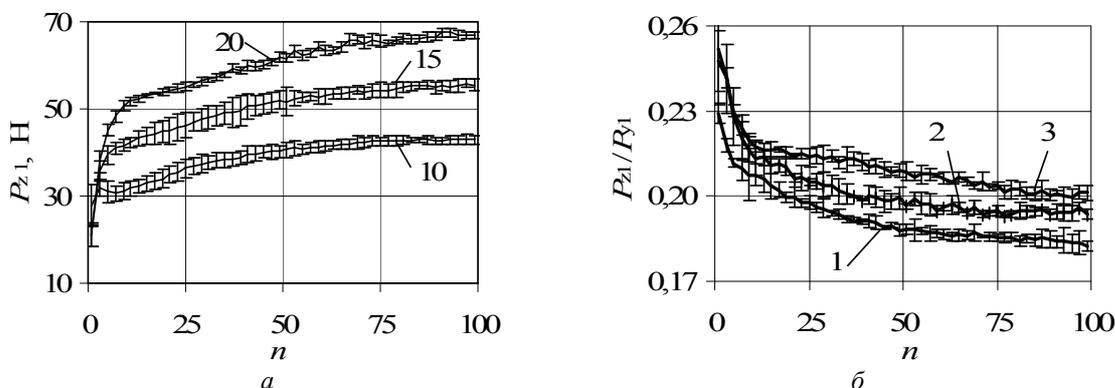


Рис. 1. Изменение составляющей силы резания на прямом ходе стола P_{y1} (а) и отношения P_{z1}/P_{y1} (б) от числа проходов n :
1 – 10 м/мин; 2 – 15 м/мин; 3 – 20 м/мин

Износ круга измеряли в восьми радиальных сечениях индикатором многооборотным тип 1 МИГ с погрешностью 2 мкм на 200 мкм. В каждом сечении делали шесть замеров соответственно на базовой и рабочей поверхностях круга. По результатам измерений осуществляли анализ закономерности изменения среднего радиального износа по высоте рабочей поверхности круга и радиальных сечениях, рассчитывали и сравнивали соответствующие дисперсии, в том числе, с учетом параллельных опытов, определяли общее среднее и дисперсию радиального износа. Конечными показателями статистического анализа являются среднее арифметическое, дисперсия и доверительный интервал по результатам всех параллельных опытов.

Шероховатость поверхности оценивали по 16 параметрам (ГОСТ 25142). Измерения вы-

полняли прибором «Сейтроник ПШ8-3» непосредственно на станке. Данные обрабатывали методами математической статистики. В связи с достаточно большим количеством измерений кроме среднего арифметического значения параметров шероховатости исследовали и закономерность изменения дисперсии.

Коэффициент шлифования K_g рассчитывали по износу круга и суммарному съему металла, которые определяли в различные промежутки времени и в конце обработки. С увеличением v_s в два раза от 10 до 20 м/мин коэффициент шлифования с учетом доверительного интервала на средние арифметические значения K_g изменяется незначимо. Параметр шероховатости обработанной поверхности Ra с увеличением v_s в диапазоне от 10 до 15 м/мин снижается почти на 30 % и далее остается на том же уровне (рис. 2, а).

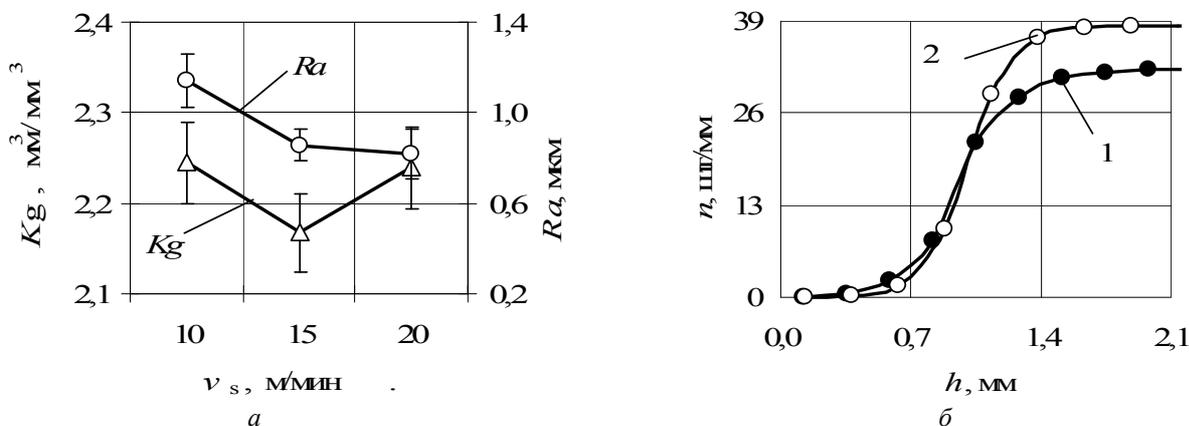


Рис. 2. Зависимость коэффициента шлифования K_g , среднего арифметического отклонения Ra от скорости подачи стола v_s (а) и распределение вершин зерен, оставивших след на шлифованной поверхности по высоте профиля h (б):
1 – $v_s=10$ мм/мин; 2 – $v_s=15$ мм/мин

Количество вершин зерен, оставивших след на единице длины профиля поперечного сечения обработанной поверхности, рассчитывали по ординатам профиля, полученным при измерении шероховатости. Местные впадины профиля рассматривали, как следы, оставленные вершинами зерен. При разработке способа определения количества зерен приняты следующие допущения: каждое зерно имеет только одну режущую вершину; значимое отличие ординат вершин профиля принято на уровне 3 % [11]. С увеличением скорости подачи стола несмотря на снижение коэффициента шлифования количество вершин зерен, оставивших след на профиле обработанной поверхности, возрастает (рис. 2, б), соответственно шероховатость обработанной поверхности снижается.

С помощью USB-микроскопа «MicroView» и специального программного обеспечения «MicroView» исследовали морфологию обработанной поверхности заготовки, поверхности шлифовального круга непосредственно на станке. USB-микроскоп MicroView, подключенный к компьютеру, превращает персональный компьютер в современный электронный прибор. Микроскоп работает как цифровая камера, объекты увеличиваются, фотографируются или снимаются на видео и картинки передаются по USB-порту в компьютер. Фотографии и видео изображения могут сохраняться и архивироваться. С увеличением скорости подачи стола интенсивность налипания металла на вершины зерен шлифовального круга существенно возрастает.

Выводы

1. В результате испытания шлифовальных кругов 1 400×20×127 характеристики 25ASGF100I10V на испытательном стенде, созданном на базе прецизионного профилишлифовального станка с ЧПУ CHEVALIER модели Smart – B1224 III с использованием шестикомпонентного силоизмерительного комплекса Amti MC36-1000 IP, профилометра «Сейтроник ПШ8-3», микрометров, USB-микроскопа «MicroView», программного обеспечения к каждому оборудованию, собственного программного обеспечения по обработке результатов измерения составляющих силы резания, шероховатости, износа круга и коэффициента шлифования, показана возможность получения следующих объективных эксплуатационных показателей: составляющие силы резания и их отношения, параметров шероховатости обработанной поверхности (R_a , R_{max} , R_z , R_p , R_v , S_m ,

S , R_p , R_v , R_q , λ_q , λ_a , l_o , D , Δq , Δa), коэффициента шлифования K_g , состояние рельефа обработанной поверхности, в том числе наличие трещин и прижогов, состояние рабочей поверхности шлифовального круга.

2. С целью повышения точности измерения, соответственно, значимости различия значений силы резания, необходимо отдельно анализировать закономерности изменения составляющих силы резания на прямом (P_{y1} , P_{z1}) и обратном (P_{y2} , P_{z2}) ходах стола станка. При таком подходе рассматриваются особенности закономерностей изменения составляющих силы за период шлифования и средние значения на различных этапах процесса. На этапе установившегося шлифования погрешность измерения средних значений составляющих силы резания не превышает 4–5 %, что свидетельствует о высокой чувствительности данного показателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаков, Д. В. Научные основы проектирования операций шлифования по результатам системных испытаний шлифовальных кругов : монография / Д. В. Исаков // Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2011. – 216 с.
2. Носенко, В. А. Технология шлифования : монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 425 с.
3. Кремень, З. И. Шлифование суперсплавами высокопластичных сплавов / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев // Санкт-Петербург, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (Санкт-Петербург), 2013. – 167 с.
4. Ардашев, Д. В. Информационно-методическая база режимо-инструментального оснащения операций абразивной обработки для современных условий мирового машиностроения / Д. В. Ардашев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6–4. – С. 813–817.
5. 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.
6. Носенко, В. А. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования / В. А. Носенко, А. В. Авилов, С. В. Носенко // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 7. – С. 10–19.
7. Богомолов, Н. И. О работе трения в абразивных процессах / Н. И. Богомолов // Тр. ВНИИАШ. – М.–Л. : Машиностроение, 1965. – № 1. – С. 72–79.
8. Носенко, В. А. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с периодической правкой круга / В. А. Носенко, С. В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2010. – № 10. – С. 66–71.
9. Носенко, С. В. Влияние правки абразивного инструмента на состояние рельефа обработанной поверхности

титанового сплава при встречном глубинном шлифовании / С. В. Носенко, В. А. Носенко, Л. Л. Кременецкий // Вестник машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 64–68.

10. Носенко, В. А. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга / В. А. Носенко, С. В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 74–79.

11. Носенко, В. А. Методика расчета распределения вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга по профилограммам шероховатости обработанной поверхности / В. А. Носенко, Е. В. Федотов, Л. К. Морозова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 45–47.

УДК 621.048.21

К. А. Репин

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ХОЛОДОМ, ВЛИЯЮЩЕЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ ТОЧНОСТЬ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Тольяттинский государственный университет

E-mail: doGhard@mail.ru

Рассматриваются особенности конструкции и принцип работы лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований по обработке холодом длинномерных мало жестких валов.

Ключевые слова: холод, мало жесткий вал, эксперимент.

Discusses the features of design and operation of the laboratory setup for experimental studies on cold treatment of long non-rigid shafts.

Keywords: cold, non-rigid shafts, experiment.

В настоящее время уровень развития машиностроения характеризуется постоянным повышением требований к качеству мало жестких деталей типа валов, одним из основных показателей которого является отсутствие коробления.

Коробление происходит в результате релаксации остаточных напряжений в материале детали возникающее еще при прокатке прутка, термической и механической обработке, т. е. вследствие технологической наследственности.

Кроме этого, значительную роль в формировании поля внутренних напряжений играет остаточный аустенит, который с течением времени может постепенно превращаться в бейнит, вызывая изменение размеров готовых изделий, т. е. приводя к короблению мало жестких деталей. Следовательно, для ответственных деталей, которыми являются мало жесткие валы желательнее более полно перевести аустенит в мартенсит.

Однако для некоторых материалов, из которых изготавливаются мало жесткие валы, данный процесс сопряжен с определенными трудностями. Это, прежде всего, касается материалов, у которых процесс конца мартенситных превращений происходит при температурах от +18 до –80 °С. Данной группе материалов для окончания мартенситного превращения требуется специальная обработка – обработка холодом.

В нашей стране основоположником данной технологии является А. П. Гуляев, который

теоретически обосновал и практически применил основные принципы обработки холодом. Однако для деталей типа мало жестких валов данный вид обработки практически не применялся, поэтому сведений о конкретных технологических режимах обработки холодом мало жестких валов явно недостаточно. Поэтому появилась необходимость определения технологических режимов обработки холодом мало жестких деталей.

Исследование технологических режимов обработки холодом целесообразнее проводить на специальных образцах. Заготовкой для изготовления образцов, служит пруток длиной – 500 мм и диаметром – 20 мм. Образцы изготавливаются из одной, партии прутка. Заготовки образцов, имеющие трещины, расслоения, поверхностные дефекты в виде инородных включений и механические повреждения к испытаниям не допускаются.

Образцы необходимо изготавливать на токарно-винторезном станке. На каждом образце наносятся риски через каждые 20 мм, глубиной 0,2–0,4 мм, и шириной 0,5–1 мм. Маркировка образцов производится с торца термостойкой краской после окончания обработки образца данного типа на токарном станке. Маркировка включает в себя две цифры, например 5/1. Первая цифра означает номер испытания, вторая номер образца данного типа. На немаркирован-

ном торце кернером наносятся риски через 90° в сечении и маркируются соответственно 0, 90, 180, 270. При транспортировке, измерении и т. д. необходимо предохранять образцы от ударов и воздействия температуры.

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

- расстояние между соседними рисками в четырех сечениях через каждые 90° штангенциркулем ШЦ – 1;

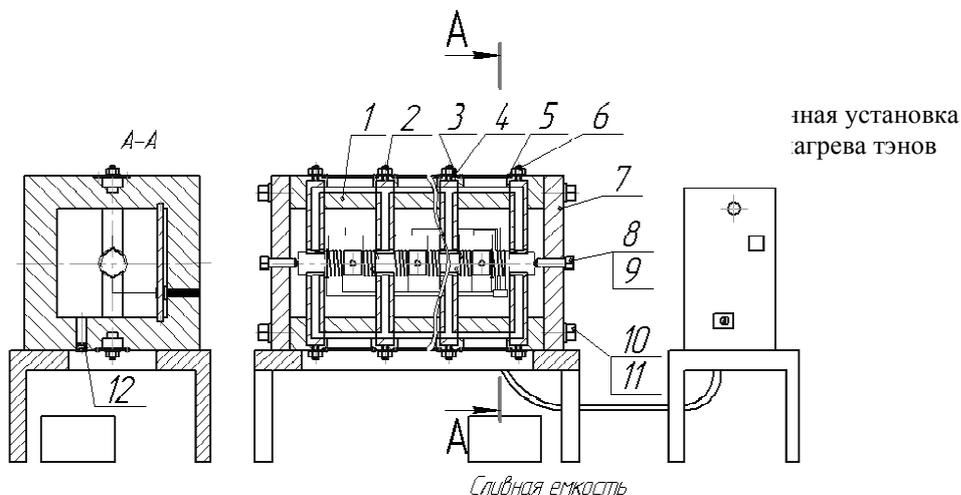
- диаметр каждого интервала, на которые разделяется образец при помощи рисок, микрометром МК – 50.

Полученные значения заносятся в протокол испытаний. При проведении испытаний для каждого из материалов варьируются следующие параметры: температура испытания 0°C –(-100°C); скорость деформации 0,5–40 мм/мин; величина деформации 1–5 %.

При проведении данного трехфакторного эксперимента воспользуемся сокращенной программой, что позволит сэкономить время и материальные ресурсы. Для проведения данных

испытаний была спроектирована специальная лабораторная установка.

Представленная на рисунке разработанная установка содержит квадратный корпус 1 с отверстиями в крышках для расположения образца и с отверстиями в самом корпусе для установки и закрепления при помощи шайб 4 и гаек 3, призм 2 и 6, необходимых для базирования образца. Также в корпусе имеются отверстия для подвода охлаждающего элемента. После загрузки охлаждающего элемента (в нашем случае это двуокись углерода твердая ГОСТ 12162–77), отверстия закрываются крышками 13 и крепятся винтами 5. С обеих сторон корпус при помощи болтов 10 и шайб 11 закрыт крышками 7. В центрах этих крышек имеются отверстия с резьбой, для центровочных болтов с шариками 8 и 9. Для фиксации нагревающего элемента (пластины 1) в корпусе установки имеются пазы. Корпус установлен на столе. В корпусе установки также имеется отверстие для слива испарившейся от охлаждающего элемента жидкости. После слива жидкости отверстие закрывается цилиндрической пробкой 12.



Экспериментальная установка для обработки холодом маложестких валов

Лабораторная установка также содержит коммутационную установку управления нагрева тэнов.

Работа лабораторной установки осуществляется в два этапа: нагрев и охлаждение. В представленной установке, используется физика самого процесса термообработки, когда осевая деформация заготовки осуществляется за счет подбора коэффициентов термического расширения изделия. В предлагаемой методике пластическая деформация вала происходит при нагревании с заданной скоростью, согласно техноло-

гии термообработки. Перед нагревом из корпуса 1 извлекаются все призмы 2 и 6. Образец, намотанный нагревательными проводами, вместе с пластиной, с одной стороны устанавливается на центровочный болт 8, а пластина в пазы корпуса. С другой стороны при помощи центровочного болта одновременно образец фиксируют, закрывают крышкой 7 и крепят болтами 10.

Нагрев начинается после включения коммутационной установки. Тепло от проводов передается непосредственно на вал. Нагрев осуществляется до температуры $T = 400^\circ\text{C}$. По дос-

тижению указанной температуры сигнал от термопары идет на контактор. Контактор замыкается, одновременно с ним отключается рубильник и коммутационная установка выключается. После нагрева происходит охлаждение до комнатной температуры.

После достижения комнатной температуры образец вместе с пластиной и проводами вынимается, в корпус установки фиксируются и закрепляются призмы. Образец уже без нагревательных элементов устанавливается на призмы, центруется центровочными болтами и закрывается крышкой.

Раздробленный охлаждающий элемент, в нашем случае это двуокись углерода твердая ГОСТ 12162–77, через специальные отверстия в корпусе установки и в призмах, подается непосредственно к поверхности вала, которая затем, испаряясь, создает низкую температуру. Таким образом, образец охлаждается.

При охлаждении наружная поверхность вала остывает быстрее, чем внутренняя и напряжения в наружных слоях, будут противоположны напряжениям в внутренних областях изделия. При полном охлаждении, знаки напряжений поменяются, но в наружных слоях напряжения будут одного знака, последнее исключает коробление.

Таким образом, имеющиеся аппаратные средства позволят провести исследования по выявлению оптимальных режимов обработки холодом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронов, Д. Ю. Новые технологии обработки мало жестких длинномерных деталей и описание устройства для их реализации / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев, К. А. Репин // XII всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Механика – XXI веку». – Братск, 14–16 мая 2013. – С. 135–139.
2. Воронов, Д. Ю. Преимущества термосиловой обработки при изготовлении мало жестких деталей типа «вал» над существующими технологиями / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев, К. А. Репин // Вестник НГИЭИ ; Нижегородский государственный инженерно-экономический институт (Княгинино). – ISSN: 2227-9407. – Вып. 12(55). – Одесса : КУПРИЕНКО, 2015. – С. 21–28.
3. Воронов, Д. Ю. Описание конструкции и принципа работы лабораторной установки для проведения экспериментальных исследований по термосиловой обработке длинномерных мало жестких деталей / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин, И. В. Шевелев // Сб. науч. тр. SWorld. Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2013». – Вып. 1. Т. 2. – Одесса : КУПРИЕНКО, 2013. – С. 5.
4. Воронов, Д. Ю. Разработка функциональной схемы системы автоматизированного управления ТСО многоступенчатых мало жестких валов / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин, И. В. Шевелев // Сб. науч. тр. SWorld. Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2013». – Вып. 1. Т. 2. – Одесса : КУПРИЕНКО, 2013. – С. 4.
5. Воронов, Д. Ю. Анализ существующих технологий изготовления стальных фасонных профилей высокой точности и направления их совершенствования / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин, И. В. Шевелев // Сб. науч. тр. SWorld. Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2013». – Вып. 1. Т. 2. – Одесса : КУПРИЕНКО, 2013. – С. 4.
6. Воронов, Д. Ю. Обзор существующих и перспективные тенденции развития технологий изготовления мало жестких валов / Д. Ю. Воронов, И. В. Шевелев, Н. Ю. Логинов // Сб. науч. тр. SWorld. Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития – 2012». – Вып. 3. Т. 8. – Одесса : КУПРИЕНКО, 2012. – С. 96.
7. Драчев, О. И. Новые технологии термосиловой обработки мало жестких валов / О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, Д. А. Расторгуев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – С. 32–35.
8. Расторгуев, Д. А. Патент № 2254383 от 19 декабря 2002. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов.
9. Куличкин, Н. В. Влияние поверхностного пластического деформирования на характеристики усталости круглых образцов подвергнутых термомеханической правке / Н. В. Куличкин, Ю. В. Чеботарев // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 2. – С. 61–63.
10. Левашкин, Д. Г. Методологические аспекты обеспечения точности и жесткости реконфигурируемых производственных систем с применением автоматически сменных узлов / Д. Г. Левашкин // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2014. – № 4 (30). – С. 30–36.
11. Rémi Husson, Cyrille Baudouin, Régis Bigot, Edoardo Sura. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. June 2014, Volume 72, Issue 9, pp 1455–1463.
12. Yong-Jin Choi, Sang-Kon Lee, In-Kyu Lee, Yong-Jae Cho, Jae-Wook Lee, Jung-Woo Cho, Myeong-Sik Jeong. Multi-stage forging process design of steering system output shaft for reduction of energy consumption. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. June 2015, Volume 16, Issue 7, pp 1455–1460.
13. A. N. Eraslan, W. Mack. A computational procedure for estimating residual stresses and secondary plastic flow limits in nonlinearly strain hardening rotating shafts. Forschung im Ingenieurwesen. March 2005, Volume 69, Issue 2, pp 65–75.
14. Tolga Akis, Ahmet N. Eraslan. Exact solution of rotating FGM shaft problem in the elastoplastic state of stress. Archive of Applied Mechanics. October 2007, Volume 77, Issue 10, pp 745–765.
15. G. Pantazopoulos, S. Papaefthymiou. Failure and Fracture Analysis of Austenitic Stainless Steel Marine Propeller Shaft. 30 September 2015, Journal of Failure Analysis and Prevention, pp 1–6.
16. A. Gruening, M. Lebsanft, B. Scholtes. Residual Stress State in Tools Used for Thermo-mechanical Metal Forming Processes. Engineering Applications of Residual Stress, Volume 8.

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

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

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

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

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

УДК 621.7

Ю. И. Сидякин, С. Ю. Абакумова, С. Н. Ольштынский, А. П. Семерня, Чан Ай Ва

**О СООТНОШЕНИИ МЕЖДУ СТЕПЕНЬЮ НАКЛЕПА
И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ КОНТАКТНОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССАХ ППД**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

В аналитической форме установлена взаимосвязь степени наклепа и интенсивности контактной упруго-пластической деформации материала в центре силового контакта тел произвольной формы и кривизны применительно к процессам поверхностного пластического деформирования деталей.

Ключевые слова: степень наклепа, интенсивность деформации, упругопластическая контактная деформация, обкатка, индентор.

The interrelation of work hardening stage and intensity of elastoplastic contact deformation of material at the center of power contact of any shape and curvature bodies in relation of the processes of superficial plastic deformation of details has been determined.

Keywords: work hardening stage, intensity deformation, elastoplastic contact deformation, running, indenter.

В практике применения упрочняющих технологий для широкой номенклатуры деталей машин, основанных на использовании методов поверхностного пластического деформирования (ППД), таких, например, как обкатка роликами или шариками, чеканка, дробенаклеп, центробежная ротационная обработка стальными шариками и пр., для оценки эффективности процесса обработки и контроля выбранных технологических режимов нередко используется такое понятие, как степень наклепа (деформации) ε_d материала [1–4]. Степень наклепа определяется по результатам однократного внедрения в плоскую поверхность материала детали сферического индентора произвольной статической нагрузкой F , при этом ее значение оценивается отношением диаметра d контура остаточной вмятины к диаметру D индентора, т. е.

$$\varepsilon_d = d/D. \quad (1)$$

Это же соотношение косвенно определяет условие подобия испытаний на твердость по Бринеллю НВ (ГОСТ 9012–59), когда необхо-

димо выдерживать постоянной степень нагружения F/D^2 , равную 30 кгс/мм² (294 МПа). Аналогично, при упругопластическом контакте тел произвольной формы и кривизны, когда контур остаточной вмятины близок к эллиптическому с полуосями a и b , под степенью наклепа следует понимать отношение [5]

$$\varepsilon_d = \frac{d_{np}}{D_{np}} = \frac{\sqrt{ab}}{R_{np}}, \quad (2)$$

где дополнительно $d_{np} = 2\sqrt{ab}$ – диаметр (приведенный) круга, равновеликого по площади проекции эллиптического отпечатка на плоскость, нормальную к направлению контактной нагрузки; $D_{np} = 2R_{np}$ – приведенные диаметр и радиус поверхностей контактирующих тел [5]. Выражение (2) используется не только при разработке методов измерения твердости НВ на деталях с криволинейными поверхностями [5], но и для контроля глубины наклепа z_s при оценке эффективности режимов ППД [1–3].

В последнее время при назначении режимов ППД деталей, преимущественно валов, в качестве критерия достижения максимального уровня усталостной прочности наиболее часто используется интенсивность упругопластической контактной деформации ε_i , которая в оптимальном варианте на поверхности валов ($\varepsilon_{i,0}$) должна быть близкой по значению к предельной равномерной деформации ε_p их материалов [5–7]. Величина $\varepsilon_{i,0}$ также рассчитывается по параметрам единичного отпечатка, образованного на поверхности вала рабочим инструментом (шариком или роликом) при равенстве в обоих случаях контактных нагрузок, по уравнению

$$\varepsilon_{i,0} = \varepsilon_{i(0)} = k_{\beta(0)} c h / z_s = -k_{\beta(0)} \varepsilon_{z,0}, \quad (3)$$

в котором h – глубина остаточного отпечатка, образованного инструментом на поверхности вала нагрузкой F ; z_s – толщина пластически деформированного слоя (глубина наклепа); $\varepsilon_{z,0} = \varepsilon_{z(0)}$ – радиальная линейная деформации в центре контакта на оси z ; $k_{\beta(0)}$ – коэффициент, зависящий от соотношений между линейными компонентами интенсивности деформации $\varepsilon_{x(0)}$, $\varepsilon_{i(0)}$ и $\varepsilon_{z(0)}$ в этой же точке. Эти соотношения установлены в работе [8] на основе физико-математической («сферической») модели упругопластического контакта тел, ограниченных поверхностями произвольной формы и кривизны. Данная модель дает возможность использовать математический аппарат решения осесимметричной контактной задачи (внедрение упругого сферического индентора в плоскую поверхность упругопластического контртела) и распространить его на общий случай контактного взаимодействия твердых тел, где, как известно, контур остаточной вмятины отличается от кругового, и поэтому деформация на линии действия контактной нагрузки не является осесимметричной. «Сферическая» модель хорошо зарекомендовала себя при создании аналитического метода расчетного прогнозирования остаточных сжимающих напряжений в валах, подвергнутых ППД роликами [7]. Все остальные параметры, входящие в зависимость (3), определяются по методике, изложенной в работе [5].

Для установления взаимосвязи между ε_d и $\varepsilon_{i,0}$, что, несомненно, важно и в практическом, и в методическом плане, в частности, при сравнительном анализе эффективности приме-

нения тех или иных режимов ППД, реализуемых в условиях динамического взаимодействия тел (чеканка, дробенаклеп, центробежная ротационная обработка и пр.), воспользуемся теоретическими положениями работы [5] и представим выражение (2) при

$$d_{np} = 2\sqrt{2R_{np} h (1 + \alpha_y/2h)}$$

в следующем виде

$$\varepsilon_d = \sqrt{\frac{2h}{R_{np}} \left(1 + \frac{\alpha_y}{2h}\right)}, \quad (4)$$

где дополнительно α_y – упругая составляющая полного сближения тел в центре контакта под нагрузкой.

Величина отношения $\alpha_y/2h$ определяется следующим образом. Поскольку при круговом контуре пятна контакта, согласно [5]

$$d = \frac{3\pi}{2} (k_1 + k_2) \frac{F}{\alpha_y}, \quad (5)$$

а нагрузка F на индентор, обеспечивающая получение необходимых глубин h остаточных вмятин, выражением

$$F = 2\pi \text{НД} R_{np} h + F_0 \approx 2\pi \text{НД} R_{np} h, \quad (6)$$

то при $d_{np} = d$ с учетом выражений (1) и (2) находим

$$\frac{\alpha_y}{2h} = \frac{3\pi^2}{4} (k_1 + k_2) \frac{\text{НД}}{\varepsilon_d}. \quad (7)$$

В этих зависимостях $k_{1,2} = (1 - \mu_{1,2}^2)/\pi E_{1,2}$ – упругие характеристики материалов контактирующих тел (μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона, E_1 и E_2 – модули упругости), НД (в МПа) – контактный модуль упрочнения материала (ГОСТ 18835–73), подвергнутого ППД.

Для определения величины отношения h/R_{np} , входящего в формулу (4), представим выражение (3) с учетом того, что согласно [5, 6]

$$c = \ln(\varepsilon_{i,0}/\Delta\varepsilon) = \ln(500\varepsilon_{i,0})$$

при стандартном допуске на остаточную деформацию $\Delta\varepsilon = 0,002$, который определяет границу распространения пластически деформированной области под отпечатком, т. е. глубину наклепа z_s , в следующем виде

$$\frac{\varepsilon_{i,0}}{\ln(500\varepsilon_{i,0})} = k_{\beta(0)} \frac{h}{z_s}. \quad (8)$$

Приближенное, но достаточно точное, значение z_s можно определить по известной зависимости [5]

$$z_s = \chi \sqrt{\frac{F}{2\sigma_T} - 1,42ab} \approx \chi \sqrt{\frac{F}{2\sigma_T} \left(1 - \frac{\sigma_T}{\text{НД}}\right)}, \quad (9)$$

где дополнительно σ_T – предел текучести материала, χ – коэффициент, учитывающий влияние формы контура пятна контакта на глубину наклепа: $\chi = 1 - 0,5(1 - \beta)^4$ при $\beta = b/a \approx \sqrt{A/B}$; здесь A и B – соответственно меньшая и большая по значениям главные кривизны поверхностей контактирующих тел в исходном состоянии.

Совместное решение уравнений (8) и (9) с учетом (6) приводит к выражению

$$\frac{h}{R_{np}} = \pi \left(\frac{\text{НД}}{\sigma_T} - 1 \right) \left(\frac{\chi \varepsilon_{i,0}}{k_{\beta(0)} \ln(500\varepsilon_{i,0})} \right)^2; \quad (10)$$

далее, после подстановки соотношений (7) и (10) в зависимость (4) из последней получим искомое уравнение, связывающее в неявном виде ε_d и $\varepsilon_{i,0}$

$$\frac{\varepsilon_d^3}{\varepsilon_d + \frac{3\pi^2}{4}(k_1 + k_2)\text{НД}} = 2\pi \left(\frac{\text{НД}}{\sigma_T} - 1 \right) \left(\frac{\chi \varepsilon_{i,0}}{k_{\beta} \ln(500\varepsilon_{i,0})} \right)^2 \quad (11)$$

Данное неполное кубическое уравнение решается относительно ε_d или $\varepsilon_{i,0}$ методом последовательных приближений или с использованием подпрограммы *root(x)* программного комплекса «*Mathcad*». Один из вариантов такого решения для ряда значений НД при $\beta = b/a = 0,5$ приведен в виде графиков на рисунке. Расчеты, выполненные для сталей сред-

него уровня твердости (\approx НД3000), показывают, что различие между значениями ε_d и $\varepsilon_{i,0}$ существенно лишь в области малых пластических деформаций ($\varepsilon_d < 0,1$), где $\varepsilon_d/\varepsilon_{i,0} > 2,5$, а уже при $\varepsilon_d > 0,25$ оно практически исчезает.

Заметим, что уравнение (10), как было установлено ранее [5, 7], успешно применяется для контроля реализуемых в процессах ППД заданных значений интенсивности контактной упруго-пластической деформации $\varepsilon_{i,0}$ на поверхности деталей, в частности, валов, где при упрочняющей обработке необходимо обеспечить выполнение условия $\varepsilon_{i,0} \approx \varepsilon_p$, а при отделочно-упрочняющей, разумно сочетающей в себе эффективность упрочнения с получением высокого качества обработки поверхностей, достаточно поддерживать $\varepsilon_{i,0} \approx (0,7 \dots 0,9)\varepsilon_p$. Однако отметим, что в практическом отношении удобнее проводить оценку значений $\varepsilon_{i,0}$ по другому уравнению

$$\varepsilon_{i,0} = 6 \left(\frac{h k_{\beta(0)}^2 \sigma_T}{\chi^2 R_{np} (\text{НД} - \sigma_T)} \right)^{\frac{2}{3}},$$

полученному аппроксимацией выражения (10) для достаточно широкого интервала значений $0,025 \leq \varepsilon_{i,0} \leq 0,7$, при этом ошибка не превышает 6%, а ее максимум приходится, главным образом, на границы указанного интервала. В этом случае зависимость $\varepsilon_{i,0}(\varepsilon_d)$ можно представить в явном виде

$$\varepsilon_{i,0} \approx 3,8\varepsilon_d^2 \left(\left(\frac{\chi}{k_{\beta(0)}} \right)^2 \left(\frac{\text{НД}}{\sigma_T} - 1 \right) \left(\varepsilon_d + \frac{3\pi^2}{4}(k_1 + k_2)\text{НД} \right) \right)^{-\frac{2}{3}}. \quad (12)$$

Если в качестве материала упрочняемой детали используется сталь, для которой в большинстве случаев выполняется соотношение $\sigma_T \approx k \cdot \text{НД}$ (где k принимается равным 0,2 для углеродистых и 0,22 – для легированных сталей, $\mu = 0,3$ и $k_1 = k_2 = 0,145 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$ [5]), то для экспертной оценки $\varepsilon_{i,0}$ по значениям ε_d и наоборот можно положить (для кругового или близкого к нему по форме контура остаточной вмятины) $\chi = 1$ и $k_{\beta} = 1$. Тогда форму-

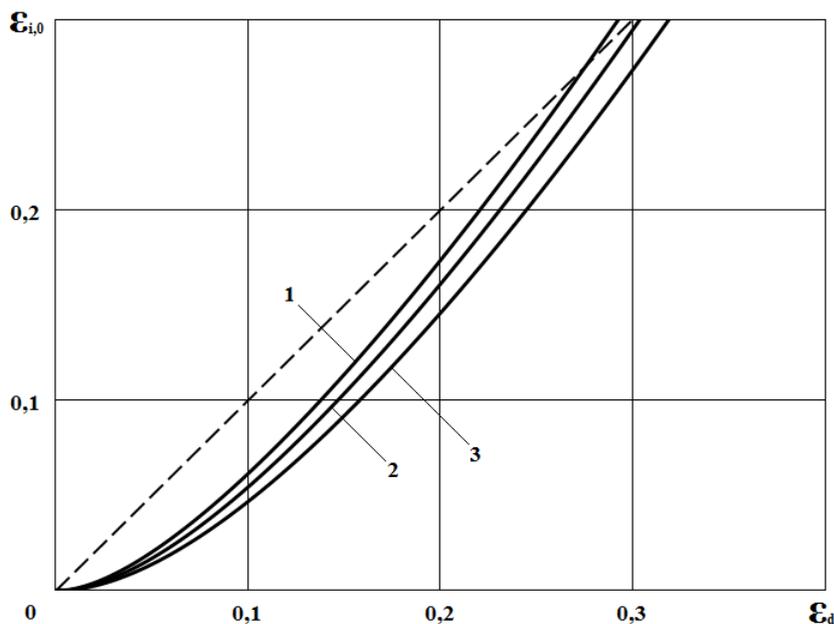
ла (12) существенно упростится и примет вид

$$\varepsilon_{i,0} \approx (1,50 \dots 1,63)\varepsilon_d^2 (\varepsilon_d + 2,15 \cdot 10^{-5} \text{НД})^{-\frac{2}{3}}. \quad (13)$$

В приближенных расчетах, наряду с этой зависимостью, можно успешно использовать следующее соотношение

$$\varepsilon_{i,0} \approx (1,6 \dots 1,7)\varepsilon_d^{1,5},$$

полученное для этих же сталей аппроксимацией уравнения (13) при НД3000.



Зависимость интенсивности упругопластической контактной деформации $\varepsilon_{i,0}$ от степени наклепа ε_d в отпечатке с эллиптическим контуром при $b/a = 0,5$: кривые 1, 2 и 3 – расчет по формуле (11) для углеродистых сталей твердостью НД1500, НД3000 и НД5000 соответственно

Отметим, что по существу полученные выражения, служащие для пересчета (в случае необходимости) $\varepsilon_{i,0}$ в ε_d и наоборот, устанавливают взаимосвязь между $\varepsilon_{i,0}$ и d , в то время как используемые ранее [5, 7] (например, уравнение (8)) описывают зависимость $\varepsilon_{i,0}(h)$. И это, в принципе, вполне очевидно, поскольку d и h связаны между собой достаточно надежными соотношениями (5) и (6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцев, И. В. Основы рационального выбора режимов упрочнения малых галтелей валов поверхностным пластическим деформированием. В кн.: Вопросы прочности крупных деталей машин / И. В. Кудрявцев // Тр. ЦНИИТМАШа, № 112. – М.: Машиностроение, 1976. – С. 190–200.
2. Черный, А. Г. Определение интенсивности пластической деформации и выбор геометрии ролика для упрочнения поверхностным наклепом стальных валов / А. Г. Черный // Науч. тр. КПИ, ч. II. – Курск, 1971. – С. 223–240.
3. Янков, Н. И. Упрочнение поверхностного слоя деталей машин до максимальной твердости. В кн.: Машиностроение и приборостроение / Н. И. Янков [и др.]. – Вып. IX. – Минск, 1977. – С. 71–74.
4. Бабичев, А. П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многократным виброударным инструментом / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко [и др.]. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Сидякин, Ю. И. Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками / Ю. И. Сидякин // Вестник машиностроения, 2001. – № 2. – С. 43–49.
7. Сидякин, Ю. И. Аналитическое исследование остаточных напряжений в сплошных валах после упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / Ю. И. Сидякин, А. В. Трунин, С. Ю. Абакумова // Вестник машиностроения, 2014. – № 6. – С. 62–70.
8. Сидякин, Ю. И. Сферическая модель исследования контактной упруго-пластической деформации / Ю. И. Сидякин, А. В. Трунин, А. Н. Шевцов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 12 (72) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 6). – С. 48–52.

УДК 621.9

*Ю. Л. Чигиринский, Б. К. Смирнов***УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
НА ЭТАПЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ
МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Обоснована возможность управления качеством изготовления деталей машин на этапе технологической подготовки механообрабатывающего производства. Предложен метод построения технологических операций для достижения заданного качества.

Ключевые слова: управление качеством, изготовление деталей машин, технологическая подготовка, индивидуальное маршрутное проектирование.

The possibility to control the manufacture of machine parts quality at the stage of technological preparation of machining manufacturing. A method of constructing technological operations, to achieve the desired quality.

Keywords: quality control, production of machine parts, technological preparation, individual route design.

Развитие промышленности России на современном этапе характеризуется ростом производственных мощностей, увеличением количества субъектов, участвующих в машиностроительной деятельности, и усложнением структуры производственной кооперации и сбыта. Следствием этого являются новые требования к структурной модернизации, обеспечивающей повышение эффективности принятия управленческих решений, что особенно важно в условиях выхода из глобального экономического кризиса и вступления России в ВТО. Развитие организационно-экономических и информационно-управляющих механизмов необходимо проводить с учетом этих требований и при этом базироваться на парадигме формирования интегрированной производственно-сбытовой системы, как механизма, направленного на организацию потребностей в продукции в промышленности России и производственно-хозяйственных связей. Решение этих задач требует, в свою очередь, пересмотра основных характеристик организационно-экономических процессов и систем производственной кооперации и сбыта в современной структуре производства, технологической кооперации и сбыта участников производственных и сбытовых процессов в условиях эксплуатации, как существующих машиностроительных предприятий, так и нового строительства.

Показатели качества изделий машиностроения, непосредственно формируемые в ходе производственного цикла, должны быть определяющими критериями при проектировании

технологии, в частности, маршрутного технологического процесса механической обработки.

Понятие «качество» применительно к изделиям машиностроения включает в себя «...совокупность свойств, обуславливающих их пригодность выполнить свое функциональное назначение в заданном диапазоне изменения условий эксплуатации» [1, 2, 3, 4] или «...совокупность объективно присущих продукции свойств и характеристик, уровень или вариант которых формируется при создании продукции с целью удовлетворения существующих потребностей» [5]. Для оценки качества машин применяют единичные и комплексные показатели. В частности, в машиностроении используют систему единичных показателей, которые подразделяют на эксплуатационные и производственно-технические [1]. В группе производственно-технических показателей выделяют показатели точности размеров, погрешностей формы и взаимного расположения поверхностей и качества поверхностей деталей машин формируемых на стадии технологической подготовки производства (ТПП) и непосредственно в производстве.

Под управлением качеством (англ. *quality control*) понимается деятельность оперативного характера, осуществляемая руководителями и персоналом предприятия, воздействующими на процесс создания продукции с целью обеспечения ее качества путем выполнения функций планирования и контроля качества, коммуникации (информации), разработки и внедрения мероприятий и принятия решений по качеству [6].

В данном определении нас интересует именно деятельность, осуществляемая на этапе создания продукции – конкретно, на стадии технологической подготовки производства, в процессе маршрутного технологического проектирования. Вне зависимости от условий ТПП – подготовка нового производства или

модернизация существующего, – в общей цепи мероприятий технологического проектирования (схема представлена на рисунке) выделяется этап формирования возможных вариантов маршрутных технологий, сравнение их технико-экономических показателей и выбор оптимального варианта [6].

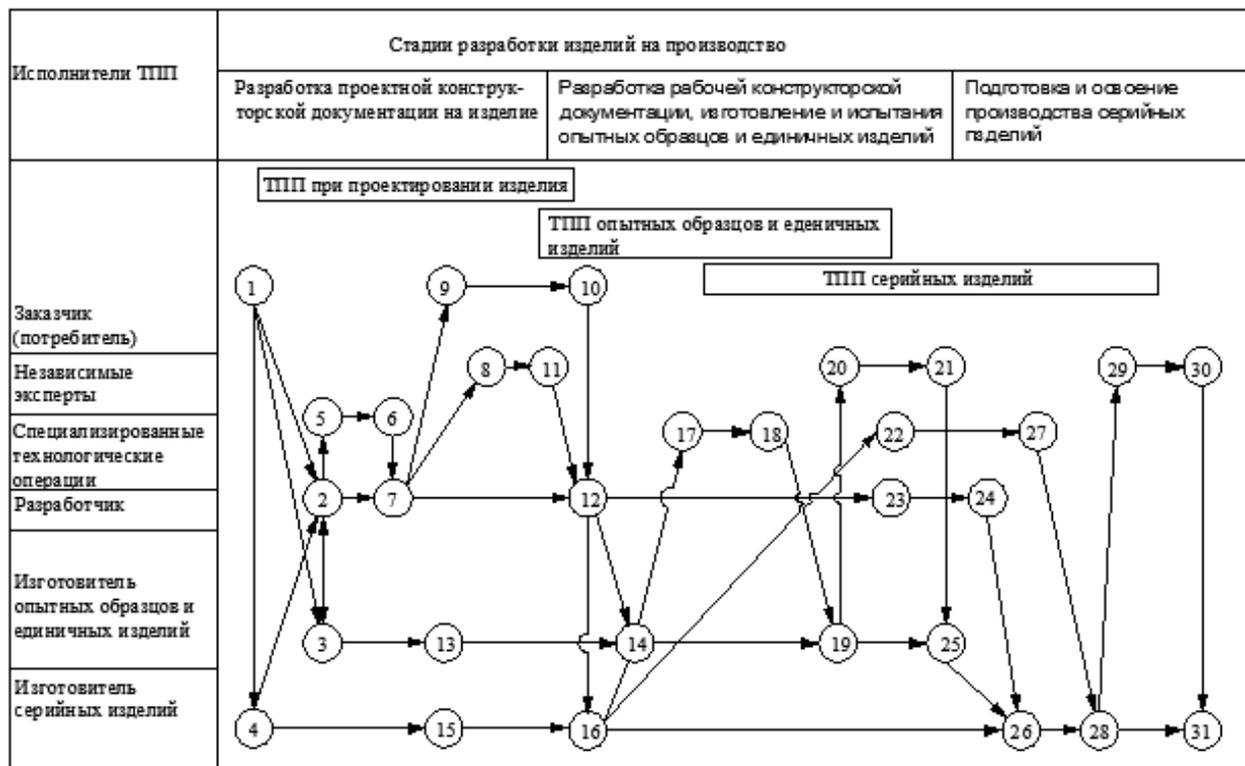


Схема организации технологической подготовки механообрабатывающего производства

Известно [1, 6], что на формирование показателей качества оказывают влияние не только финишные этапы обработки, но вся последовательность технологических операций. Однако, в настоящее время, вопросы, связанные с технологической последовательностью, не находят должного отражения в методиках технологического проектирования.

В качестве методов построения маршрутных технологий, обеспечивающих достижение заданного качества изделий, можно использовать подход к формализации индивидуального маршрутного проектирования [7], предусматривающий использование формального математического алгоритма проектирования последовательности механической обработки поверхности заданного качества. В последовательность обработки предлагается включать переходы, существенно повышающие качество и точность обрабатываемой поверхности. Говоря о «существенном повышении» мы подразуме-

ваем, во первых определение величин изменения значений технологических показателей точности и качества обработки и, во-вторых, статистическую оценку достоверности такого изменения. При этом в качестве обобщенного показателя точности обработки мы рассматриваем номер качества точности *IT* размеров, выполняемых на текущем технологическом переходе. Качество обработки оценивается по величине среднего арифметического отклонения высоты профиля обработанной поверхности *Ra*. Расчет выполняется методами математической статистики [6, 7].

В качестве информационной основы проектирования последовательности обработки используются, т. наз., вероятностные таблицы точности [6] содержащие значения собственно величин изменения технологических показателей качества и оценки достоверности изменения технологических допусков в ходе многостадийной механической обработки.

Математические модели и алгоритмы, построенные на базе вероятностных таблиц точности, позволяют рассматривать процесс элементарного маршрутного проектирования, как оптимизационную транспортную задачу, для формального решения которой применимы методы линейного программирования. В качестве целевых функций при построении элементарного технологического маршрута обработки поверхности заданного качества можно рассматривать, например, вероятностную оценку надежности плана обработки, либо традиционные критерии – такие как: производительность обработки, технологическая себестоимость, затраты на инструмент и др.

Учитывая, что формальный подход к решению задач технологического проектирования позволяет получить обоснованные прогнозы в отношении качества и точности обработки, можно говорить о возможности управления качеством изделий машиностроения еще на начальных этапах технологической подготовки производства.

УДК 621.9.015

Ю. Л. Чигиринский, Нго Куанг Чонг

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПРОФИЛЯ ФРЕЗЕРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости высоты микронеровностей фрезерованной поверхности от режимов обработки и материала режущей части инструмента. С использованием регрессионного анализа показано, что при оценке микрогеометрии обработанной поверхности необходимо учитывать температурные явления, интенсивность которых определяется сочетанием теплофизических свойств материалов контактной пары «инструмент – деталь».

Ключевые слова: шероховатость поверхности, микрогеометрия, фрезерование, регрессионный анализ, твердый сплав, износостойкое покрытие.

The results of experimental studies of the dependence of the height of microroughness of machined surface on modes of processing and the material of the cutting tool. It is shown, using regression analysis in the evaluation of the microgeometry of the machined surface it is necessary to take into account thermal phenomena, the intensity of which is determined by a combination of thermophysical properties of materials of contact pairs "tool – detail".

Keywords: The surface roughness, micro-geometry, milling, regression analysis, hard alloy, wear-resistant coating.

Одним из важнейших аспектов в исследовании качества поверхностного слоя деталей машин является установление взаимосвязи параметров шероховатости поверхности с условиями механической обработки. В результате анализа [3] исследований, в области технологии механической обработки, выделены основные

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А. Г. Технология машиностроения : учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов / А. Г. Суслов. – 2-е изд. и доп. – М. : Машиностроение, 2007. – 430 с.
2. ГОСТ 15467–79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Издательство стандартов, 1979.
3. Международные стандарты. «Управление качеством продукции». ИСО 9000-9004, ИСО 8402. – М. : Изд-во стандартов, 1988.
4. Межгосударственный стандарт ISO 9000:2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
5. Огвоздин, В. Ю. Управление качеством. Основы теории и практики / В. Ю. Огвоздин. – 6-е издание. – М. : Дело и Сервис, 2009. – 304 с.
6. Обеспечение точности и качества поверхностей при многопереходной механической обработке на основе совершенствования информационных и математических средств проектирующей подсистемы САПР ТП : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.02.08, 05.13.06 / Чигиринский Ю. Л. Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А. – Саратов, 2014.
7. Чигиринский, Ю. Л. Подход к формализации индивидуального маршрутного проектирования / Ю. Л. Чигиринский, С. А. Соловьева, Р. Е. Бехтер ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 581–584.

процесса стружкообразования; «деформационный» – формирующий элементы микропрофиля за счет упругих и пластических деформаций материала заготовки в зоне контакта с режущим клином; «микрорегометрический» – определяемый шероховатостью рабочих поверхностей инструмента; «адгезионный» – формирующий элементы микропрофиля в результате микровыврывов на обработанной поверхности.

Следует отметить, что исследования, посвященные вопросам формирования качества поверхности, традиционно рассматривают две основные группы показателей качества: микропрофиль поверхности и напряженное состояние поверхностного слоя. При этом разделяют на самостоятельные группы и технологические факторы, влияющие на формирование показателей качества. Как было отмечено выше [3], при изучении микрорегометрии обработанной поверхности рассматривают, преимущественно, геометрические и микрорегометрические параметры режущего клина, конструктивные особенности технологической системы и, в определенной мере, динамические факторы процесса резания. В работах известных исследователей – В. Ф. Безъязычного, В. С. Кушнера, А. Д. Макарова, С. С. Силина, Н. В. Талантова, – и их последователей, отмечено существенное влияние температурных процессов, сопровождающих резание, на напряженное состояние поверхностного слоя. При этом вопрос о вкладе тепловых явлений в формирование микрорегометрии обработанной поверхности остается малоизученным. Целью настоящей работы является обоснование необходимости детального изучения влияния

теплофизических параметров процесса механической обработки на формирование микропрофиля обработанной поверхности.

В качестве инструмента для определения существенности такого влияния используем методику регрессионного анализа. По экспериментальным данным [1, 7] выполнена оценка влияния технологических факторов – скорость резания, подача, глубина резания – на высотные параметры – среднее арифметическое отклонение высоты микронеровностей Ra. Общие условия эксперимента: обрабатываемый материал – титановый сплав (аналог ВТ6), инструмент – фреза концевая $\varnothing 20$ мм из однокристаллического твердого сплава (аналог ВК6). Диапазон режимов резания: скорость резания в диапазоне $V = 30 \dots 80$ м/мин., глубина $t = 0,3 \dots 0,9$ мм, подача $S_z = 0,030 \dots 0,250$ мм/зуб. Регрессионный анализ выполнен в соответствии с методикой [5] для факторного эксперимента 3^{6-3} . Помимо независимых факторов, названных выше, в регрессионных моделях учтено влияние взаимодействий – рассмотрены псевдофакторы, образованные попарными сочетаниями независимых объясняющих переменных: глубина резания – подача на зуб (площадь сечения срезаемого слоя); глубина резания – скорость; скорость – подача на зуб (подача на один оборот фрезы). Для обеспечения выполнения условий Гаусса–Маркова выполнено нормирование переменных величин. Известно [5], что значения коэффициентов регрессии, рассчитанные по нормированным переменным (приведены в таблице), позволяют оценить существенность влияния объясняющих переменных на поведение функции отклика.

**Результаты регрессионного анализа
(нормированное координатное пространство факторного эксперимента 3^{6-3})**

Параметр	Спецификация модели		
	линейная	степенная	показательная
Взаимно-независимые факторы			
Случайные факторы	-0,471	-0,149	-0,149
Глубина резания (t)	0,210	-0,110	0,192
Подача (S_z)	0,949	0,105	0,707
Скорость резания (V)	0,176	-0,154	0,139
Псевдофакторы, учитывающие взаимодействие независимых факторов			
Глубина резания – подача (сечение среза)	-0,687	0,105	-0,779
Глубина резания – скорость резания	-0,472	0,036	-0,533
Подача – скорость резания (S_0 , мм/об)	-0,340	-0,320	-0,338
Оценка погрешности и адекватности модели			
Стандартное отклонение	1,094	1,010	1,362
F-критерий	1,095	1,011	1,364
Адекватность модели, %	59,0	51,0	78,2
Средняя относительная погрешность, %	35,3	31,1	23,7

Сравнение параметров достоверности моделей трех основных спецификаций позволяет сделать заключение о том, что показательная (экспоненциальная) модель наилучшим образом отражает существенность влияния рассмотренных объясняющих переменных на величину функции отклика. Однако, учитывая, что:

1) влияние случайных факторов сравнимо с влиянием управляемых факторов (элементов режима резания);

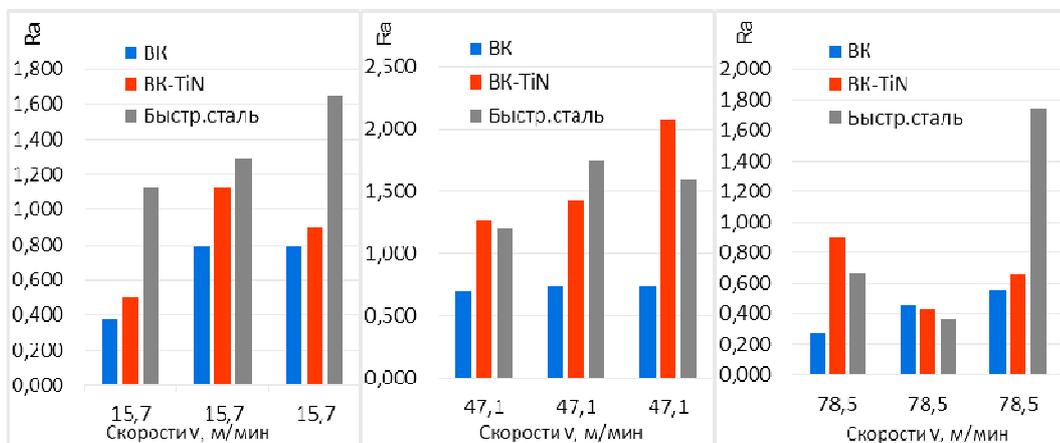
2) максимальная оценка адекватности не превышает 80 % – для показательной модели;

3) наименьшее значение относительной погрешности моделей недопустимо велико (~ 25 %); следует говорить только о возможной качественной оценке закономерностей процесса формирования микропрофиля обработанной поверхности.

Качественное сравнение коэффициентов регрессии объясняющих переменных позволяет выделить два, наиболее значимых, технологических фактора: скорость подачи инструмента (S_z) и площадь поперечного сечения срезаемого слоя ($S_z \cdot t$) – величины коэффициентов регрессии составляют, соответственно, 0,707 и 0,779. Влияние

величины подачи на высоту микронеровностей обработанной поверхности является общеизвестным фактом – здесь следует рассматривать «геометрический» [3] механизм формирования шероховатости. Существенное влияние поперечного сечения срезаемого слоя ($S_z \cdot t$), т. е., размеров теплового стока [4] в стружку, может свидетельствовать о наличии определенной взаимосвязи между тепловыми процессами, происходящими при резании и микрогеометрией обработанной поверхности. Однако, подобная гипотеза, сформулированная на основании только статистических расчетов, требует для подтверждения более глубоких исследований.

Экспериментальное сравнение микрогеометрии поверхности выполнено при обработке титанового сплава ВТ6 цельными концевыми фрезами $\varnothing 10$ мм из твердого сплава ВК6, твердого сплава ВК6 с износостойким покрытием TiN и быстрорежущей стали Р6М5. Глубина резания $t = 0,3 \dots 0,9$ мм, подача $S_z = 0,030 \dots 0,250$ мм/зуб. Установлено (зависимость представлена на рисунке), что среднее отклонение микронеровностей R_a ниже при использовании твердосплавного инструмента без покрытия.



Зависимость микрогеометрии обработанной поверхности от условий фрезерования [2]

Экспериментально установлено, что высота микронеровностей R_a поверхности, обработанной твердым сплавом ВК6, ниже, чем при обработке аналогичным инструментом с износостойким покрытием. Износостойкое покрытие обладает коэффициентом теплопроводности, значительно меньшим [2] по сравнению с теплопроводностью твердого сплава и, следовательно, существенно изменяет распределение тепловых потоков в зоне резания и на передней поверхности инструмента. Покрытие выполняет функцию

экранирующего теплозащитного слоя. Тепловые потоки перераспределяются между стружкой и обработанной поверхностью, что приводит к увеличению интенсивности теплового воздействия на обработанную поверхность и, как следствие, к снижению интенсивности деформационных явлений в поверхностном слое. Данный факт косвенно подтверждает гипотезу о существенном влиянии температурных процессов в зоне обработки на формирование микропрофиля обработанной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Даниленко, Б. Д. Ориентировочный выбор режима резания при обработке титановых сплавов концевыми фрезами / Б. Д. Даниленко // Известия вузов, серия «Машиностроение». – 2006, № 8. – с. 61–64.

2. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. В. Чихранов. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 255 с.

3. Сулов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Сулов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.

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

5. Чигиринская, Н. В. Планирование эксперимента в задачах техники и экономики : учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 93 с.

6. High pressure coolant effect on PVD coated inserts during end milling of Ti-6Al-4V. – RIT Scholar Works. – USA, 2012.

7. Syidatul Akma Sulaiman. Optimization of Surface Roughness in End Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V under the Influence of Magnetic Field from Permanent Magnets. / Syidatul Akma Sulaiman, A. K. M. Nurul Amin // Advanced Materials Research. – 2012, Vol. 576. – pp. 51-55.

8. Thanongsak Thepsonthi. Multi-objective process optimization for micro end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. – Springer-Verlag London Limited, March, 2012.

УДК 621.91.01

Ю. Л. Чигиринский, Фам Хоанг Чунг

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДУПЛЕКСНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

Приведены сведения об областях применения и особенностях механической обработки коррозионно-стойких сталей ферритно-аустенитного класса. Показано, что увеличение содержания легирующих элементов, по сравнению с аустенитными сталями, способствует повышению прочностных характеристик при одновременном улучшении коррозионной стойкости и резкому снижению обрабатываемости. Определены направления повышения эффективности механической обработки дуплексных сталей за счет определения условий обработки, соответствующих снижению интенсивности изнашивания инструмента.

Ключевые слова: дуплексная сталь, ферритно-аустенитная сталь, износостойкость инструмента, износостойкое покрытие, промежуточный диффузионный слой, карбидообразование.

Provides information about the applications and features of mechanical treatment of corrosion resistant steels ferritic-austenitic. It is shown that increasing the content of alloying elements, compared to austenitic steels, improves the strength characteristics while improving corrosion resistance and a dramatic reduction in machinability. The directions of increase of efficiency of machining of duplex steels by determining the processing conditions appropriate to reduce the intensity of tool wear.

Keywords: duplex steel, ferritic-austenitic steel, the tool life, wear-resistant coating, an intermediate diffusion layer, carbides formation.

Дуплексные коррозионностойкие стали (ДНС) получают добавлением никеля в ферритную хромистую нержавеющую сталь. При этом формируется структура/матрица со смешанной основой, содержащая и феррит и аустенит. Дуплексные стали характеризуются высокой прочностью на растяжение и очень высокой стойкостью к коррозии. Как правило, в дуплексных сталях (табл. 1) содержание хрома колеблется от 18 до 28 %, никеля – от 4 до 7 %. При этом доля феррита может составлять 25–80 %. Ферритная и аустенитная фазы при 20 °С обычно находятся в соотношении 50–50 % [6].

Традиционные аустенитные стали и ферритные нержавеющие стали достаточно просты в изготовлении и обработке. Однако у каждого

из названных классов материалов есть определенные технические недостатки:

– аустенитные стали характеризуются [1, 3, 4, 8] низкой прочностью (условный предел текучести в состоянии после аустенизации составляет $\sigma_{0,2} \approx 250$ МПа) и низким сопротивлением коррозионному растрескиванию;

– прочность ферритных сталей немного выше, чем у аустенитных и составляет $\sigma_{0,2} \approx 400$ МПа. Для этих сталей характерна плохая [6] свариваемость при больших толщинах и низкотемпературная хрупкость.

Кроме того, высокое содержание никеля в аустенитных сталях приводит к их удорожанию, что нежелательно для большинства конечных потребителей.

Химический состав ДНС [1, 4]

Марка стали	Химические элементы								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P
03X23H6	≤0,030	≤0,04	1,0–2,0	22,0–24,0	5,3–6,3	–	–	≤0,020	≤0,035
03X22H6M2					21,0–23,0	5,5–6,5			
08X22H6T (ЭП 53)	≤0,08	≤0,08	≤0,8	20,0–22,0	5,3–6,3	–	5,6–0,65		
12X21H5T (ЭИ811)	0,09–0,14				4,8–5,8		0,28–0,50		
08X21H6M2T (ЭП 54)	≤0,08			5,5–6,5	1,8–2,5	0,20. 0,40			
08X18Г8Н2Т (КО-3)				7,0–9,0	17,0– 19,0	1,8–2,8	–	0,20. 0,50	
03X24H6AM3 (ЗИ 130)	≤0,030	≤0,4	≤2,0	23,5 ..25,0	5,8 ..6,8	2,5 ..3,5	не регла- менти- руется	≤0,020	
DMV 18.5 (UNS S31500)		1,4–2,0	1,2–2,0	18,0 .. 19,0	4,25 ..5,25	2,5 ..3,0		≤0,030	
DMV 22.5 (UNS S31803)			≤2,0	21,0 ..23,0	4,50 ..6,50	2,5–3,5		≤0,020	
SAF 2304 (UNS S32304)		≤1,0	≤2,5	21,5–24,5	3,0 ..5,5	–		≤0,040	
SAF 2205 (UNS S31803)			≤2,0		4,5 ..6,5	3,0. 3,5		≤0,015	≤0,035
SAF 2507 (UNS S32750)		≤0,5	≤1,2	24,0–26,0	6,0–8,0	3,0. 5,0		≤0,010	≤0,030
DMV 25.7N (UNS S32760)		≤1,0	≤1,0			3,0–4,0			
SAF 2906 (UNS S32906)						28–30		5–7	1,8–2,5

Фазовый состав дуплексной стали, при котором относительное объемное содержание феррита и аустенита примерно одинаково, обеспечивает следующие преимущества [3]:

– высокая прочность [1, 3, 4, 8] – условный предел текучести может составлять $\sigma_{0,2} \approx 400 - 450$ МПа;

– хорошая свариваемость [6] при большой толщине заготовок – ниже, чем у аустенитных сталей, но намного выше, чем у ферритных;

– ударная вязкость 70...120 Дж/см², при температуре –50...–80 °С [1, 4];

– сопротивление коррозионному растрескиванию – традиционные аустенитные [4] стали особенно расположены к данному типу коррозии.

Наилучшей коррозионной стойкостью обладают однородные твердые растворы. Двух- трех- или многофазные сплавы сопротивляются коррозии хуже. Так, например, наличие свободных карбидов хрома по границам зерен аустенита снижает коррозионную стойкость не-

ржавеющих сталей и снижает сопротивление газовой коррозии сталей жаростойких. Сходное влияние оказывают свободные карбиды хрома и в нержавеющей сталях мартенситного класса. Выпадающие карбиды уносят с собой хром из твердого раствора, концентрация хрома в близлежащих участках падает, вследствие чего коррозионная стойкость понижается [4].

По сравнению с другими сталями (табл. 2) ДНС имеют расчетную прочность в два раза выше, чем у аустенитных и ферритных нержавеющей сталей; широкий диапазон значений коррозионной стойкости, позволяющий подобрать марку под конкретную задачу; ударную прочность до –80 °С, ограничивающую применение в криогенных средах; исключительную стойкость к коррозионному растрескиванию и хорошую свариваемость больших сечений.

Благодаря ряду таких преимуществ ДНС приобретают все большее значение во всех областях, например, в химической, пищевой, стро-

ительной, медицинской, целлюлозно-бумажной промышленности и в технологических процессах с использованием кислот и хлора. Часто эти стали используются в оборудовании для добычи нефти и газа в море. Тем не менее, доля ДНС на мировом рынке составляет 1–3 % от

общего объема сталей, применяемых в машиностроении из-за того, что процесс механической обработки представляет собой значительные трудности [3, 4]. Одним из ограничений при лезвийной обработке рассматриваемых сталей является износ инструмента.

Таблица 2

Механические свойства коррозионноустойчивых сталей [5]

Типы сталей	Химический состав, %		Механические свойства		
	Cr	Ni	условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (Мпа)	предел прочности при растяжении σ_B (Мпа)	ударная вязкость K_V (Дж/см ²)
Ферритная	11,0–18,0	0,0–0,5	250–400	350–500	10–60
Мартенситная	12,0–15,5	0,0–4,5	150–700	400–850	40–170
Аустенитная	16,5–18,5	4,0–25,0	150–250	450–700	60–90
Дуплексная	18,0–28,0	4,0–7,0	350–650	550–800	50–120

Относительная обрабатываемость в целом плохая ~ 30 %, из-за высокого предела текучести и повышенной прочности на растяжение. Повышение относительного объемного содержания феррита – более 60 %, – улучшает обрабатываемость [7]. При механообработке образуется прочная сливная стружка, которая может повредить вспомогательную режущую кромку. Для лезвийной обработки характерны большие усилия резания и высокие температуры на контактных поверхностях инструмента, что приводит к пластической деформации режущего клина и способствует интенсивному образованию лунки на передней поверхности.

Во избежание выкрашивания режущей кромки и появления заусенцев на обработанной поверхности предпочтительны инструменты с небольшим главным углом в плане.

Одновременно с заключением о сложности механической обработки [1] дуплексных сталей, следует отметить ограниченное количество [7, 8], нечеткость и недостаточную обоснованность рекомендаций в отношении выбора инструментальных материалов для лезвийной обработки ДНС. В частности, для черновой и получистовой обработки на умеренных скоростях резания – до 70 м/мин, – рекомендовано использовать мелкозернистые одно- (GC 2035, BK 100M) или трехкарбидные (TT8K6, GC 15, GC 2015) твердые сплавы с износостойкими покрытиями из оксида алюминия (Al_2O_3), нитрида (TiN) или карбонитрида титана (Ti(C, N)) и нитрида титана-алюминия ((Ti, Al)N).

Кроме традиционных – химическое осаждение (CVD) и осаждение из газовой фазы

(PVD) – способов нанесения износостойких покрытий, в качестве перспективных направлений повышения износостойкости твердосплавного инструмента можно назвать плазменную модификацию [5] поверхностного слоя режущих пластин. В то же время, при обработке аустенитных нержавеющей сталей, зафиксировано [2] образование, на передней поверхности инструмента, промежуточного слоя, состоящего преимущественно из сложных карбидов хрома и титана, и выполняющего функции износостойкого покрытия, сформированного естественным путем. Основное содержание гипотезы [2] заключается в том, что формирование промежуточного слоя связано с наличием, в составе обрабатываемого материала, свободных, не связанных углеродом стали, активных карбидообразующих элементов, в первую очередь, хрома.

Дуплексные стали, по сравнению с аустенитными, характеризуются повышенным содержанием хрома (табл. 2) и, одновременно, пониженным содержанием углерода (табл. 1). Как следствие, можно предположить более высокое, по сравнению с аустенитными сталями, содержание свободного, не связанного углеродом стали, хрома и повышенную склонность ДНС к образованию, при определенных условиях обработки, промежуточного карбидосодержащего слоя на передней поверхности инструмента.

Для обоснования данной гипотезы и раскрытия механизма формирования естественного износостойкого покрытия на передней поверхности режущего клина необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований обрабатываемости дуплексных сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дуплексные нержавеющие стали : [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://stroy-metall.ru/stati/dupleksnye-nerzhaveyushchie-stali>.
2. *Липатов, А. А.* Образование промежуточного слоя при обработке высоколегированных сталей / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский, Д. С. Ключиков // Научные труды SWorld. – 2015. – Вып. 4, том 3 «Технические науки». – С. 7–10.
3. Марки стали, свойства и мировые стандарты : [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Stainless-properties-and-global-standards.pdf> // Outokumpu Stainless AB, Avesta Research Centre (Исследовательский центр Авеста) Box 74, SE-774 22 Avesta, Sweden.
4. Нержавеющие и жаростойкие стали и сплавы : [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://pereosnastka.ru/articles/nerzhaveyushchie-i-zharostoikie-stali-i-splavy-ikh-termicheskaya-obrabotka>.
5. Повышение эффективности механической обработки деталей на основе применения инструмента с модифицированными рабочими поверхностями и оптимизации процесса резания / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, М. Б. Бровкова, Е. П. Зинина // Научные труды в машиностроении. – 2012, № 1. – С. 3–10.
6. Сеть профессиональных контактов специалистов сварки. Технология. Аустенитно-ферритные стали : [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://weldzone.info/technology/materials/49-carbonic/795-austenitno-ferritnye-stali>.
7. General turning : [Электронный ресурс] . – Режим доступа : <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/smallparts/catalogue/P133-143.pdf>.
8. Sandvik Coromant. Техническая информация. Обработываемые материалы : [Электронный ресурс] . – Режим доступа : http://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/know-ledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.52.011.56:519.17

В. Г. Барабанов, А. В. Глазков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CODESYS ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ СТЕНДОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИЗДЕЛИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Разработан алгоритм управления устройством для проведения испытаний изделий на герметичность. На основе данного алгоритма создано программное обеспечение для проектируемой микропроцессорной системы.
Ключевые слова: герметичность, изделие, система управления, алгоритм, CODESYS.

The algorithm of control the device for testing products on impermeability was designed. Software for the design microprocessor system was created on basis of this algorithm.

Keywords: impermeability, product, system control, algorithm, CODESYS.

Важной проблемой в ряде отраслей промышленности является повышение требований к качеству и надежности выпускаемой продукции. Это вызывает острую необходимость в совершенствовании существующих, создании и внедрении новых методов и средств контроля, в том числе контроля герметичности [1, 2].

Под герметичностью будем понимать свойство изделия или его элементов, исключающее проникновение через них газообразных или жидких веществ. Абсолютная герметичность изделий недостижима и неконтролируема. Поэтому герметичными принято считать изделия и конструкции, элементы которых содержат дефекты, не влияющие на сохранение технических характеристик герметизированного изделия в течение всего срока службы [3].

Ежегодно в стране испытывают на герметичность миллионы разнообразных изделий. Их можно классифицировать по назначению, рабочему давлению, которое обычно принимается в качестве контрольного давления при испытаниях изделия на герметичность, геометрическим размерам и рабочей среде, на которой работает изделие. От этих параметров и зависит выбор метода контроля герметичности [4].

Контроль герметичности газовой арматуры является трудоемким, длительным и сложным процессом. Поэтому создание автоматизированного устройства для проведения таких испытаний помогло бы справиться с данной задачей.

Существует большое количество различных методов проведения испытаний на герметичность. Они различаются по чувствительности, условиям проведения испытаний и другим па-

раметрам. Для газовой арматуры эффективным является манометрический метод. Его суть заключается в регистрации изменения либо величины испытательного давления контрольного или пробного вещества в объекте, либо остаточного давления в объекте после его откачки в результате наличия течей в нем в течение некоторого промежутка времени. Метод достаточно прост в использовании, и его легко можно автоматизировать [5].

Для испытания изделий на герметичность разработан стенд с расширенными технологическими возможностями и повышенными удобствами эксплуатации. Это обеспечивается за счет того, что стенд содержит ротор в виде поворотного стола с приводом его шагового перемещения, на котором установлены испытательные блоки, каждый из которых содержит элемент герметизации [6].

Недостатком указанного стенда является использование большого количества пневматических элементов и отсутствие управляющего устройства автоматизации, что снижает возможности быстрой переналадки оборудования.

Для решения этой проблемы предложено использовать микропроцессорную систему (МПС) на основе программно-логического комплекса (ПЛК). Это обеспечит высокую надежность и возможность быстрого обновления алгоритмов управления.

Используя схемы и описание управления данного стенда, а также опираясь на рекомендации по созданию автоматизированного оборудования, был создан алгоритм управления МПС в виде блок-схемы, которая изображена на рис. 1 [7, 8].

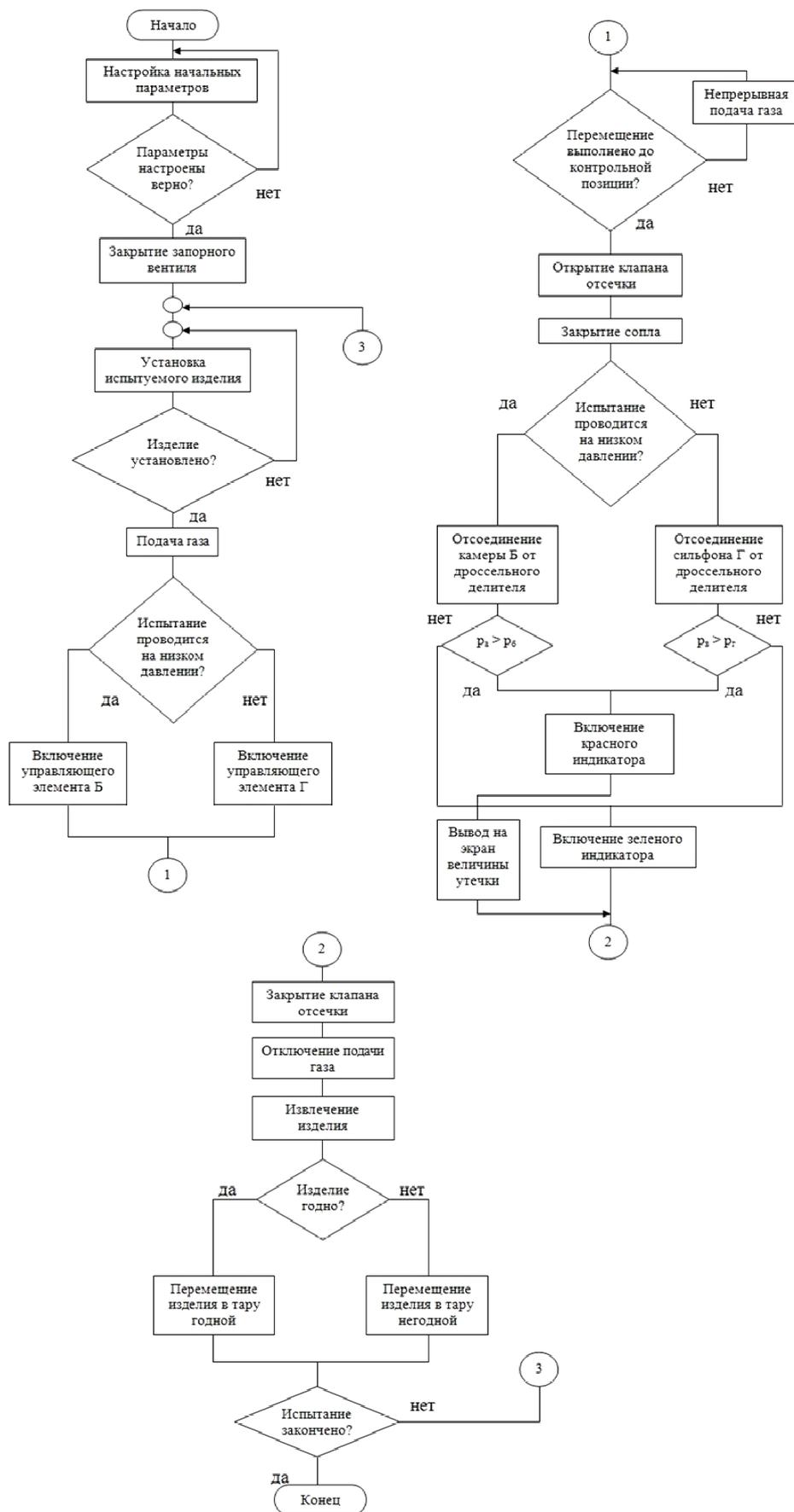


Рис. 1. Алгоритм управления МПС

Зная алгоритм управления, можно составить функциональную спецификацию МПС, которая представлена в таблице. В ней описаны

входные и выходные функции, а также устройства ввода и вывода информации для каждой функции.

Функция	Устройство ввода	Устройство вывода
Вход:		
Проверка наличия установки изделия	Датчик	–
Перемещение изделия до контрольной позиции	Датчик	–
Выход:		
Анализ давления в камере А	Датчик	–
Анализ давления в камере Б	Датчик	–
Анализ давления в сильфоне В	Датчик	–
Анализ давления в сильфоне Г	Датчик	–
Оповещение о наличии или отсутствии утечки в изделии	–	Световая индикация
Вывод на экран величины утечки	–	ЖК-дисплей

Таким образом, используя представленную таблицу, можно сделать вывод о том, что в состав разрабатываемой МПС в обязательном порядке должны входить следующие устройства, обеспечивающие взаимосвязь с внешним окружением: ЖК-дисплей, световую индикацию и датчики [9].

На основе полученных данных, был подобран ПЛК160 фирмы ОВЕН. Он обладает высо-

кой аппаратной надежностью, имеет необходимое количество аналоговых и цифровых входов и выходов, поэтому полностью удовлетворяет необходимым требованиям.

Программирование контроллера осуществляется в профессиональной, распространенной среде CoDeSys. Используя средства визуализации, разработанную программу можно представить так, как показано на рис. 2.

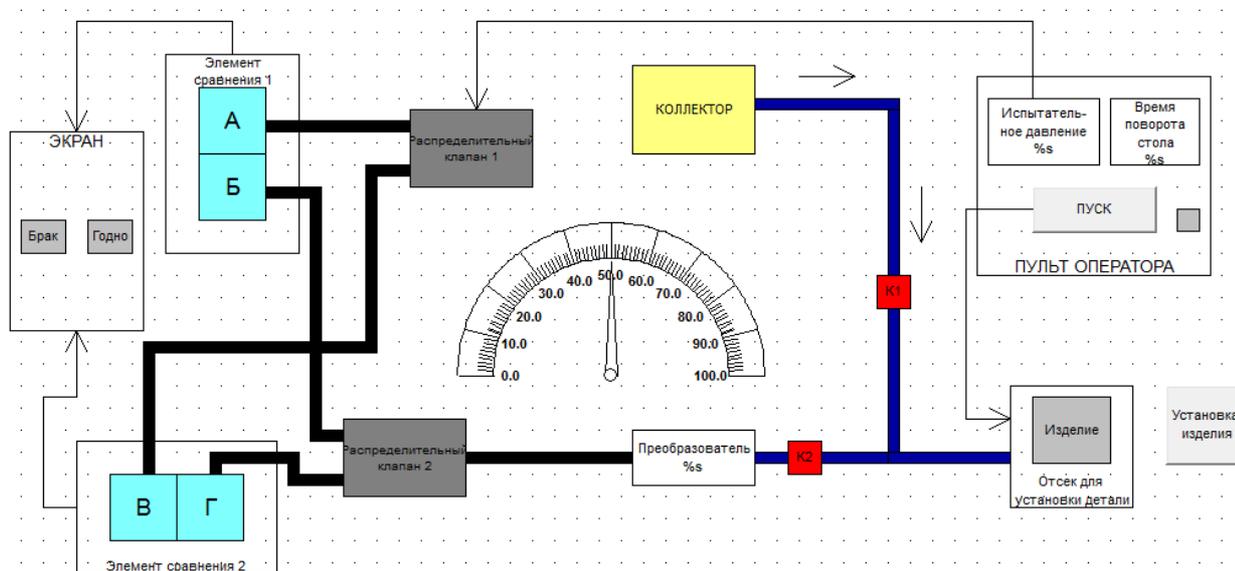


Рис. 2. Визуализация программы

Программа работает следующим образом. Перед началом работы на пульте оператора настраивается время поворота стола и величина испытательного давления, от которой зависит, какой из элементов сравнения будет использоваться: 1 – низкое давление, 2 – среднее или

высокое давление. Далее в отсек для установки детали помещается необходимое для проверки изделие. Если изделие не установлено, то начать работу будет не возможно. При нажатии кнопки пуск открывается клапан К1, и газ из коллектора поступит в испытуемое изделие и,

в зависимости от величины испытательного давления, в камеру А или В. Время поворота стола устанавливается равным времени, заданному техническими условиями на испытание изделия. На контрольной позиции во время остановки стола клапан К1 закрывается, а клапан К2 открывается, и газ поступит в преобразователь. От преобразователя давление газа в виде сигнала попадет на распределительный клапан 2, а оттуда, в зависимости от величины испытательного давления, в камеру Б или Г. Затем происходит сравнение двух величин давления. Если испытываемое изделие не имеет утечки, то величина давления в камере Б или Г будет такой же, как в камере А или В соответственно. Загорится зеленый индикатор. Если во время испытания появится утечка, превышающая допустимую величину, то давление станет меньше в этих камерах, загорится красный индикатор, и на дисплее появится значение величины утечки. При завершении испытания все клапаны закрываются, и подача газа прекращается.

Применение ПЛК и разработанной программы значительно расширяют возможности рассматриваемой установки. С помощью пульта оператора можно без особых усилий регулировать те или иные параметры проведения испытания: время выдержки изделия, испытательное давление, величину допустимой утечки. Это позволит сократить время переналадки оборудования и сделает систему более гибкой. Программа рекомендована для использования на производстве.

УДК 658.7

А. В. Бедяева

МОДИФИКАЦИИ КЛАССИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

E-mail: ann9478@yandex.ru

Изложены основные принципы работы системы управления запасами «Минимум-Максимум» и системы управления запасами с установленной периодичностью пополнения запасов до постоянного уровня, также сравнение данных систем.

Ключевые слова: управление запасами, фиксированный размер заказа, фиксированный интервал времени между заказами, оптимизация.

Basic system concept is described of in inventory management systems – Min-Max system and fix order interval system, also comparison systems.

Keywords: inventory management, fixed order quantity, fixed interval time, optimization.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Барабанов, Г. П.* Автоматизация контроля герметичности газовой трубопроводной арматуры / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов, И. И. Лупушор // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 7). – С. 65–68.
2. *Барабанов, Г. П.* Автоматизация приемосдаточных испытаний на герметичность в производстве газовой аппаратуры / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2009. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 5). – С. 62–65.
3. *Клюев, В. В.* Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
4. *Жежеря, Н. И.* Автоматизация испытаний изделий на герметичность: учеб. пособие / Н. И. Жежеря. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 475 с.
5. *Барабанов, Г. П.* Автоматизация контроля герметичности по манометрическому методу способом сравнения с непрерывной подачей давления / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов, А. К. Иванюк // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 10). – С. 93–96.
6. Пат. 2194259 РФ, МПК 7 G 01 M 3/02 Автоматизированный стенд для испытания изделий на герметичность / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов; ВолгГТУ. – 2002.
7. *Барабанов, Г. П.* Рекомендации по созданию автоматизированного оборудования для контроля герметичности газовой аппаратуры на этапе проектирования / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов, В. А. Бессалов // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 100–103.
8. *Барабанов, Г. П.* Моделирование метода и средств автоматического контроля герметичности газовой запорной арматуры / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ.* – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 6). – С. 71–73.
9. Проектирование микропроцессорных систем: метод. указания к курсовому проектированию / сост. Е. В. Бурькова. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 32 с.

Система управления запасами – это комплекс мероприятий по созданию и пополнению запасов с целью организации непрерывного контроля и оперативного планирования поставок [1,2].

Запасы – это материальные ресурсы, ожидающие производственного или личного потребления.

Существуют основные классические системы управления запасами:

- система с фиксированным размером заказа;
- система с фиксированным интервалом времени между заказами.

Система управления запасами с фиксированным размером заказа.

Размер заказа является фиксированной величиной в данной системе и не подлежит изменению ни при каких условиях работы системы. Таким образом, в данной системе управления запасами основным параметром является размер заказа. Данный параметр должен быть рациональным и оптимальным. Критерием оптимизации служит минимизация совокупных затрат на хранение запасов и выполнение заказов [2]. Величина критерия оптимизации зависит от:

- объема складских помещений;
- затрат на хранение запасов;
- стоимости оформления заказа.

Данные показатели взаимосвязаны, и их взаимосвязь варьируется в каждом отдельном случае. Экономия на хранение запасов приводит к увеличению затрат на оформление заказов. Экономия затрат на повторные заказы ведет к потерям, которые связаны с содержанием излишек складских помещений, а также с ухудшением обслуживания потребителя. Максимальная загруженность складов увеличивает затраты на хранение запасов, а также увеличивает риск появления неликвидных запасов. Уменьшить совокупные затраты на хранение запасов и на повторение заказа позволяет оптимальный размер заказа, который рассчитывается по формуле Уилсона:

$$n_0 = \sqrt{\frac{2C_1b}{C_2}},$$

где C_1 – затраты на поставку единицы заказываемого продукта, руб.; b – потребность в заказываемом продукте, шт.; C_2 – затраты на хранение единицы заказываемого продукта, руб./шт.

Данная формула представляет первый вариант формулы Уильсона, которая учитывает моментальное пополнение запасов на складе. Если пополнение запаса на складе происходит за временной промежуток, то формулу вводится

коэффициент, учитывающий скорость этого пополнения:

$$n_0 = \sqrt{\frac{2C_1b}{C_2k}}.$$

Гарантийный запас позволяет обеспечивать потребность, вызванную задержкой поставки. Гарантийный запас восполняется за счет последующих поставок с использованием второго расчетного параметра порогового уровня запаса.

Пороговый уровень запаса – это тот уровень, при достижении которого производится очередной заказ. Его величина рассчитывается также как поступление заказа на склад при снижении текущего запаса до гарантийного уровня. При расчете порогового запаса задержка поставки не учитывается.

Третий параметр – максимальный запас. Он не влияет на функционирование системы в целом, но позволяет регулировать максимальное количество ресурсов на складе [4].

Система управления запасами с фиксированным интервалом времени между заказами.

В этой системе заказы формируются в определенное время через разные временные интервалы между собой, например 1 раз в месяц. Оптимальный размер заказа позволяет определить интервал времени между заказами, минимизировать совокупные затраты на хранение запасов и повторение заказа. Оптимальный размер заказа улучшает взаимодействие таких факторов как издержки на хранение запасов и стоимость заказа [2]. Формула расчета интервала времени между заказами:

$$I = N \cdot \frac{b}{n_0},$$

где N – число рабочих дней в году, дни; b – потребность в заказываемом продукте, шт.

Рассчитанный интервал времени между заказами может быть использован к применению, а также скорректирован на основе экспертных оценок.

Гарантийный запас предусматривает потребность предполагаемой временной задержки поставки. Гарантийный запас пополняется при последующих поставках через пересчет размера заказа, чтобы его поставка увеличила запас до максимального желательного уровня.

В представленной системе заказ заранее определен и не изменен, не зависит от всевозможных обстоятельств. Поэтому расчет размера заказа основывается на уровне потребления до момента поступления заказа на склад организации.

Вычисления размера заказа в системе с фиксированным интервалом времени между заказами производится по формуле в штуках:

$$n_I = Q_{\max I} - Q_{\text{current}} + b_{\text{del}},$$

где $Q_{\max I}$ – максимально желательный заказ, шт.; Q_{current} – текущий заказ, шт.; b_{del} – ожидаемое потребление за время.

Таким образом, поставка пополняет запас на складе до максимального желательного уровня, а разница между максимальным желательным и текущим запасами определяет величины заказа, необходимая для восполнения запаса до максимального желательного уровня на момент расчета.

Вышеупомянутые системы основываются на фиксации одного из параметров: размера заказа или интервала времени между заказами.

Данные системы применяются в условиях равномерного потребления запасов. В случае возникновения отклонений от запланированных параметров потребления запасов и равномерного потребления, данные системы показывают неудовлетворительные результаты. Таким образом, на основе данных систем разрабатываются их модификации, которые применяются в случае неравномерно спроса на запасы [4].

Основными модификациями классических систем являются:

- система управления запасами «Минимум-Максимум»;
- система управления запасами с установленной периодичностью пополнения запасов до постоянного уровня.

Система управления запасами «Минимум-Максимум».

Данная система рассчитана на наличие максимальных затрат учета запасов и оформления заказа. Система содержит принципы основных систем управления запасами. Как и в системе с фиксированным интервалом времени между заказами система использует постоянный интервал времени между заказами, поэтому данная система получила название от работы с двумя уровнями запасов – минимальным и максимальным.

Пороговый уровень запаса – минимальный запас в системе «Минимум-Максимум». Таким образом, заказ оформляется, через установленные интервалы времени при условии, что текущий уровень запаса равен или ниже порогового уровня запасов. Максимальному уровню соответствует максимальный желательный запас в системе «Минимум-Максимум». Размер

максимального уровня запасов учитывается при определении размера заказа [3].

Параметр интервал времени между заказами является постоянной величиной. Расчет данного параметра производится по формуле:

$$I = N : \frac{b}{n_0}.$$

Параметр размер заказа является постоянно рассчитываемой величиной. Расчет данного параметра производится по формуле:

$$n_I = Q_{\max I} - Q_{\text{current}} + b_{\text{del}}.$$

Система управления запасами с установленной периодичностью пополнения запасов до постоянного уровня.

Данная система применяется при наличии значительных колебаний потребления запасов. Система содержит принципы основных систем управления запасами. В данной системе предполагается формирование заказов не только через установленные интервалы времени, но и при достижении порогового уровня запасов. Таким образом, предотвращается завышение объема запасов на складе, а также возникновение дефицита запасов.

Особенностью данной системы является разделение заказов на две категории – плановые заказы и дополнительные заказы. Плановые заказы формируются через установленные интервалы времени. Дополнительные заказы формируются при достижении порогового уровня запасов [3].

Параметр интервал времени между заказами является постоянной величиной. Расчет данного параметра производится по формуле:

$$I = N : \frac{b}{n_0}.$$

Параметр размер заказа является постоянно рассчитываемой величиной. Расчет данного параметра производится по формуле:

$$n_I = Q_{\max I} - Q_{\text{current}} + b_{\text{del}}.$$

Сравнение дополнительных системы управления запасами.

Система «Минимум-Максимум» ориентирована на ситуации, при которых затраты на учет запасов и на оформление заказов соизмеримы с потерями от возникновения дефицита запасов. Данная система допускает дефицит запасов по экономическим соображениям при больших затратах на учет запасов на складе и на формирование заказа. Эта система учитывает возможность задержки поставки через параметр гарантийного запаса. Система управле-

ния запасами с установленной периодичностью пополнения запасов до постоянного уровня ориентирована на ситуации, при которых необходимо свести к минимуму возникновение дефицитов запасов. Данная система в отличие от основных систем управления запасами учитывает возможность, как в задержке поставки, так и в изменении темпов потребления запасов от запланированных. Это объясняется объединением использования порогового уровня и фиксированного интервала между заказами. Пороговый уровень повышает чувствительность системы к возможным колебаниям интенсивности потребления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев, А. П. Математическая модель управления однопериодными товарно-материальными запасами при реализации инвестиционных проектов на промышленном предприятии / А. П. Ковалев, М. С. Михальченко // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: Изд-во «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», 2009. – С. 139–142.
2. Ковалев, А. П. Математическая модель управления многоцикловыми товарно-материальными запасами в условиях серийного выпуска продукции на машиностроительном предприятии / А. П. Ковалев, М. С. Михальченко // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: Изд-во «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», 2009. – С. 93–99.
3. Логистика : учеб. пособие / под ред. Б. А. Аникина. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 220 с.
4. Бедяева, А. В. Системы управления запасами промышленного предприятия / А. В. Бедяева // Курск : «Страна живет, пока работают заводы» : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. (9–10 декабря 2015 года) / редкол. : О. В. Овчинкин (отв. редактор). – 2015. – 402 с.
5. Фролов, Е. Б. Организация производственного процесса на предприятии при помощи методов вычисляемых приоритетов / Е. Б. Фролов, Ю. А. Тихонова, А. А. Корниенко // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: Изд-во «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», – 2012. – С. 73–76.
6. Саненко, О. В. Логистический подход к управлению материальными запасами / О. В. Саненко, К. В. Пителинский. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации – федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности. – 2006. – С. 51–62.
7. Шохрина, Н. В. Основы методики обоснования технических характеристик изделия / Н. В. Шохрина, А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: Изд-во «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», 2015. – С. 113–117.
8. Демин, В. А. Программно-моделирующий комплекс создания аналитико-имитационных моделей для поддержки жизненного цикла дорожно-строительной техники / В. А. Демин, И. А. Еськова, А. Б. Николаев [и др.] // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: Изд-во «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», 2014. – С. 75–80.
9. Шемелин, В. К. Обеспечение качества управления объектами в среде автоматизированного производства на основе оптимизации ресурсов / В. К. Шемелин, Д. А. Ланченко // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: Изд-во «Московский государственный технологический университет СТАНКИН», 2011. – С. 76–78.

УДК 658.512.4

А. В. Капитанов, В. Г. Митрофанов

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

E-mail: av.kapitanov@stankin.ru

В статье приводится анализ основных закономерностей развития переналаживаемых производственных систем с учетом особенностей технологии многономенклатурного производства. Рассматривается концепция интегрированных систем управления на основе систем планирования и управления цепями поставок, а также САМ-технологий.

Ключевые слова: многономенклатурное производство, переналаживаемые производственные системы, системы управления предприятием, автоматизированное производство.

The article provides an analysis of the basic laws of development of production systems re-adjustable allowing for the multiproduct manufacturing technology. The concept of integrated management systems, based on planning systems and supply chain management, as well as CAM - technology.

Keywords: diversified manufacturing, reconfigurable production systems, enterprise management systems, automated production.

Перед производственными предприятиями постоянно встают проблемы, связанные с усилением конкурентной борьбы на быстро изменяющихся рынках. Заказчики все более настойчиво требуют качественных разработок, которые учитывали бы их конкретные потребности и обладали бы специальными свойствами.

Кроме того, быстрое развитие технологии укорачивает жизненный цикл многих изделий. Ужесточение международной конкуренции еще сильнее подвигает предприятия на снижение затрат и повышение производительности труда, поэтому многие производственные предприятия отходят от традиционных взглядов на производство, согласно которым достижение максимальной эффективности возможно лишь в условиях массового производства стандартных изделий.

Серийное производство с длительным подготовительным периодом, большим объемом незавершенного производства и длительным производственным циклом уже перестает удовлетворять запросам заказчика, который стремится к повышению качества своей продукции и расширению ее ассортимента.

Сегодняшняя тенденция – это мелкосерийное производство ограниченной номенклатуры изделий с коротким производственным циклом при незначительных материальных запасах.

В настоящее время наиболее эффективным методом производить различные виды изделий и при этом менять их номенклатуру и объем выпуска с минимальными временными и финансовыми затратами – являются переналаживаемые производственные системы (ППС) [1,2].

Создание ППС способствует развитию производства с переменными параметрами автоматизированного оборудования и позволяет осуществлять эффективное управление материальными и информационными потоками.

Применение ППС направлено на решение следующих производственных задач [3,4]:

- обеспечение требуемой производительности при изменяющейся номенклатуре выпускаемых изделий;
- поддержание и восстановление работоспособности за счет автоматической переналадки;
- увеличение жизненного цикла автоматического оборудования.

В условиях макроэкономической нестабильности, колебания спроса и предложения, успешная работа производственного предприятия возможна только при условии эффективного его управления.

Построение эффективной системы управления производством является достаточно сложной задачей, когда речь идет о предприятии с мелкосерийным и единичным характером многономенклатурного производства. Это обуславливается, как правило, отсутствием постоянной номенклатуры заказов при большом ее разнообразии, новизной и сложностью изготавливаемых изделий, высокими требованиями к качеству, а также многими другими факторами, определяемыми спецификой предприятия.

В таких условиях важны информационная поддержка процесса управления и информационные технологии, позволяющие обеспечить эффективное многономенклатурное производство.

Объединение оборудования многономенклатурных производственных систем в единую совокупность, автоматизация подготовки производства и реализации управления в современных условиях осуществляются человеко-компьютерным комплексом, включающим программные и аппаратные средства вычислительной техники, образующие автоматизированную систему управления. Современные взгляды на построение подобных систем предполагают автоматизацию, как сферы материального производства, так и сферы информационной технологии в их взаимосвязи на всех уровнях и стадиях, что приводит к концепции интегрированных систем управления (ИАСУ). ИАСУ осуществляет автоматизацию как материальной, так и информационной компонент производственного процесса в их взаимосвязи, от формирования портфеля заказов и до сбыта и отгрузки готовой продукции [5,6].

Информационные технологии являются системообразующим фактором, то есть именно структура технологических процессов переработки информации определяет структуру материального производства на автоматизируемом предприятии. При этом обеспечивается:

- индивидуализация информационного обеспечения;
- интеллектуализация процессов управления;
- интеграция взаимодействия систем управления организационными и технологическими процессами;
- гибкость производственной системы за счет интеграции процессов проектирования и изготовления продукции.

Бурное развитие вычислительной техники, начиная с конца XX века, прикладной математики, накопленный опыт в управлении производст-

венными системами, все это послужило технической базой для создания систем управления и планирования производственных процессов, как за рубежом, так и в Российской Федерации [7].

В настоящее время, взамен стандартам систем управления и планирования классов MRP (Material Requirements Planning) и MRP-II (Manufacturing Resource Planning), пришли системы нового поколения – ERP (Enterprise resource planning), APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) и MES (Manufacturing Execution Systems). Эти системные решения, апробированные за последние десятилетия на различных предприятиях машиностроительного комплекса, имеют различное назначение, функциональность и могут быть использованы как самостоятельные тиражируемые системы, решения, реализуемые как составная часть интегрированных систем или уникальные системы, создаваемые для конкретного предприятия.

В начале 90-х годов после первых опытов внедрения ERP систем, осмысления преимуществ и недостатков планирования по стандарту MRP-II предприятия столкнулись с основной проблемой – достоверность планирования. Достоверность и точность во времени. Динамика рынка, потребовали от предприятий более точных сроков поставок, полноценного участия в управлении цепочкой поставок. Несовершенство методов планирования с помощью MRPII потребовали пересмотра «ценностей» – что важно при планировании? Скорость, противоречащая ей точность, и для чего нужны эти показатели? Выяснилось, что без решения задачи управления поставками, без возможности прогнозирования точных дат выпуска продукции предприятие представляет собой вещь в себе. Поэтому основной целью для систем планиро-

вания нового поколения – APS являлось решение задач автоматизации управления цепями поставок (SCM – Supply Chain Management), причем этот функционал APS, реализуемый за счет возможности планирования всех работ во времени с учетом загрузки мощностей, имеет двойное назначение – он реализуется как для предприятия, выступающего объектом всей цепочки на динамичном рынке товаров, так и для объектов самого предприятия – цехов, участков и подразделений. Таким образом, возможности планирования в APS расширены и усовершенствованы относительно стандарта MRPII [8–10].

Чтобы оценить, степень влияния рассматриваемых технологий на работу предприятия, был проведен сравнительный анализ по результатам исследования Института Фраунхофера, по двум важнейшим параметрам – своевременность выполнения заказа и степень использования производственных мощностей (результаты представлены в таблице) [11]. Как и следовало ожидать, системы управления цепями поставок оказывают положительное и статистически значимое влияние на качество поставок.

В среднем сроки выполнения обязательств по поставкам на предприятиях, использующих SCM, оказались почти на 3 % меньше, чем на остальных предприятиях, поскольку данные системы способствуют повышению эффективности и увеличению скорости реагирования в разделенных цепочках создания стоимости за счет быстрого и беспрепятственного обмена информацией, который в современной стремительно изменяющейся среде является залогом успешности компании. Однако, как можно видеть из таблицы, применение SCM не дало компаниям положительного эффекта степени использования мощностей.

Влияние выбранной технологии на целевые параметры переналадки

Использование технологий	Своевременное выполнение заказов, %			Степень использования мощности, %		
	нет	да	+/-	нет	да	+/-
SCM-внедрение	88,1	90,9	+2,8	86,0	85,8	-0,2
ERP-внедрение	89,8	88,6	-1,2	84,6	86,7	+2,1
CAM-внедрение	89,9	88,5	-1,4	85,8	86,0	+0,2

Таким образом, система управления цепочками поставок подходит компаниям, ставящим приоритетной целью сокращение сроков выполнения заказа, а для увеличения производственных мощностей следует комбинировать SCM с другими системами.

Широко распространенные ERP системы исходят из многоуровневых, но целостных подходов к планированию, при которых планирование производственных мощностей и времени прохождения заказов происходит на одном уровне. То есть план производства разра-

батывается, исходя из заданных сроков выполнения заказов и оптимального использования имеющихся мощностей. Как следует из результатов исследования, внедрение ERP-систем положительно сказывается на использовании производственных мощностей – зафиксированный эффект улучшения составил около 2 %, но показатель своевременности поставок снизился более, чем на 1 %.

Данные в таблице указывают на то, что внедрение автоматизированных систем управления производством (САМ, Computer-aided manufacturing), как и внедрение систем ERP, приводит к ухудшению точности поставок, а на качество использования производственных мощностей не оказывает существенного эффекта. Тем не менее, прямое отрицательное влияние САМ-систем на качество поставок, о котором заявили представители опрошенных компаний, не является убедительным. Здесь можно говорить об опосредованном отрицательном эффекте, поскольку, как оговаривалось выше, соблюдение сроков выполнения заказов в значительной степени зависит от качества планирования (на-

пример, на основе систем ERP), а также от организационной структуры предприятия, на которые автоматизированные производственные системы не влияют, а значит, и не способны компенсировать погрешности на этих уровнях. Из этого можно сделать вывод, что если компания нацелена, прежде всего, на скорость поставок и эффективное использование мощностей, а степень автоматизации производства не является приоритетной задачей, – более полезной она найдет системы ERP и SCM.

Если же проанализировать частоту применения ERP по отраслям (рис. 1), то отчетливо выделяется неравномерность распространения технологии: в машиностроении, электротехнической промышленности, медицине, производстве измерительного оборудования, оптики, техники управления и автоматического регулирования, а также в транспортном машиностроении частота использования ERP существенно превышает средний уровень. К примеру, в транспортном машиностроении она применяется 84 % предприятий, 65 % которых применяют ее весьма активно.

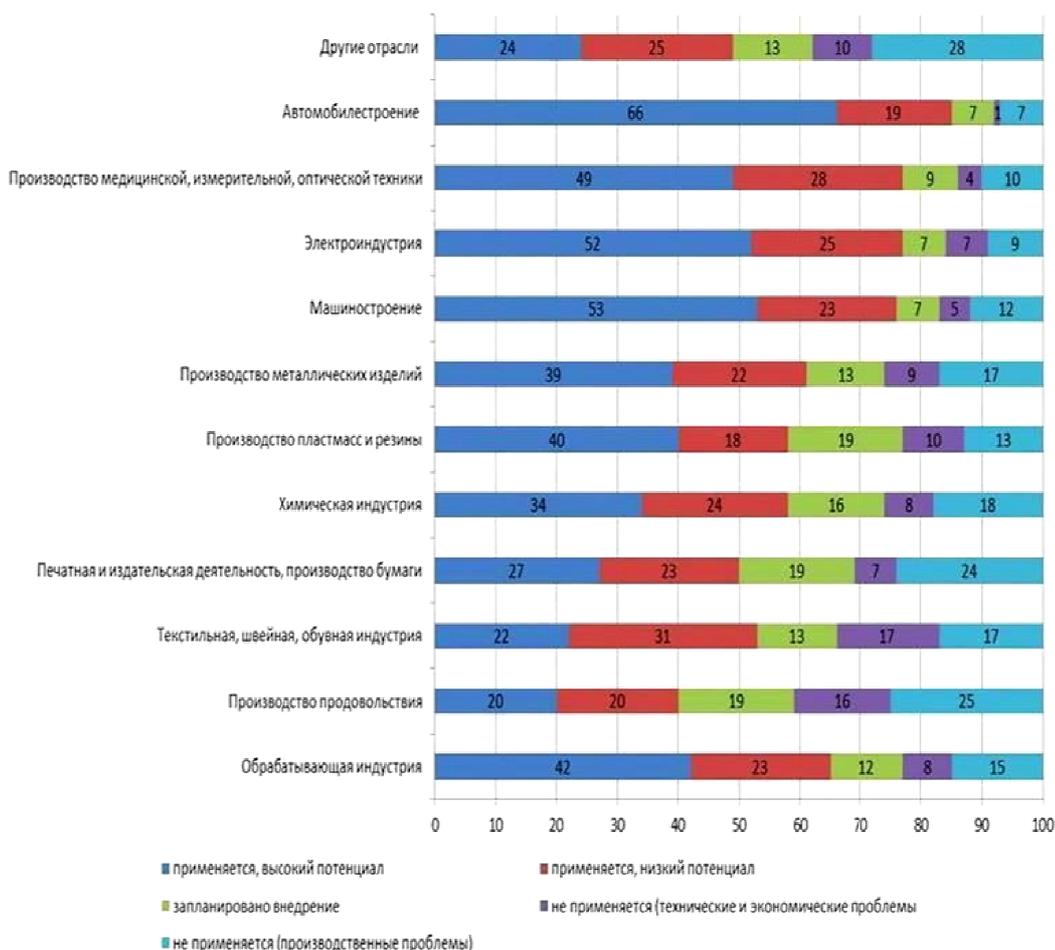


Рис. 1. Распространенность ERP-систем по отраслям

В целом, интенсивность применения ERP в упомянутых отраслях экономики можно объяснить высокой сложностью продукции и ее производства. Растущее многообразие ассортимента, призванного удовлетворять самым разнообразным требованиям клиентам, увеличивает сложность планирования и управления производством. Поэтому для решения этой задачи компании предпочитают полагаться на современные технологические решения в области электронной обработки данных, в центре которых стоят современные модульно расширяемые системы ERP.

Автоматизированные производственные системы имеют на сегодняшний день не меньшую

степень распространения, чем ERP-системы, а именно – 63 %, (рис. 2). Однако есть и существенное отличие: об «интенсивном» их использовании заявило не более половины опрошенных. А учитывая, что всего 5% предприятий планируют внедрение CAM, рост их использования ожидается незначительным, хотя доля предприятий, которым во внедрении CAM мешают технические или экономические факторы, и является несколько выше (7 %). Таким образом, при помощи разработки соответствующих экономических и технических решений широту распространения технологии можно несколько увеличить.

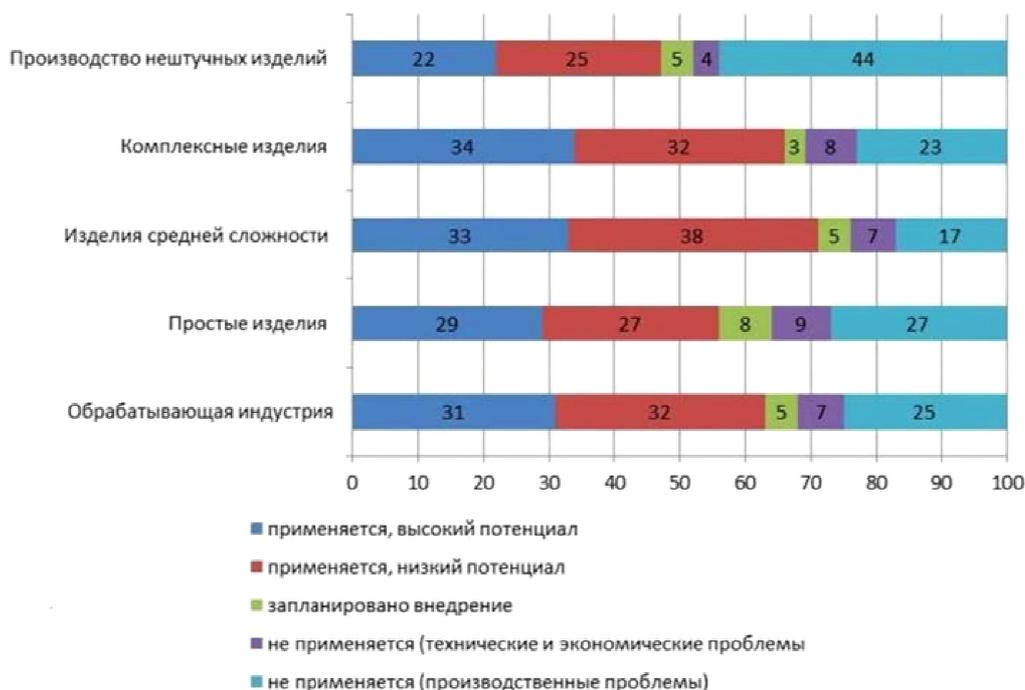


Рис. 2. Распространенность CAM-технологий

Более активное применение систем CAM при производстве продуктов средней (71 %) и высокой сложности (66 %) подчеркивает важность информационно-технической поддержки, прежде всего, для комплексного производства.

SCM-системы применяются в среднем 33–35 % предприятий – не только существенно реже, чем ранее рассмотренные системы ERP или CAM, но и со значительно более низкой интенсивностью (рис. 3).

Проанализировав их распространенность по отраслям, можно заметить, что их применение возрастает как по частоте, так и по интенсивности вместе с увеличением объема серии, нахо-

дясь для крупносерийного производства на заметно более высоком уровне.

SCM-системы с их использованием менеджмента поставок, базирующегося на ABC-анализе (метод, позволяющий классифицировать ресурсы фирмы по степени их важности) изделий, классически имеют значительно большую привлекательность для крупносерийного производства, поскольку позволяют сократить расходы на координацию, в то время как небольшие предприятия, даже при наличии благоприятных экономических факторов, могут считать внедрение систем SCM нецелесообразным.

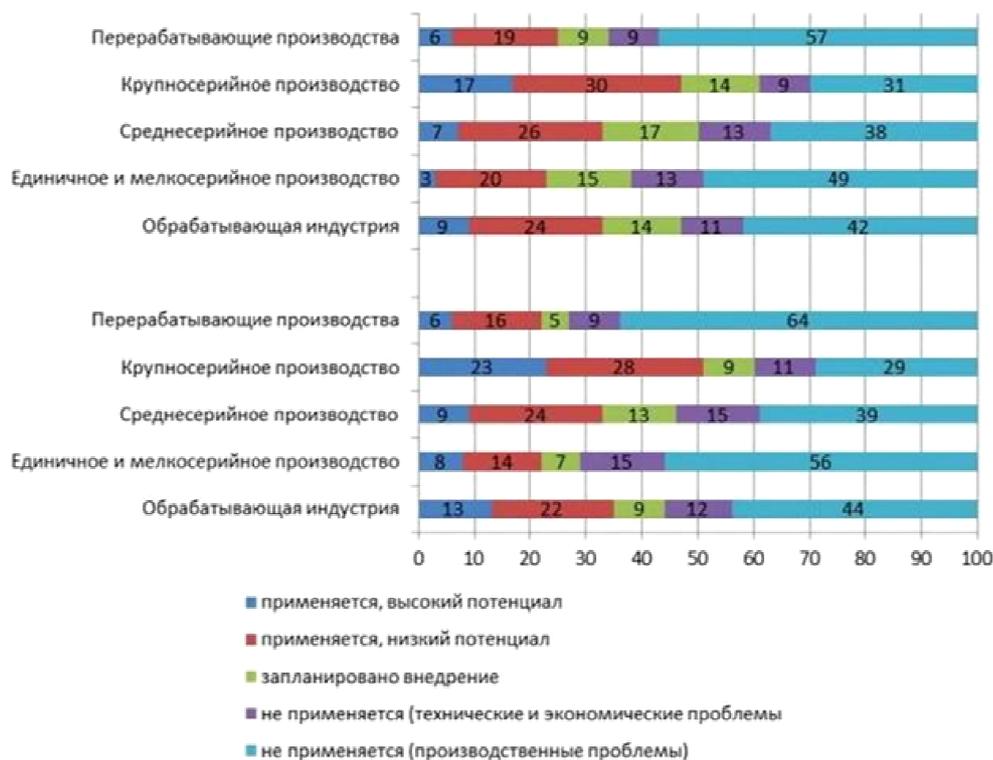


Рис. 3. Распространенность SCM-систем

Однако динамику распространения систем SCM среди промышленных предприятий, производящих штучную продукцию, следует считать позитивной, поскольку доля предприятий, планирующих внедрение SCM, находится между 14 и 17 %, что при сохранении тенденции означало бы более чем 50 %-ный прирост. Это отражает растущее значение профессионального управления поставками в распределительных производственных сетях создания добавленной стоимости, как это реализуется, к примеру, в автомобилестроении. Гибкость в данном отношении означает также управление цепочкой создания добавленной стоимости на основании принципа «точно в срок» и достижение, несмотря на сложность взаимосвязей, высокого качества выполнения заказов при низких складских и буферных запасах. В этом отношении системы SCM оказываются весьма действенными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальчук, Е. Р. Основы автоматизации машиностроительного производства / Е. Р. Ковальчук, М. Г. Косов, В. Г. Митрофанов и др. ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – Москва : Высшая школа, 2001. – 312 с.
2. Капитанов, А. В. Автоматизированные управленческие системы в промышленности / А. В. Капитанов, В. И. Мишатин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2012. – № 2. – С. 82–85.
3. Феофанов, А. Н. К вопросу о компонуемых производственных системах / А. Н. Феофанов, О. А. Феофанов, И. Ю. Юнин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – № 4. – С. 95–99.
4. Брюханов, В. Н. От проектирования участков и цехов к построению гибких производственных систем / В. Н. Брюханов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 2. – С. 56–62.
5. Кутин, А. А. Технологическая оснастка для гибких производственных систем нового поколения / А. А. Кутин, М. В. Туркин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – № 3. – С. 36–40.
6. Симанженков, К. А. Формализация структурного синтеза автоматизированных производственных систем в машиностроении / К. А. Симанженков, С. А. Тясто // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – № 4. – С. 76–78.
7. Митрофанов, В. Г. Интегрированные производственные системы / В. Г. Митрофанов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 1. – С. 65–67.
8. Загидуллин, Р. Р. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах / Р. Р. Загидуллин. – Москва : Издательство МАИ, 2001. – 208 с.
9. Загидуллин, Р. Р. Управление жизненным циклом продукции / Р. Р. Загидуллин. – Москва : СТИН, 2008. – № 6. – С. 2–4.
10. Загидуллин, Р. Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP / Р. Р. Загидуллин. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 369 с.
11. Fraunhofer-Gesellschaft. URL: <http://www.fraunhofer.de> (дата обращения: 19.01.2016).

УДК 621.91.02

Е. Г. Крылов, А. М. Макаров, А. С. Сергеев, Н. В. Козловцева, М. А. Карташова

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА
ДЛЯ УСТАНОВОК ПЛАЗМЕННОГО РАСКРОЯ МАТЕРИАЛОВ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В статье рассмотрены основные технологические процессы плазменной резки листового проката. Предложено автоматизировать загрузку проката с помощью электромагнитного листоукладчика. Данная разработка позволит повысить эффективность захвата и транспортировки, расширит диапазон габаритных размеров и массу проката.

Ключевые слова: плазменная резка, листовый прокат, электромагнитный листоукладчик.

The article examines the basic processes of flat rolled stock plasma cutting. It is proposed to automatize the input using magnetic sheet piler. This development will increase the grip and transport efficiency and expand the size and weight range of flat rolled stock.

Keywords: plasma cutting, flat rolled stock, magnetic sheet piler.

В настоящее время термические установки резки металла активно применяются в технологических процессах заготовительного производства, в частности в судостроении для выполнения технологических операций газоплазменного раскроя.

Термической резкой называют обработку металла посредством нагрева до определенной температуры с целью улучшения их свойств, изменения структуры или формы для соответствия поставленным задачам. На предприятиях применяются различные методы раскроя, наиболее перспективным среди которых является метод плазменной резки [1,2]. Плазменные технологии характеризуются широкими возможностями регулирования параметров процесса обработки изделий [3]. Для плазменной резки характерно интенсивное сжатие газовым потоком столба дуги, которое определяет высокую плотность ее теплового потока и газодинамический напор, благодаря которым достигаются режущие свойства плазмы. Кроме того, особенности оборудования и технологий плазменной резки позволяют достаточно просто соче-

тать ее с системами ЧПУ, промышленными роботами и использовать в различных отраслях промышленности [4].

Производительность линии раскроя металлических листов во многом зависит от времени выполнения вспомогательных операций, а именно загрузки, транспортировки и разгрузки листового материала в зону обработки. Для увеличения производительности машины термической резки металла необходимо сократить время технологической операции загрузки на раскройный стол листового металлопроката и выгрузки готовых изделий [5]. На сегодняшний день существует достаточно много устройств загрузки листового проката в зону обработки, такие как валковые устройства подачи, кантователи, промышленные роботы, манипуляторы и другие. Результаты анализа решения задачи захвата листового материала приведены в таблице. На основе патентного анализа и исследования характеристик захватных устройств можно сделать вывод, что наиболее эффективным решением будет применение электромагнитных захватных устройств для загрузки и выгрузки листового проката.

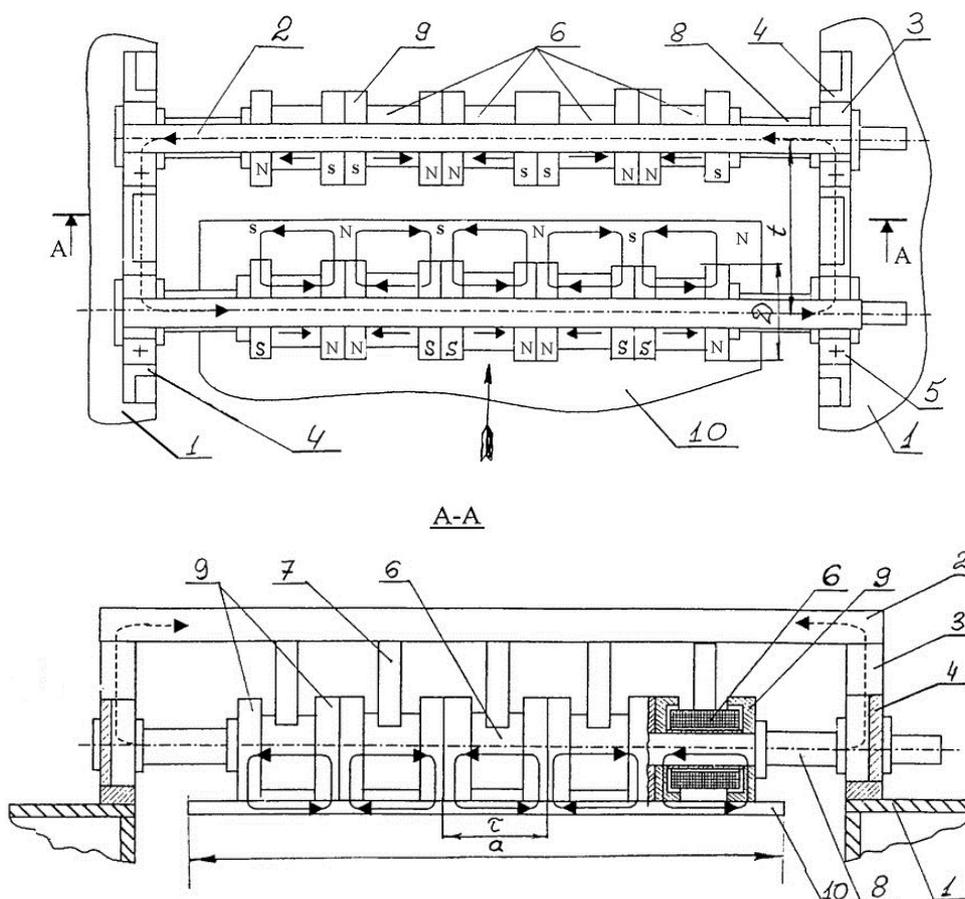
Сводные данные захватных устройств различных типов

Тип захватного устройства	Характеристики	Патенты РФ
Механическое	Пригодны для деталей различных форм. Конструкция схвата зависит от габаритов, массы, материала деталей. Принцип действия зависит от типа привода. Могут подвергнуться деформации листовой прокат. Высокий коэффициент усилия зажима	Захватное устройство для транспортировки листовых материалов (RU № 181796) Грузозахватное устройство (RU № 2111161) Захватное устройство для листового материала (RU № 1504203)

Окончание таблицы

Тип захватного устройства	Характеристики	Патенты РФ
Вакуумное	Пригодны только для плоских и ровных поверхностей из любых материалов. Ограниченная сила притяжения на единицу поверхности. Пониженная точность базирования из-за эластичности присосок. Захват замедлен. Конструкция более сложная – необходима герметичность соединений, требуются присоски и трубопроводы. Срок работы конструкции ограничен	Вакуумный укладчик листов (RU № 870306) Вакуумный листоукладчик для тонких стальных листов (RU № 505464) Вакуумный листоукладчик преимущественно тонких листов (RU № 423438)
Электромагнитное	Пригодны для деталей только из намагничивающихся материалов. Большая сила притяжения на единицу поверхности. Высокая точность базирования благодаря жесткости сердечника. Быстрота захвата детали. Простота конструкции: катушки и сердечники могут быть легко изготовлены потребителем. Катушки нагреваются, но конструкция долговечна	Электромагнитный листоукладчик (RU № 2184063) Листоукладчик (RU № 455900) Электромагнитный листоукладчик (RU № 2009090) Электромагнитное устройство для отделения от стопы и подъема стальных листов (RU № 143923)

Одним из вариантов такого устройства является электромагнитный листоукладчик, представленный на рисунке.



Электромагнитный листоукладчик:

1 – продольная балка; 2 – несущая балка электромагнитного ролика; 3 – подшипники; 4 – установочные кассеты; 5 – клинья; 6 – неподвижные катушки возбуждения; 7 – кронштейн; 8 – вал; 9 – полюсные диски; 10 – лист проката

Электромагнитный укладчик работает следующим образом. При подаче напряжения постоянного тока на неподвижные катушки возбуждения b каждая катушка возбуждает магнитное поле, направление которого на катушке показано сплошной стрелкой. Подлежащий укладке лист 10 поступает на нижнюю сторону электромагнитных роликов листоукладчика по обычному рольгангу агрегата поперечной резки в направлении, показанном на листе 10 стрелкой. При заходе переднего конца листа в область магнитного поля электромагнитного ролика передний конец листа 10 притягивается к нижней стороне полюсных дисков электромагнитного ролика под действием магнитной силы притяжения в магнитном поле, возбуждаемом неподвижными катушками по контурам, показанным на рисунке сплошными линиями со стрелками.

При встрече направленных магнитных полей соседних неподвижных катушек возбуждения в электромагнитном ролике на переднем конце листа при его движении вдоль листоукладчика возбуждаются разноименные полюса магнитного поля, обозначенные буквами N и S , как показано на рисунке. Так как неподвижные катушки b создают разноименную полярность расположенных друг против друга полюсных дисков соседних электромагнитных роликов, то в переднем конце листа 10 и на полюсных дисках соседнего электромагнитного ролика полярность полюсов магнитного поля получается разноименной. Благодаря этому передний конец листа начинает притягиваться к очередному на пути его движения электромагнитному ролику, еще не доходя до этого электромагнитного ролика. Это увеличивает грузоподъемность электромагнитного листоукладчика и позволяет расширить диапазон транспортируемых листов по толщине, в особенности в сторону меньших толщин. При нечетном числе катушек в ролике увеличиваются потоки рассеяния магнитного поля по контурам, показанным на рисунке пунктирными линиями со стрелками. В предлагаемом электромагнитном листоукладчике путь для этих потоков рассеяния прерван, так как концы валов 9 электромагнитных роликов за пределами установленных попарно на валах полюсных дисков 8 , корпуса подшипников 3 и установочные кассеты 4 выполнены из немагнитного материала.

С целью увеличения грузоподъемности устройства и изменения диапазона толщины и ши-

рины транспортируемых листов необходимо выполнить следующие условие:

$$(a - n\tau) / \tau < 1,$$

где a – ширина укладываемых листов; n – число из натурального ряда чисел; τ – шаг попарно установленных полюсных дисков на валах электромагнитных роликов.

Необходимо τ выполнять большим наружного диаметра D электромагнитных роликов, так как в противном случае магнитное поле электромагнитного ролика становится близкодействующим, не пригодным для работы электромагнитного листоукладчика. Таким образом должно выполняться следующее условие:

$$\tau \geq D.$$

Данная технология и предлагаемая конструкция электромагнитного листоукладчика позволит повысить эффективность и быстродействие захвата, удержания, манипулирования и транспортирования листового материала при выполнении операций раскроя листового проката на термических установках газоплазменной резки, а также дает возможность расширить диапазон габаритных размеров листа металла и его массу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штанговец, Е. С. Перспективы использования плазменной резки в России / Е. С. Штанговец, Е. Г. Зальцман, М. В. Сафронов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 2. – № 10. – С. 49–50.
2. Молчанова, Е. С. Сравнение плазменного, гидроабразивного и лазерного способов резки, и прошивки конструкционных материалов в радиоэлектронной промышленности / Е. С. Молчанова, Н. А. Бычков, С. И. Черняев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 6 (302). – С. 50–57.
3. Мильцин, А. Н. Современные методы резания листовых материалов / А. Н. Мильцин, М. Л. Шабанов, М. Н. Лысыч, В. В. Романов // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 2–1 (13–1). – С. 83–87.
4. Роботизированный технологический комплекс для прецизионной плазменной резки, плазменного упрочнения поверхности и нанесения защитных покрытий / В. Д. Вермель, С. Г. Зарубин, П. М. Николаев, Ю. В. Илюхин [и др.] // Технология машиностроения. – 2013. – № 9. – С. 48–53.
5. Серезников, А. С. Автоматизация процесса загрузки листового проката для термических установок горизонтальной резки металла / А. С. Серезников, А. С. Сергеев // Современные материалы, техника и технологии : матер. 3-й междунар. науч.-практ. конф., 27 дек. 2013 г. В 3 т. Т. 3 / Юго-Западный гос. ун-т [и др.]. – Курск, 2013. – С. 188–192.

УДК 621.783.223:658.5.012.2

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

КОМПЛЕКТОВАНИЕ САДКИ СЛЯБОВ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрены недостатки существующих методов комплектования садок слябов методических нагревательных печей. Предложена структурная схема информационно-технологической среды, которая позволит выбирать рациональные решения в условиях непостоянных производственных заказов и неполной загрузки печи.

Ключевые слова: методическая печь, горячий посад, садка слябов, информационно-технологическая среда.

Disadvantages of existent slab charges' batching methods for reheating continuous furnaces have been considered. Structural diagram of information and technological environment has been proposed. This diagram will allow selecting rational solutions in the conditions of non-constant production orders and non-full furnace capacity.

Keywords: continuous furnace, hot charging, slab charge, information and technological environment.

Существующие методы комплектования садок слябов методических нагревательных печей в основном состоят в следующем: заготовки загружаются в том порядке, в каком они будут прокатаны на стане. Данные методы имеют несколько недостатков [1, 2]:

1. Смешивание горячего и холодного посада. Тепловая энергия каждой зоны должна обеспечить нагрев самого холодного сляба до требуемой температуры. Это приводит к перегреву более теплых слябов и увеличению тепловых потерь. Теплые слябы достигают температуры окалинообразования раньше холодных и подвергаются воздействию греющей среды с высокой температурой более долгий период времени. Поэтому конечная температура теплых слябов выше требуемой температуры прокатки.

2. Смешивание различных марок стали. Если в одной зоне печи находятся слябы различных марок стали, они могут иметь разные требования нагрева, что также приводит к тепловым потерям.

3. Снижение доли горячего посада. Если прокатный стан обслуживают сразу несколько печей, то теплые слябы могут быть разделены между ними, а не сосредоточены в одной из них, что могло бы снизить потребление топлива и сохранить тепловую энергию.

4. Позднее или раннее поступление горячего посада. Когда теплые слябы поступают на склад позже планируемого срока, они могут быть загружены только через некоторое время для соответствия расписанию прокатки, которое определяет правила для последовательности прокатываемых заготовок. Тем временем

теплые слябы остывают, что приводит к тепловым потерям, так как металл необходимо нагревать повторно. Если теплые слябы поступают раньше, чем планировалось в оперативном расписании загрузки (или прокатки), им необходимо ждать своей очереди, что также приводит к тепловым потерям.

Существующие методики составления монтажных партий на прокатку учитывают следующие характеристики производственных заказов: геометрические размеры слябов и листов (полос), вес заказа, группа металла, технологический маршрут, карта нагрева, карта прокатки, группа отделки поверхности, срочность выполнения заказа, средняя температура слябов заказа и др. [3]. Однако эти методики не гарантируют достаточной близости одинаковых параметров режимных карт различных групп нагрева, либо ограничивают монтажную партию одной группой нагрева, тем самым снижая производительность печи.

Таким образом, разработанный алгоритм рационального комплектования садки слябов с учетом принадлежности сляба к группе нагрева [4] актуален.

Объединение слябов в садку с учетом каких-либо их характеристик является задачей многомерной классификации, которая может быть сформулирована следующим образом. Пусть исследуется совокупность n объектов, каждый из которых характеризуется по k замеренным на нем признакам X . Требуется разбить эту совокупность на однородные в некотором смысле группы (классы). При этом практически отсутствует априорная информация о характере распределения

измерений X внутри класса. Полученные в результате разбиения группы обычно называются кластерами, таксонами или образцами [5].

Если данные представлены в форме X , то первым этапом решения задачи поиска кластеров будет выбор способа вычисления расстояний или близости между объектами или признаками. В общем случае понятие однородности объектов задается либо введением правила вычисления расстояния $\rho(X_i, X_j)$ между любой парой исследуемых объектов (X_1, X_2, \dots, X_n) , либо заданием некоторой функции $r(X_i, X_j)$ (меры близости), характеризующей степень близости i -го и j -го объектов. Если задана функция $\rho(X_i, X_j)$, то близкие с точки зрения этой метрики объекты считаются однородными, принадлежащими одному классу. Часто в задачах кластерного анализа используют обычное евклидово расстояние [5]:

$$\rho_E(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^k (x_{il} - x_{jl})^2}, \quad (1)$$

где x_{il}, x_{jl} – величина l -й компоненты у i -го объекта ($l=1, 2, \dots, k; i, j=1, 2, \dots, n$).

Однако при объединении слябов в садку мож-

но ограничиться такой мерой близости, как температурный или временной допуск d_i , а именно:

$$|a_i - b_i| \leq d_i, \quad (2)$$

где a_i и b_i – соответствующие i -е параметры режимных карт двух сравниваемых групп нагрева.

С ростом возможностей информационных технологий деятельность технологов переносится из технологической среды в информационно-технологическую среду (ИТС). ИТС принято называть совокупность всех видов технологий, использующихся для создания, хранения, обмена и использования информации во всех ее формах (числовой, текстовой, графической, фонографической, видеографической и др.) [6].

Разработанный алгоритм рационального комплектования садки слябов [4] позволяет получать готовые решения при полной загруженности печи в условиях постоянного наличия производственных заказов. При неполной загруженности печи предлагается перенести работу инженера-фабрикатора по формированию садки слябов в информационно-технологическую среду, структурная схема которой изображена на рисунке.

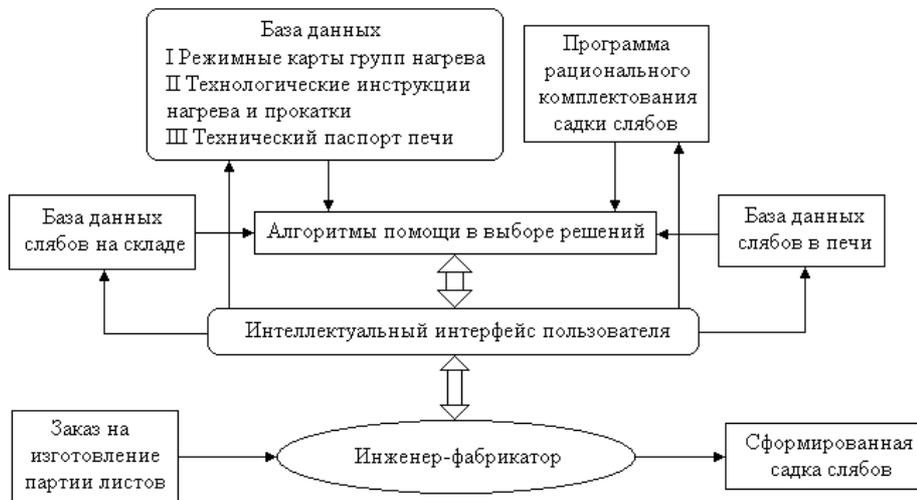


Схема информационно-технологической среды комплектования садки слябов

Для помощи в выборе решения используются специальные логистические алгоритмы, использующие оперативно пополняемые базы данных (слябы на складе и слябы в печи) и справочную документацию (режимные карты групп нагрева, технологические инструкции нагрева и прокатки, технический паспорт печи). В структуру ИТС входит и описанная в [7] программа рационального комплектования садки слябов методической печи.

Получив заказ на изготовление партии листов, инженер-фабрикатор начинает общение с автоматизированной системой выбора решений при помощи интеллектуального интерфейса пользователя. Передав системе информацию о текущем производственном заказе, на выходе он получает предлагаемые варианты сформированной садки слябов.

Применение информационно-технологической среды позволит выбирать рациональные ре-

шения в условиях непостоянных производственных заказов, что повысит эффективность всего листопрокатного производства в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. New Approach to Blast Furnace Slabs Heating Optimization / D. Malindžák [et al.] // Metal 2012: 21th Anniversary International Conference on Metallurgy and Metals, Conference Proceedings. – 2012. – pp. 1613–1620.
2. Кухтик, М. П. Модели и алгоритмы системы управления нагревом слэбов в методической печи : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Кухтик Михаил Петрович. – Волгоград, 2013. – 166 с.
3. Ненахов, В. А. Повышение эффективности производства горячекатаных полос за счет оптимизации производственной программы прокатки : автореф. дис. ... канд.

техн. наук : 05.16.05 / Ненахов Вячеслав Анатольевич. – Липецк, 2007. – 22 с.

4. Сердобинцев, Ю. П. Алгоритм рационального комплектования садки слэбов методической печи / Ю. П. Сердобинцев, М. П. Кухтик, А. М. Макаров // *Металлург.* – 2014. – № 2. – С. 72–75.

5. Дубров, А. М. Многомерные статистические методы : учеб. / А. М. Дубров, В. С. Мхитарян, Л. И. Трошин. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 352 с.

6. Информационно-технологическая среда [Электронный ресурс]. – [2016]. – URL : <http://voluntary.ru/dictionary/568/word/informaciono-tehnologicheskaja-sreda>

7. Программа рационального комплектования садки слэбов методической нагревательной печи [Электронный ресурс] / Сердобинцев Ю.П. [и др.] // *Современные проблемы науки и образования* : электрон. науч. журнал. – 2013. – № 2. – URL : <http://www.science-education.ru/108-9143>

УДК 621.9.015

А. Л. Плотников, Л. М. Гуревич, А. С. Сергеев, Ж. С. Тихонова

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Приведены физические закономерности формирования микрогеометрии поверхностного слоя деталей при лезвийной обработке сталей с позиций температурной прочности металла и дислокационно-энергетического представления о разрушении металлов при резании.

Ключевые слова: шероховатость, скорость резания, температурная прочность, дислокации, упрочнение.

The physical laws of formation of the surface layer microgeometry parts when handling steel blade from the position of the temperature and the strength of the metal dislocation-energy representation of the destruction of metal when cutting are presented.

Keywords: roughness, cutting speed, temperature resistance, dislocation hardening.

На ранних этапах становления теории резания при рассмотрении процессов формирования микрогеометрии поверхности ученые традиционно придерживались гипотезы формирования шероховатости поверхностного слоя, исходя из геометрических особенностей инструмента и кинематики движений формообразования [1].

Отсутствие в математических зависимостях такого параметра, например, как скорость резания V приводило к значительному расхождению с действительными результатами. Возможное объяснение этому является то, что на тот момент режущие свойства инструмента были ограничены, и обработка велась при малых скоростях резания, для которых были справедливы разработанные математические модели.

Дальнейшее же развитие инструментально-го производства привело к появлению твердых сплавов, способных работать на высоких ско-

ростях резания V (до 300 м/мин), а скорость резания, как известно, определяет интенсивность тепловых и контактно-деформационных процессов. В связи с этим появились новые зависимости, включающие в себя различные технологические факторы.

На рис. 1 представлен фрагмент детали (сталь 45), обработанной одним зубом фрезы диаметром $D_{\phi} = 100$ мм, на четырех скоростях резания, (V_1 , V_2 , V_3 и V_4), а также снимки четырех обработанных участков, выполненные на микроскопе Olympus BX61.

Технологические режимы обработки: глубина резания $t = 1$ мм, подача на зуб фрезы $S_z = 0,15$ мм/зуб.

Лезвийной обработке металла неизбежно сопутствует явление наростообразования. Нарост сильно влияет на качество поверхности, ухудшая как шероховатость, так и структуру об-

рабатываемого металла. Как отмечает А. И. Исаев в своей работе [1], скорость резания сильно влияет на наростообразование, прежде всего за счет изменения температур в зоне резания.

Многие ученые связывают явление наростообразования со значительным влиянием температур при определенных скоростях резания на прочностные свойства срезаемого материала. А. И. Исаев отмечает, что одной из причин образования установившегося нароста в указанном диапазоне скоростей является упрочнение конструкционных сталей в зоне температур около 250 °С. Существуют различные мнения о природе формирования микрогеометрии при резании металлов. Первостепенной задачей является обобщение существующих закономерностей и теоретическое обоснование механизма формирования микрогеометрии поверхности при механической обработке металла.

Резание сопровождается процессом пластической деформации металла с интенсивным тепловыделением. В работе [1] отмечается наличие у углеродистых сталей зоны синеломкости. Эта зона разграничивает механические свойства сталей при их нагреве. При повышении тем-

пературы до 250–300 °С углеродистые стали под механическим воздействием начинают упрочняться, а при температурах больше 250–300 °С наблюдается снижение их прочности. Таким образом, зародилось понятие температурной прочности металла. Взяв за основу данное явление, А. И. Исаев, в работе [1] высказал предположение, что с увеличением скорости резания происходит сначала упрочнение обрабатываемого материала (за счет наклепа), а при достижении определенных температур последующее разупрочнение. Существуют методы, например патент 2188747 РФ, МПК В23 В1 / 00, повышения обрабатываемости и улучшение качества поверхности при лезвийной обработке сталей с одновременным подогревом зоны резания. Н. В. Талантов отмечал, что температура является управляющим фактором, влияющим на плотность дислокаций и соответственно на сопротивление металла пластическому деформированию. С этой точки зрения механизм формирования микрогеометрии поверхности целесообразно рассматривать с позиций дислокационной теории в совокупности с теорией температурной прочности металлов.

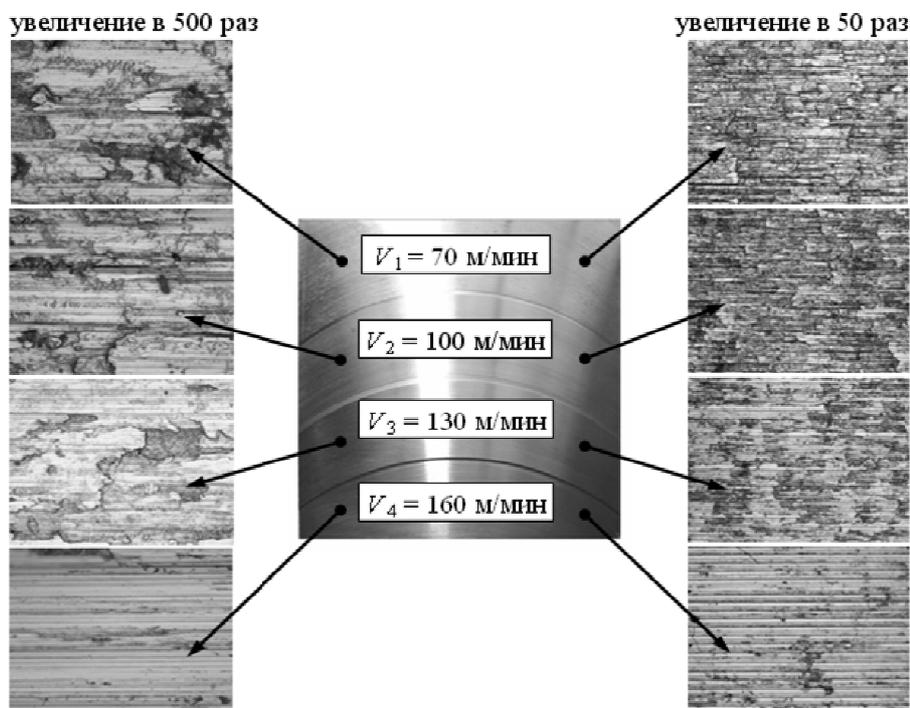


Рис. 1. Морфология поверхности обработанных участков на четырех скоростях резания

В работе [2] В. К. Старков, описывает механизмы формирования свойств поверхностного слоя с позиций дислокационной теории. В процессе лезвийной обработки в момент врезания

режущего клина в металл происходит сначала упругая, затем пластическая деформация металла на определенном участке, в то время как инструмент испытывает упругую деформацию.

При достижении температур разупрочнения и исчерпанием запаса пластичности, происходит разрушение металла по линии среза в направлении движения режущего клина.

В то же время, за счет впереди идущей деформационной волны, металл снова упрочняется (область опережающего упрочнения), также происходит и упрочнение металла под обработанной поверхностью за счет воздействия на эту область режущего клина. Таким образом, происходят постоянные явления упрочнения и разупрочнения элементарных слоев металла (рис. 2). Известно, что процесс пластического

течения начинается в местах нарушения (искажения) структуры решетки металла, и захватывает небольшое количество атомов. Такие искажения называются дислокациями. Плотность дислокаций определяет степень искаженности кристаллической решетки. Скорость пластического течения металла определяется скоростью распространения дислокаций, вектором Бюргера, а также плотностью подвижных дислокаций. Вектор Бюргера характеризует степень искажения кристаллической решетки вокруг дислокации, и соответственно смещение металла за проход одной дислокации.

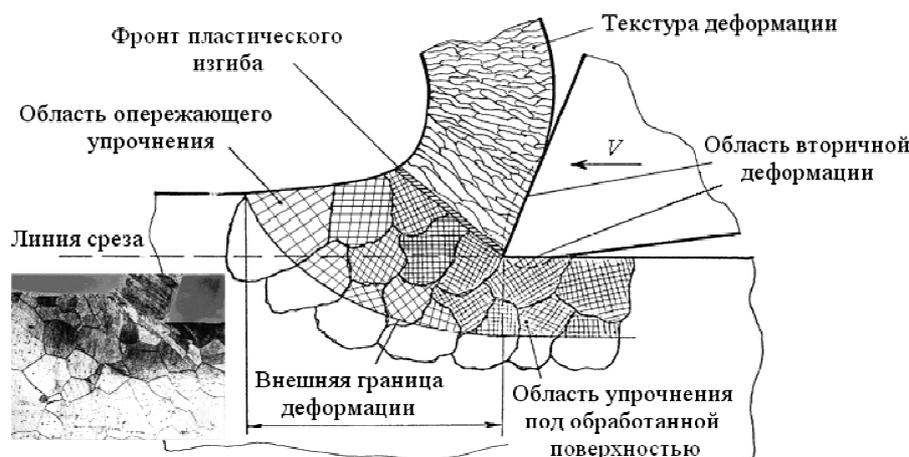


Рис. 2. Процесс отделения стружки от обрабатываемой заготовки режущим лезвием (В. К. Старков, материалы работы [2])

В процессе врезания режущего клина возникают сжимающие напряжения, начинается движение дислокаций, и в результате дислокационного взаимодействия происходит упрочнение металла, которое необходимо для поддержания постоянной скорости дислокации. Упрочнение металла во многом зависит от плотности дислокаций и возникает по причине формирования неподвижных (сидячих) дислокаций, закрепившихся на инородных включениях в структуре металла, препятствующих распространению других дислокаций. Процесс пластического разрушения металла происходит в зоне скопления дислокаций из-за наличия барьеров и снижения пластичности. Разрушение металла происходит, когда плотность дислокаций достигает критического значения. В процессе своего движения дислокация, преодолевая области минимума и максимума внутренних напряжений, совершает колебания, кинетическая энергия, которых распространяется вблизи плоскости скольжения. Увеличивается амплитуда и частота колебания атомов

кристаллической решетки. Энергия движения дислокаций переходит в тепло, при этом часть энергии затрачивается на зарождение новых дислокаций. В работе [2] отмечается, что энергия пластической деформации в основном определяется кинетической энергией движения дислокаций. Дальнейшее распространение дислокаций и сформировавшееся тепловое поле оказывает воздействие на приграничные структуры, предопределяя процессы разрушения металла следующим образом.

Из физики твердого тела [3] известно, что устойчивое состояние тела формируется за счет сочетаний сил притяжения и сил отталкивания атомов. Природа этих сил различна. В металлах преобладает так называемая металлическая связь. Эта связь образуется за счет взаимодействия положительных ионов с электронным газом (свободно перемещающиеся внутри решетки валентные электроны). Плотность свободных электронов увеличивается при уменьшении расстояния между ионами металла, за счет чего растут силы взаимодействия между ионами.

Как известно ионы твердых тел имеют сильное взаимодействие между собой и совершают тепловые колебания. Они образуют связанную цепочку, обладающую так называемыми нормальными колебаниями системы, определяющими теплоемкость твердого тела. Если температура твердого тела ниже температуры Дебая Θ_d , то эта энергия способствует появлению новых нормальных колебаний. В случае если температура выше температуры Дебая Θ_d происходит возрастание степени возбуждения и средней энергии, а также так называемой характеристической дебаевской частоты ω_d . Как отмечает Г. И. Елифанов, в работе [3], появление этой энергии способствует возникновению ангармонического колебания частиц, характеризующегося несимметричным характером распределения кинетической энергии между частицами. Такой энергией в полной мере может являться кинетическая энергия движения дислокаций, распространяющаяся на прилегающие структуры кристаллического строения. В результате чего новые положения частиц под воздействием потенциальной энергии (сформированной из кинетической энергии за счет преодоления сил отталкивания) уже не совпадают с первоначальными положениями в момент их равновесия (нормального колебания). Увеличение расстояния между ионами способствует снижению плотности электронного газа и, как следствие, обменных сил (сил взаимодействия между частицами). На рис. 3, по данным справочного источника [4], представлены зависимости предела прочности σ_B на разрыв, и теплоемкости λ стали 45 при воздействии на кованый (и нормализованный) образец (диаметром 6 мм и длиной 30 мм) растягивающих напряжений при различных температурах T .

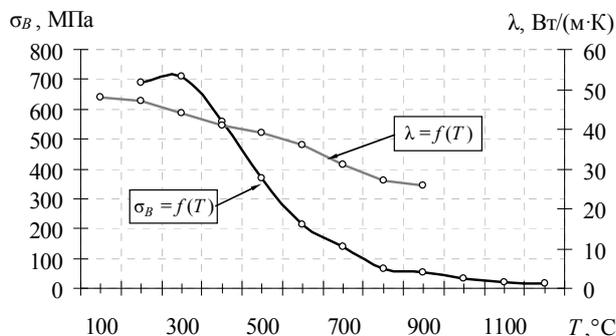


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления на разрыв σ_B стали 45 от температуры нагрева T (по данным работы [4])

Этот факт подтверждает описанное ранее явление температурной прочности металла, ко-

гда прочность металла снижается при достижении определенных температур. Далее вновь вступает в силу механизм диффузионной пластичности и распространения дислокаций. При этом происходит последовательное перемещение атомов в кристаллической решетке в направлении нагрузки. Интенсивность диффузионного пластичного разрушения определяют дефекты кристаллической решетки.

Подача инструмента оказывает существенное влияние на параметр шероховатости, однако, такое влияние объясняется геометрическими причинами движения формообразования детали.

Наряду с такими технологическими факторами, как подача инструмента S , глубина резания t , а также другими факторами, вызывающими повышение температур в зоне резания, именно скорость резания V оказывает наибольшее влияние на температурную составляющую и на формирование микрогеометрии поверхности. Такое влияние, вероятно, объясняется тем, что скорость резания V влияет на интенсивность распространения дислокаций в кристаллической структуре металла. Чем выше скорость распространения дислокаций, тем больше кинетической энергии получают колеблющиеся ионы решетки и тем меньше становятся силы межатомного взаимодействия за счет снижения плотности свободных электронов между ними. Установлено, что интенсивность теплообмена инструмента и обрабатываемой заготовки зависит от их коэффициентов теплопроводности $\lambda_{и}$ и $\lambda_{д}$, соотношение которых определяет коэффициент теплоусвоения контактной пары «инструмент – заготовка» [6,7].

При смене марки твердосплавного инструмента изменяется его теплопроводность. Количество тепла, усвоенного объемом срезаемого металла, определяет долю хрупкого и вязкого разрушения в механизме стружкообразования и оказывает влияние на механизм образования микронеровностей и количественное значение параметра шероховатости через температурную прочность металла. Чем ниже коэффициент теплопроводности инструментального материала, тем ниже интенсивность теплообмена, при этом большая концентрация тепловых потоков с интенсивным тепловыделением способствует возрастанию температуры в зоне резания. Повышение температуры приводит к снижению параметров шероховатости поверхности, согласно представлениям дислокационно-энергетической теории и температурной прочности металла,

описанных ранее. Таким образом, общие закономерности формирования структуры поверхностного слоя и процессов деформации металла при резании могут быть использованы для решения задач управления качеством лезвийной обработки [8, 9, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Исаев, А. И.* Микрогеометрия поверхности при токарной обработке : учебник / А. И. Исаев. – М.–Л. : Издательство академии наук СССР, 1950. – 108 с.
2. *Старков, В. К.* Физика и оптимизация резания материалов : учебник / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
3. *Епифанов, Г. И.* Физика твердого тела : учеб. пособие / Г. И. Епифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1977. – 288 с.
4. Сталь и сплавы. Марочник : справочник / В. Г. Сорокин [и др.] ; под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. – М. : Интермет инжиниринг, 2001. – 608 с.
5. *Сулима, А. М.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин : учеб. / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
6. Проблемы управления качеством обработки и моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при точении / Н. Г. Зайцева, А. Р. Ингеманссон, Д. В. Крайнев, А. С. Сергеев // Известия ВолгГТУ : меж-

вуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 15–18.

7. Особый вид контактного взаимодействия при токарной обработке коррозионностойких сталей, его влияние на силы резания и качество обработанной поверхности / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Н. Г. Зайцева, А. А. Жданов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (156) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 33–40.

8. *Сергеев, А. С.* Управление качеством металлообработки деталей торцовыми фрезами на автоматизированном станочном оборудовании / А. С. Сергеев, А. Л. Плотников, Н. Г. Зайцева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 54–56.

9. *Зайцева, Н. Г.* Расчет параметра шероховатости поверхности при лезвийной обработке углеродистых сталей на станках с ЧПУ / Н. Г. Зайцева, А. С. Сергеев, А. Л. Плотников // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7 (110) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 9). – С. 86–89.

10. Способ автоматизированного расчета скорости резания при токарной обработке коррозионностойкой стали быстрорежущим инструментом на станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, С. Н. Вальковский, Н. Г. Зайцева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7 (110) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 99–101.

УДК 62-522.7

Е. В. Стегачев, М. Г. Кристаль, Ж. С. Тихонова

ЗАХВАТНОЕ УСТРОЙСТВО ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ПРЕДМЕТОВ ПРОИЗВОДСТВА СТРУЯМИ ВОЗДУХА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

В работе описан принцип действия пневматического захватного устройства, осуществляющего автоматическое предварительное центрирование и поворот деталей произвольной формы относительно захватного устройства с последующим захватом. Осуществлен процесс моделирования предварительного центрирования и поворота предмета производства относительно оси захватного устройства.

Ключевые слова: пневматическое захватное устройство, базирование по углу поворота, компьютерное моделирование.

In work the principle of operation of the pneumatic capturing device which is carrying out automatic tentative centering and turn of details of any form of rather gripping device with the subsequent capture is described. The process of modeling of tentative centering and turn of a subject of production concerning an axis of the capturing device is carried out.

Keywords: pneumatic gripping device, basing on the angle of rotation, computer modeling.

Технологический процесс сборки трудоемких, поэтому автоматизация сборочных операций является востребованным направлением современного машиностроения.

Зачастую, при сборке уплотнительных узлов нужно манипулировать предметами произ-

водства (ПП), выполненными из эластичных, немагнитных материалов (резина, паронит, картон, кожа и т. д.), при этом их захватывание возможно по малым торцевым поверхностям, с обязательным предварительным центрированием и поворотом. Применение механических

и магнитных захватных устройств (ЗУ) нецелесообразно из-за свойств материала ПП, поэтому наиболее эффективно использовать пневматические захватные устройства (ПЗУ) [1, 2, 3].

На кафедре «Автоматизация производственных процессов» Волгоградского государственного технического университета разработаны конструкции ПЗУ [4, 5, 6, 7, 8], обеспечивающих гарантированное ориентирование ПП перед захватыванием, под воздействием струй сжатого воздуха.

В конструкции [6] (рис. 1) при подаче давления $P_{\text{п}}$ питания, воздух, через центрирующее отверстие (ЦО), с высокой скоростью вылетает наружу ПЗУ, где встретив преграду в виде стола, поворачивается на 90 градусов и движется в радиальном направлении, взаимодействует с внутренней поверхностью, смещенного в радиальном направлении захватываемого кольцевого ПП, что приводит к созданию результирующей силы, направленной в сторону совмещения осей ПП и ПЗУ, под действием этой силы ПП движется до совмещения этих осей. Для фиксации положения ПП по углу поворота в конструкции предусмотрены сопла ориентирования (СО) с питанием давлением $P_{\text{с}}$, для последующего захвата ПП вакуумные каналы (ВК), коммутируемые с источником разрежения $P_{\text{вак}}$.

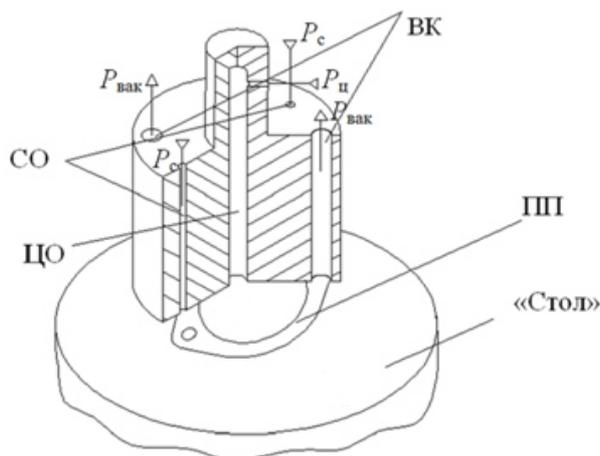


Рис. 1. Конструкция пневматического захватного устройства с предварительным центрированием ПП

Данная конструкция не позволяет центрировать и базировать по углу поворота ПП от-

личные от кольцевой (тороидальной) формы, представленные на рис. 2, что снижает его технологические возможности.

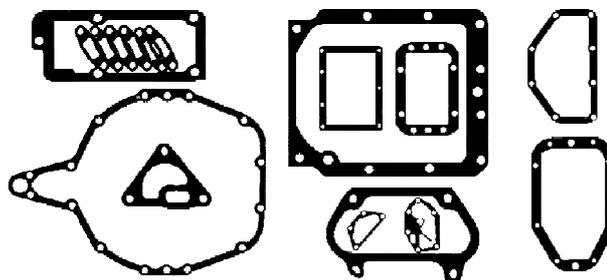


Рис. 2. Предметы производства произвольной формы

Для предварительного центрирования, поворота и последующего захватывания ПП произвольной формы, нами предлагается в нижней части захватного устройства [6] установить насадку с несколькими центрирующими соплами C_1 и C_2 (рис. 3), обеспечивающими одновременное воздействие на деталь разнонаправленных струй сжатого воздуха.

На рис. 3, а представлен начальный момент времени процесса предварительного ориентирования ПП, где YOX – система координат ПЗУ; $Y'O'X'$ – система координат ПП; C_1, C_2 – центрирующие сопла; Δ – смещение между системами координат (осями ПП и ПЗУ); α – угол рассогласования между принятыми системами координат; R – результирующая сила; M_{Σ} – результирующий момент.

При подаче давления питания в камеру с центрирующими соплами C_1 и C_2 , формируются воздушные струи, растекающиеся по опорной поверхности, воздействующие на внутреннюю поверхность захватываемой детали. Поскольку при смещении геометрического центра захватываемой детали и оси захватного устройства на величину Δ , силовое воздействие струй сжатого воздуха на внутреннюю поверхность захватываемой детали неравномерно, то возникает результирующая сила R , (рис. 3, а) направленная в сторону ликвидации смещения Δ между осями ПП и ПЗУ, и крутящий момент M_{Σ} , стремящийся повернуть ПП в нужное для последующего захватывания положение, с уменьшением угла рассогласования α .

$$\begin{aligned}
 M_{\Sigma} &= M_{C_1} + M_{C_2}; & \bar{R} &= \bar{F}_x + \bar{F}_y; \\
 M_{C_1} &= F_{C_1}^{y(+)} \cdot \Delta x_1 + F_{C_1}^{x(+)} \cdot \Delta y_1 - F_{C_1}^{y(-)} \cdot \Delta x_1 - F_{C_1}^{x(-)} \cdot \Delta y_1; \\
 M_{C_2} &= F_{C_2}^{y(+)} \cdot \Delta x_2 + F_{C_2}^{x(+)} \cdot \Delta y_2 - F_{C_2}^{y(-)} \cdot \Delta x_2 - F_{C_2}^{x(-)} \cdot \Delta y_2; \\
 \bar{F}_x &= \bar{F}_{C_1}^{x(+)} + \bar{F}_{C_1}^{x(-)} + \bar{F}_{C_2}^{x(+)} + \bar{F}_{C_2}^{x(-)}; \\
 \bar{F}_y &= \bar{F}_{C_1}^{y(+)} + \bar{F}_{C_1}^{y(-)} + \bar{F}_{C_2}^{y(+)} + \bar{F}_{C_2}^{y(-)},
 \end{aligned}$$

где M_{C_1}, M_{C_2} – соответственно крутящие моменты, возникающие от действия струй сопел C_1, C_2 ; \bar{F}_x, \bar{F}_y – соответственно векторы сил, возникающие от действия струй в проекциях на оси X', Y' ; $\Delta_{x_1}, \Delta_{x_2}, \Delta_{y_1}, \Delta_{y_2}$ – соответственно расстояния между осями X', Y' и силами $\bar{F}_{C_1}^x, \bar{F}_{C_2}^x, \bar{F}_{C_1}^y, \bar{F}_{C_2}^y$.

При уменьшении смещения Δ и угла α рас- согласования силовое воздействие струй сжа- того воздуха на внутреннюю поверхность ПП становится симметричным относительно осей ПП, крутящий момент и результирующая сила R становятся равными нулю (рис. 3, б). Систе- мы координат стремятся к совмещению, деталь занимает требуемое положение и готова к за- хватыванию по вакуумным каналам ВК.

$$\begin{aligned}
 M &= M_{C_1} - M_{C_2} = 0; & M_{C_1} &= M_{C_2}; \\
 \bar{R} &= \bar{F}_x - \bar{F}_y = 0; & \Delta_{x_1} &= \Delta_{x_2} = \frac{L}{2}; & \Delta_{y_1} &= \Delta_{y_2} = 0.
 \end{aligned}$$

Физическая экспериментальная установка подтверждает возможность предварительного центрирования и поворота ПП под воздействи- ем нескольких струй воздуха. Для исследова- ния работы предложенного ПЗУ, а также опре- деления его оптимальных режимов, создана

твердотельная модель (рис. 4) в геометрической САПР SolidWorks, в которую интегрирован программный пакет Flow Simulation. Осущест- влен процесс моделирования предварительного центрирования и поворота ПП относительно оси ЗУ (рис. 5).

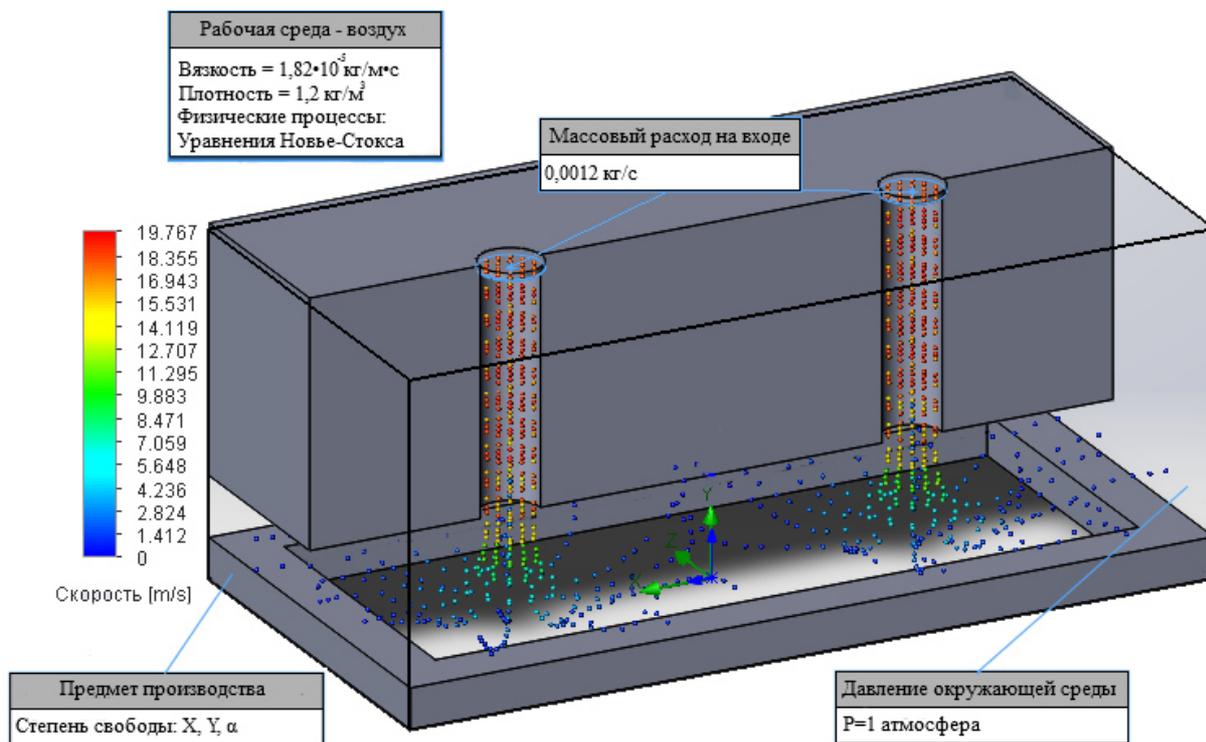
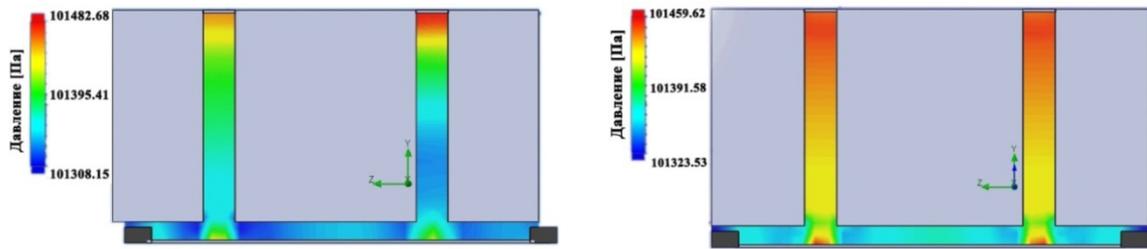
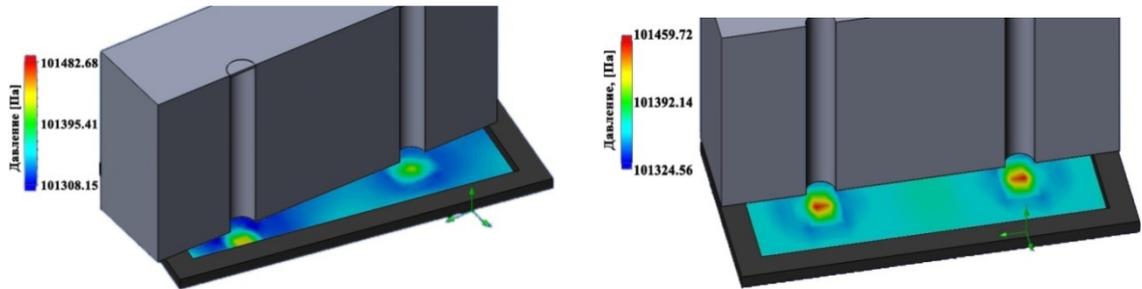


Рис. 4. Постановка задачи в Flow simulation



Распределение давления в поперечном сечении



Распределение давления в продольном сечении

Рис. 5. Результат моделирования течения струй воздуха

В результате моделирования определяются давление и скорость потока сжатого воздуха в захватной области ПЗУ при любых положениях ПП, что позволяет определить динамические параметры процесса предварительного ориентирования ПП.

Учитывая, что сила определяется произведением давления на площадь, можно определить в системе координат X', O', Y' приведенные к центру масс ПП силы:

$$F_x = h \cdot \left(\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} P_1(x) dx + \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} H_1(x) dx - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} P_2(x) dx - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} H_2(x) dx \right);$$

$$F_y = h \cdot \left(\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} P_1(y) dy + \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} H_1(y) dy - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} P_2(y) dy - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} H_2(y) dy \right);$$

$$H(x) = \rho \cdot \frac{V^2(x)}{2}; \quad H(y) = \rho \cdot \frac{V^2(y)}{2},$$

где $H(x), H(y)$ – соответственно, скоростные напоры; $P_1(x), P_2(x), H_1(x), H_2(x), P_1(y), P_2(y), H_1(y), H_2(y)$ – соответственно, распределения давления и напоров потока по сторонам ПП; h – высота ПП, dx, dy – приращение длины вдоль соответствующих сторон ПП; $V(x), V(y)$ – соответственно, скорости потока вдоль осей X', Y' .

Под действием давлений $P(x), P(y)$ и напоров $H(x), H(y)$, неравномерно распределенных вдоль каждой из сторон ПП, появляются моменты:

$$M_p(x) = h \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} x \cdot P_{1,2}(x) dx - \int_0^{\frac{L}{2}} x \cdot P_{1,2}(x) dx \right);$$

$$M_v(x) = h \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} x \cdot H_{1,2}(x) dx - \int_0^{\frac{L}{2}} x \cdot H_{1,2}(x) dx \right);$$

$$M_p(y) = h \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} y \cdot P_{1,2}(y) dy - \int_0^{\frac{L}{2}} y \cdot P_{1,2}(y) dy \right);$$

$$M_v(y) = h \cdot \left(\int_0^{\frac{L}{2}} y \cdot H_{1,2}(y) dy - \int_0^{\frac{L}{2}} y \cdot H_{1,2}(y) dy \right).$$

При изменении координат точки O' меняются распределения давлений и величины скоростного напора по внутренним поверхностям ПП, тогда результирующая сила и момент определяются, как:

$$\bar{F} = \bar{F}_x(x, y, \alpha) + \bar{F}_y(x, y, \alpha);$$

$$M = M_p(x, y, \alpha) + M_v(x, y, \alpha),$$

где $\bar{F}_x(x, y, \alpha), \bar{F}_y(x, y, \alpha), M_p(x, y, \alpha), M_v(x, y, \alpha)$ – соответственно, силы, действующие вдоль соответствующих осей X', Y' и моменты, функционально связанные с координатами x, y точки O' и углом рассогласования α .

Перемещение ПП под действием приложенных сил в направлении x, y с учетом угла рассогласования α описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} \cdot m + F_{\text{тр}} = F_x(x, y, \alpha);$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \cdot m + F_{\text{тр}} = F_y(x, y, \alpha);$$

$$J_{\text{и}} \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + M_{\text{тр}} = M(x, y, \alpha),$$

где $F_{\text{тр}} = mg \mu_{\text{т}} \text{sign}(V_{x,y})$ – сила трения, возникающая при соприкосновении ПП и опорной поверхности; $\text{sign}(V_{x,y})$ – коэффициент, учитывающий направление движения ПП; $J_{\text{и}}$ – момент инерции ПП относительно оси z ; $M_{\text{тр}}$ – момент трения; m – масса предмета производства; g – ускорение свободного падения; $\mu_{\text{т}}$ – коэффициент трения.

Таким образом, с использованием результатов моделирования в *Flow simulation* и предложенных зависимостей, определяются условия и динамические параметры процесса предварительного ориентирования ПП перед его захватыванием при различных геометрических и конструкторско-технологических параметрах ПП

и ЗУ, что позволяет разработать методику проектирования ЗУ для ПП различной формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стегачев, Е. В.* Повышение эффективности пневмовихревых захватных устройств промышленных роботов : дис. ... канд. техн. наук / Стегачев Евгений Вячеславович. – Волгоград, 2005. – 226 с.
2. *Кристалль, М. Г.* Повышение эффективности пневмовихревых захватных устройств промышленных роботов / М. Г. Кристалль, Е. В. Стегачев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2006. – № 1. – С. 11–14.
3. *Кристалль, М. Г.* Моделирование пневмовихревого захватного устройства с вращающейся вихревой камерой / М. Г. Кристалль, Е. В. Стегачев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – № 1. – С. 19.
4. Пат. 2199432 Российская Федерация, МПК⁷ В 25J 15/06 А, 66С 1/02 В. Пневматический схват / Кристалль М. Г., Стегачев Е. В., Филимонов В. В., Еремеев В. В., Шостенко С. В., Широкий А. В.; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2001106314/02; заявл. 05.03.01; опубл. 27.02.03, Бюл. № 18. – 3 с. : ил.
5. П. м. 104888 Российская Федерация, МПК⁷ В 25 J 15/06. Пневматическое захватное устройство / Стегачев Е. В., Кристалль М. Г., Татаринцев Д. Ю., Рыжов В. В., Рыбников А. С.; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет; заявл. 22.12.10; опубл. 27.05.11, – 2 с. : ил.
6. Патент России на полезную модель № 104888. Пневматическое захватное устройство / Стегачев Е. В., Кристалль М. Г., Татаринцев Д. Ю., Рыжов В. В., Рыбников А. С. – 22.12.2010
7. *Стегачев, Е. В.* Пневматические захватные устройства промышленных роботов для предметов с малой площадью захватывания / Е. В. Стегачев, М. Г. Кристалль, Г. В. Ольховик // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 5(154). – С. 167–173.
8. *Стегачев, Е. В.* Пневматическое захватное устройство с автоматическим ориентированием предметов производства / Е. В. Стегачев, М. Г. Кристалль, А. Н. Солопаев, Д. Ю. Татаринцев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – Т. 9. – С. 113–116.

УДК 658.512.2

В. С. Сорокин, А. А. Яковлев, С. Н. Мишустина

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ С ЖИДКИМ И ГАЗООБРАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: S.o.r.o.k.i.n@mail.ru

В статье описана методика синтеза технических решений на основе структуры проектируемого устройства, сформированная в рамках разработки метода проектирования систем охлаждения с жидким и газообразным рабочим телом. Данная методика представляет собой алгоритм, который содержит девять процедур и два условия, определяющие их выполнение. Для каждой процедуры, представляющей собой последовательность ряда шагов, определены структуры входных и выходных данных.

Ключевые слова: система охлаждения, синтез технических решений, модель физического принципа действия, ориентированный граф, метод проектирования.

The article describes the synthesis of engineering solutions technique which is based on the structure of device within the development of cooling devices with liquid and gaseous working body searching design method. This technique presents the algorithm which contains nine procedures and two conditions. Conditions determine the implementation of procedures. Each procedure presents the number of steps sequence. The structures of input and output data for every procedure have been determined

Keywords: cooling device, synthesis of engineering solutions, physical working principle graph model, directed graph, method of searching design.

Устройства охлаждения с жидким и газообразным рабочим телом получили широкое распространение в различных областях техники. В настоящее время возрастают требования к срокам их разработки, поэтому повышение производительности труда конструкторов на начальных стадиях проектирования является актуальной задачей. Одним из путей ее решения является разработка новых методик проектирования, которые закладываются в основу САПР, осуществляющих поддержку принятия решений на начальных этапах проектирования, когда принимается решение о физическом принципе действия, структуре и конструктивном исполнении будущего изделия.

В основе разрабатываемого метода проектирования систем охлаждения с жидким и газообразным рабочим телом лежит новая модель физического принципа действия (ФПД), позволяющая определить структуру проектируемого устройства, физические процессы, необходимые для его функционирования, и состав конструктивных элементов [1, 2]. Данная модель представляет собой ориентированный граф, позволяющий учитывать перемещения и взаимодействия рабочего тела (хладагента) в пространстве и во времени [3, 4]. В рамках метода предусмотрена методика построения данной модели ФПД на основе вербального описания конструкции и работы проектируемой системы охлаждения.

Однако само по себе наличие модели ФПД и алгоритма ее формирования в рамках метода проектирования еще не говорит о его совершенстве и не гарантирует максимально эффективный результат. Разработка конструкции проектируемого устройства и подбор необходимых элементов – не самые легкие задачи для проектировщиков. Однако именно они, как правило, решаются интуитивно, по наитию и без использования специальных программных средств, что не позволяет в полной мере использовать имеющуюся техническую информацию. А это не способствует повышению производительности труда современных конструкторов, и, следовательно, препятствует техническому прогрессу. Исходя из этого, возникает необходимость формирования методики синтеза технических решений, которая может

быть заложена в основу САПР поддержки принятия решения на начальных этапах проектирования систем охлаждения, что позволит максимально формализовать, алгоритмизировать и автоматизировать наиболее нетривиальные и трудоемкие процессы разработки данного класса устройств, и, следовательно, повысить эффективность труда конструкторов на начальных этапах их проектирования [5].

Разработка методики формирования множества возможных технических решений на основе модели ФПД опирается на список элементарных функции конструктивных элементов, которые сформулированы в рамках инженерно-физического метода [6, 7]. Каждая элементарная функция соответствует определенным элементам графа (вершинам или ребрам) [8, 9]. Причем некоторые функции не требуют конструктивной реализации, а только определяют требования, предъявляемые к рабочему телу или иным элементам проектируемой системы охлаждения [10].

По сути, данные элементарные функции являются своеобразным связующим звеном между моделью ФПД и конструкцией проектируемого устройства [11, 12]. Переход от модели ФПД к множеству возможных технических решений отражен в методике синтеза технических решений, которая представлена в виде алгоритма.

Выполнение алгоритма осуществляется так, как показано на рисунке. Он состоит из восьми процедур, вызов которых определяется двумя условиями. После выполнения двух процедур проверяется условие 1. При его выполнении (не найдено вариантов хладагента) алгоритм заканчивается. В противном случае выполняется тело цикла, которое состоит из последовательного вызова процедур 3–8. Продолжение цикла определяется условием 2.

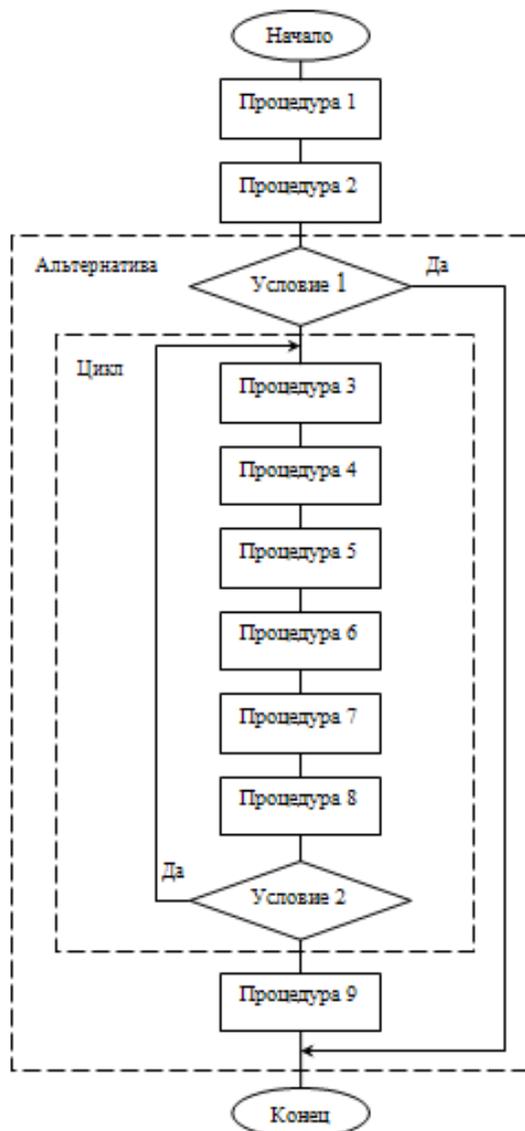
Процедура 1. Определение списка показателей качества

Входные данные: техническое задание на разработку СО.

Выходные данные: список показателей качества.

Шаг 1.1. *Определение показателей качества.*

Шаг 1.2. *Определение коэффициентов весомости.*



Последовательность выполнения процедур методики синтеза технических решений

Процедура 2. Выбор вещества хладагента. Выявление альтернативных вариантов для реализации хладагента в качестве рабочего тела

Входные данные: модель ФПД с вербальными описаниями его компонентов (вершин и дуг).

Выходные данные: 1) список альтернативных вариантов веществ для реализации хладагента; 2) целочисленная переменная *Result*. Исходное значение *Result* = 0.

Шаг 2.1. *Выбор вещества.* Формируется список $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, где s_i – альтернативный вариант хладагента.

Шаг 2.2. *Присваивание значения переменной Result.* $Result = |S|$, где $|S|$ – мощность множества S .

Проверка условия 1. Не найдено вариантов вещества хладагента?

Проверка условия. Если $Result = 0$, закончить выполнение алгоритма.

Процедура 3. Определение элементарных функций, связанных с вершинами и дугами графа ФПД.

Входные данные: 1) описание хладагента; 2) модель ФПД.

Выходные данные: список элементарных функций.

Шаг 3.1. *Определение функций для обеспечения требуемых взаимодействий (обеспечение внешних степеней свободы).*

Шаг 3.2. *Определение функций конструктивных элементов для обеспечения внутренних степеней свободы дуг графа ФПД.*

Шаг 3.3. *Определение функций конструктивных элементов для объединения и разделения потоков.*

Шаг 3.4. *Определение множества функций элементов управления.*

Процедура 4. Определение элементарных функций для изоляции внешних степеней свободы

Входные данные: 1) описание хладагента; 2) модель ФПД.

Выходные данные: список элементарных функций.

Шаг 4.1. *Определение функций для изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий (изоляция внешних степеней свободы).*

Шаг 4.2. *Определение функций конструктивных элементов для внешней изоляции от нежелательных взаимодействий потоков факторов экстенсивности и хладагента.*

Процедура 5. Определение источников информации

Входные данные: списки элементарных функций.

Выходные данные: список источников информации.

Шаг 5.1. *Определение состава конструктивных элементов на основе предварительного группирования элементарных функций.*

Шаг 5.2. *Определение источников информации.*

Процедура 6. Составление списка альтернативных конструктивных элементов.

Входные данные: 1) список источников информации; 2) список показателей качества.

Выходные данные: список альтернативных конструктивных элементов.

Шаг 6.1. *Поиск альтернативных конструктивных элементов.*

Шаг 6.2. Оценка конструктивных элементов.

Процедура 7. Составление матрицы технических решений

Входные данные: 1) списки элементарных функций; 2) список элементарных конструктивных элементов с оценками по показателям качества на которые они влияют.

Выходные данные: матрица технических решений.

Шаг 7.1. Составление матрицы технических решений. Формируется матрица D соответствия множеств конструктивных элементов и элементарных функций, причем $D_{ij} = 1$, если i -й элемент выполняет данную элементарную функцию, в противном случае $D_{ij} = 0$.

Процедура 8. Синтез вариантов технических решений

Входные данные: 1) матрица технических решений; 2) таблица M_4 .

Выходные данные: список технических решений.

Шаг 8.1. Синтез вариантов технических решений. Техническое решение CO представляет собой список конструктивных элементов K_n , сформированный таким образом, что входящие в него элементы выполняют все элементарные функции списка F . В списке K_n должны находиться только функционально совместимые элементы, т. е. выполняемые таким списком элементов элементарные функции не должны дублироваться.

Шаг 8.2. Декремент переменной $Result$. Уменьшить значение переменной $Result$ на единицу.

Проверка условия 2. Имеются альтернативные варианты хладагента?

Проверка условия. Если $Result \neq 0$, выполнить процедуры 3–8 для альтернативного хладагента.

Процедура 9. Выбор лучших технических решений.

Входные данные: 1) список технических решений; 2) список показателей качества; 3) список критериев выбора.

Выходные данные: список лучших технических решений.

Шаг 9.1. Выбор лучших технических решений.

Представленная методика позволяет на основе структуры проектируемого устройства, представленной в виде модели ФПД, осуществлять генерацию новых технических решений систем охлаждения из уже существующих в патентном фонде и научно-технической литературе конструктивных элементов с повышенной

производительностью (сотни и тысячи новых технических решений в месяц). Что позволяет существенно повысить производительность труда конструктора на начальных стадиях проектирования систем охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камаев, В. А. Моделирование физических принципов действия и формирование множеств технических решений преобразователей энергии / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Информационные технологии. – 2006. – № 1. – С. 2–8.
2. Шевчук, В. П. Метод синтеза концептуальных технических решений преобразователей энергии / В. П. Шевчук, А. А. Яковлев // Промышленная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 41–46.
3. Яковлев, А. А. Порядок разработки моделей физического принципа действия преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 1). – С. 117–120.
4. Яковлев, А. А. Синтез моделей физического принципа действия преобразователей энергии с газообразным рабочим телом / А. А. Яковлев // Информационные технологии. – 2006. – № 3. – С. 23–28.
5. Яковлев, А. А. Автоматизация поиска улучшенных технических решений преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 1). – С. 115–117.
6. Яковлев, А. А. Системный подход к разработке технических решений энергоустановок на начальных этапах проектирования / А. А. Яковлев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – (Серия «Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии»; вып. 2). – С. 120–123.
7. Яковлев, А. А. Формирование множеств концептуальных технических решений преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – (Серия «Автоматизация технологических процессов в машиностроении»; вып. 3). – С. 9–13.
8. Яковлев, А. А. Автоматизация разработки перспективных технических решений устройств с газообразным рабочим телом / А. А. Яковлев, Е. В. Яковлева, С. А. Кравченко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 6). – С. 101–103.
9. Яковлев, А. А. Разработка матрицы технических решений преобразователей энергии и алгоритм формирования списков функционально-совместимых конструктивных элементов / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал. – 2007. – № 10. – С. 34–39.
10. Яковлев, А. А. Автоматизация синтеза и выбора технических решений преобразователей энергии / А. А. Яковлев, Е. В. Яковлева // Информационные технологии. – 2010. – № 11. – С. 71–78.
11. Яковлев, А. А. Методика проектирования преобразователей энергии на этапе разработки физического принципа действия / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 12. – С. 21–25.
12. Energy Converters with Gaseous and Liquid Working Body Searching Design / Яковлев А. А., Чурсина С. В., Позднякова П. Е., Сорокин В. С. // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – С. 213–219.

УДК 621.922.079

А. В. Степанов, Н. И. Веткасов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОНаПРЯЖЕННОСТИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА С НАПОЛНИТЕЛЯМИ ИЗ НАНОМАТЕРИАЛОВ И ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ульяновский государственный технический университет

E-mail: kafedra_tm@ulstu.ru

Представлены результаты численного моделирования теплонапряженности плоского шлифования при применении твердых смазочных материалов с наполнителями из наноматериалов и высокодисперсных материалов.

Ключевые слова: твердый смазочный материал, средняя контактная температура, шлифование, моделирование, наноматериал, высокодисперсный материал.

Numerical simulations of thermal stress in the application of surface grinding of solid lubricants with fillers of nanomaterials and superfine materials.

Keywords: solid lubricants, the average contact temperature, grinding, modeling, nanomaterials, highly material.

Уровень теплонапряженности в зоне шлифования является одним из решающих факторов, влияющих на производительность обработки и качество обработанных поверхностей. В настоящее время для повышения эффективности процесса шлифования реализуют различные технологические решения, среди которых одним из распространенных является применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Среди известных СОТС наибольшее распространение при шлифовании получили смазочно-охлаждающие жидкости СОЖ [1]. Однако следует заметить, что использование СОЖ на шлифовальных операциях не всегда возможно. Например, при шлифовании радиоэлектронных компонентов в сборе (роторы электродвигателей, магнитные головки и др.) использование СОЖ может приводить к окислению контактов и выходу из строя готовых изделий. Поэтому там, где по техническим условиям невозможно применение СОЖ, для повышения технологической эффективности шлифования применяют твердые смазочные материалы (ТСМ), использование которых может приводить к существенному снижению средней контактной температуры в зоне шлифования [2–5].

Для моделирования влияния ТСМ на формирование температурного поля при плоском шлифовании периферией круга рассмотрим систему ШК – заготовка. При анализе теплового взаимодействия ШК и заготовки примем, что температурное поле двумерное ($T = f(z, x)$), учитывая, что высота круга существенно мень-

ше его диаметра, а температура в различных точках со временем изменяется незначительно [6, 8]. Принимая во внимание непостоянство условий распределения теплоты в обрабатываемой заготовке в течение цикла шлифования, считаем, что температурное поле нестационарное $\left(\frac{dT}{d\tau} \neq 0\right)$.

Математическая формулировка задачи теплопроводности применительно к нестационарному двумерному температурному полю заготовки в прямоугольной системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T(T) \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где T – текущее значение температуры в заготовке, К; a_T – коэффициент температуропроводности материала заготовки, $\text{м}^2/\text{с}$; x, z – координаты заготовки, м.

Разработка базовой математической модели, позволяющей проводить детальное исследование влияния ТСМ на теплонапряженность процесса шлифования, предполагает обоснование комплекса начальных и граничных условий, учитывающих условия контактного взаимодействия ШК и заготовки в присутствии ТСМ. При анализе температурного поля в обрабатываемой заготовке считаем ее однородной, выполненной из сплошного материала (сплошная среда) с известными теплофизическими свойствами и их зависимостями от температуры. Для корректного решения рассматриваемой тепловой задачи учтем начальные ус-

ловия, определяющие распределение температуры в любой точке круга, заготовки и ТСМ в некоторый начальный момент времени $t_0 = 0$, принятый за начало отсчета. Чаще всего температуру контактирующих тел принимают равной температуре окружающей среды 293 °К.

Из бесчисленного множества возможных явлений, описываемых уравнением (1), граничными условиями выделим описание теплообмена между поверхностями круга, заготовки и ТСМ, а также с окружающим воздухом и элементами технологической оснастки.

В пределах зоны контакта круга и заготовки

$$T_k = T_3 = T_{кр.}$$

$$\frac{P_z(V + V_{ст})}{S} = \lambda_k \left(\frac{dT_k}{dr} \right) + \lambda_3 \left(\frac{dT_3}{dx} \right) + Q_{ТСМ} + Q_{стр}, \quad (2)$$

где P_z – касательная составляющая силы шлифования, Н; $V_{кр}$ – окружная скорость круга, м/с; S – фактическая площадь контакта ШК с заготовкой, м²; R_k – радиус наружной окружности ШК, м; $V_{ст}$ – скорость стола, м/мин; $T_{кр}$ – температура ШК, °К; T_3 – температура заготовки, °К; $Q_{ТСМ}$ – поверхностная плотность теплового потока, поступающего в ТСМ, Вт/м²; $Q_{стр}$ – поверхностная плотность теплового потока, поступающего в стружку, Вт/м².

Поверхностную плотность теплового потока, поступающую в стружку, определим по выражению:

$$Q_{стр} = c_3 \cdot m_{стр} \cdot (T_k - T_{зн}) / S \cdot \tau, \quad (3)$$

где c_3 – теплоемкость материала обрабатываемой заготовки Дж/(кг · °К); $T_{зн}$ – начальная температура заготовки, принимаем $T_{зн} = 293$ К; T_k – средняя контактная температура в зоне обработки, К; τ – время действия теплового источника на длине дуги контакта L_k ; $m_{стр}$ – масса стружки при шлифовании элементарного участка поверхности заготовки длиной L_k , кг.

$m_{стр}$ вычислим по формуле:

$$m_{стр} = \rho_3 \cdot L_k \cdot S_{вр} \cdot H_k, \quad (4)$$

где ρ_3 – плотность материала обрабатываемой заготовки кг/м³; $S_{вр}$ – врезная подача, мм/ход.

Поверхностная плотность теплового потока, поступающую в ТСМ,

$$Q_{ТСМ} = Q_{св} + Q_{нап}, \quad (5)$$

где $Q_{св}$ – поверхностная плотность теплового потока, затрачиваемого на плавление связующего, Вт/м²; $Q_{нап}$ – поверхностная плотность

теплового потока, затрачиваемого на нагрев наполнителя, Дж.

$$Q_{св} = (c_{св} \cdot m_{св} \cdot (T_{плав} - T_{нач}) + m_{св} q_c) / S \cdot \tau, \quad (6)$$

где $c_{св}$ – теплоемкость связующего, Дж/(кг · °К); $T_{нач}$ – начальная температура ТСМ, принимаем $T_{нач} = 293$ К; $T_{плав}$ – температура плавления связующего, К; $m_{св}$ – масса ТСМ, расплавившегося при шлифовании элементарного участка длиной L_k , кг; q_c – удельная теплота плавления, Дж/кг.

$m_{св}$ найдем по выражению [7]:

$$m_{св} = \frac{\rho_{св} \cdot L_k \cdot S_{вр} \cdot 2 \cdot c_c \cdot (T_{пл} - T_{ос}) \cdot \sqrt{\frac{a_c \cdot L_k}{\pi \cdot V_k}}}{q_c + c_c \cdot (T_{пл} - T_{ос})}, \quad (7)$$

где a_c – коэффициент температуропроводности, м²/с; $T_{ос}$ – температура окружающей среды, принимаем $T_{ос} = 293$ К.

Поверхностная плотность теплового потока, поступающего в заготовку,

$$Q_3 = \psi \cdot Q_{\Sigma}, \quad (8)$$

где ψ – коэффициент, показывающий, какая доля теплоты, выделившейся в контактной зоне, поступает в заготовку [6].

Граничное условие на наружной поверхности ШК, контактирующей с окружающим воздухом, представим в виде:

$$-\lambda_k \left(\frac{dT_k}{dr} \right) = \alpha_{вк} (T_{кр} - T_{в}), \quad (9)$$

где $\alpha_{вк}$ – коэффициент теплопередачи от поверхности ШК окружающему воздуху, Вт/(м² · К).

Граничное условие на поверхности заготовки, контактирующей с окружающим воздухом, имеет следующий вид [6]:

$$-\lambda_3 \left(\frac{dT_3}{dx} \right) = \alpha_{рас} (T_3 - T_{в}): x = h, \quad (10)$$

где $\alpha_{рас}$ – коэффициент теплопередачи воздуха при его контакте с нагретой поверхностью заготовки, Вт/(м² · К).

На поверхности заготовки, контактирующей с поверхностью магнитной плиты, температуру поверхности контакта принимаем равной температуре станка, которую считаем приблизительно равной температуре окружающей среды 293 °К.

Таким образом, разработана базовая теплофизическая модель плоского шлифования периферией круга, в которой отражена связь теплового состояния контактирующих тел (круга и заготовки) с материалом заготовки, характеристикой круга и составом ТСМ. Учтено влияние фазового перехода ТСМ на теплонапряженность в зоне контакта.

Однако в силу того, что априорно невозможно определить составляющие теплового баланса (2) в зоне контакта и учесть изменение теплофизических свойств круга, заготовки и ТСМ от температуры, аналитическая оценка теплового состояния круга, заготовки и ТСМ затруднена. Поэтому для решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) с учетом условий однозначности разработана методика численного моделирования, базирующаяся на методе конечных элементов, обладающим значительными возможностями.

Численное моделирование выполнили на базе решателя ANSYS, реализующего метод конечных элементов и обеспечивающего высокую точность полученных результатов расчета. При численном моделировании температурного поля в заготовке, шлифуемой с применением ТСМ, на базе решателя ANSYS воспользовались начальными и граничными условиями, сформулированными при разработке приведенной выше теплофизической модели. Для определения влияния ТСМ на среднюю контактную температуру смоделировали заготовку из быстрорежущей стали Р6М5 (рис. 1), на которую в дальнейшем наложили граничные и начальные условия.

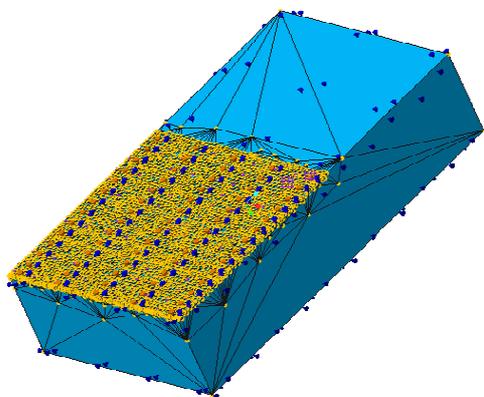


Рис. 1. Заготовка из быстрорежущей стали Р6М5 с сеткой конечных элементов

Для оценки влияния материала наполнителя на теплонапряженность плоского шлифования периферией круга был выполнен расчет в программном пакете Creo 2.0 с решателем ANSYS с последующим сравнением результатов численного расчета с результатами натурального эксперимента при применении восьми составов ТСМ с наполнителями из нанопорошков меди

и алюминия и высокодисперсных порошков голубой глины и диатомита (таблица) при варьировании скоростью стола $V_{СТ}$ и врезной подачей $S_{ВР}$. В качестве базы для сравнения были взяты состав на основе дисульфида молибдена (состав М1, таблица) и ТСМ производства НПО «Алтай» (состав А).

Натурные эксперименты были выполнены на экспериментальном стенде на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2, оснащенного автоматизированным рабочим местом для измерения составляющих силы шлифования и средней контактной температуры с помощью полусинтетической термопары. В качестве примера на рис. 2, а и 2, б приведены результаты численного моделирования теплонапряженности плоского шлифования периферией круга заготовок из стали Р6М5 при применении составов Г2 и Г2М5 (таблица) соответственно.

Установлено, что введение в состав смазочного материала 0,5 % нанопорошка меди (состав Г2М5) по сравнению с составом Г2, не содержащим нанопорошка меди, существенным образом (на 13–15 %) снижает среднюю контактную температуру в зоне обработки. По результатам сравнения экспериментальных и расчетных значений средней контактной температуры (рис. 3) установлено, что расхождение не превышает 10–15 %, что свидетельствует о достаточно высокой степени адекватности численной модели.

По результатам анализа полученных экспериментальных и расчетных значений средней контактной температуры установлено, что наполнитель ТСМ существенным образом влияет на среднюю контактную температуру. Особенно заметно влияние наноматериалов. Как видно из результатов численного моделирования и натурального эксперимента введение в ТСМ незначительного количества нанопорошка меди может существенным образом снизить среднюю контактную температуру. Однако для установления более общих закономерностей влияния наноматериалов и высокодисперсных материалов на функциональные действия ТСМ требуется проведение дополнительных исследований с использованием более широкого спектра наноматериалов и высокодисперсных материалов.

Составы ТСМ

Обозначение состава	Компоненты, % масс.						
	Голубая глина	Парафин	Графит	Диатомит	Дисульфид молибдена	Нанопорошок меди	Нанопорошок алюминия
М1	–	60	10	–	30	–	–
Г2	40	60	0	–	–	–	–
Г5	25	60	15	–	–	–	–
Д1	–	60	0	40	–	–	–
Д4	–	60	15	25	–	–	–
Г2М5	40	59,5	0	–	–	0,5	–
Г2А5	40	59,5	0	–	–	–	0,5
Д1М5	–	59,5	0	40	–	0,5	–
Д1А5	–	59,5	0	40	–	–	0,5

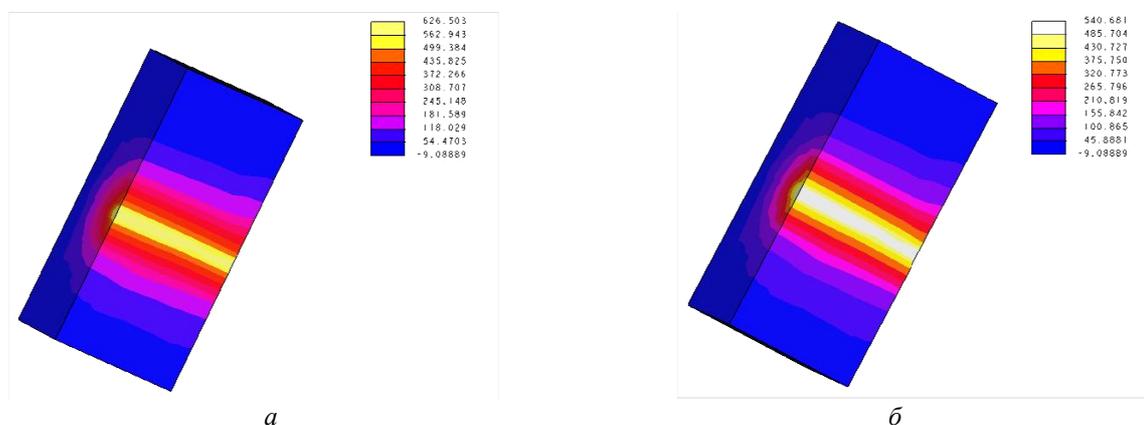


Рис. 2. Результаты численного моделирования температурного поля в заготовке, шлифованной кругом 25А F60 М 5 V А, в программном пакете Creo 2.0 с решателем ANSYS.

Режимы обработки: $V_{стр} = 15$ м/мин, $S_{вр} = 0,03$ мм/дв. ход. Состав ТСМ:

а – состав Г2. $T_{max} = 626,5$ °С = 899,5 °К; б – состав Г2М5. $T_{max} = 540,7$ °С = 813,7 °К

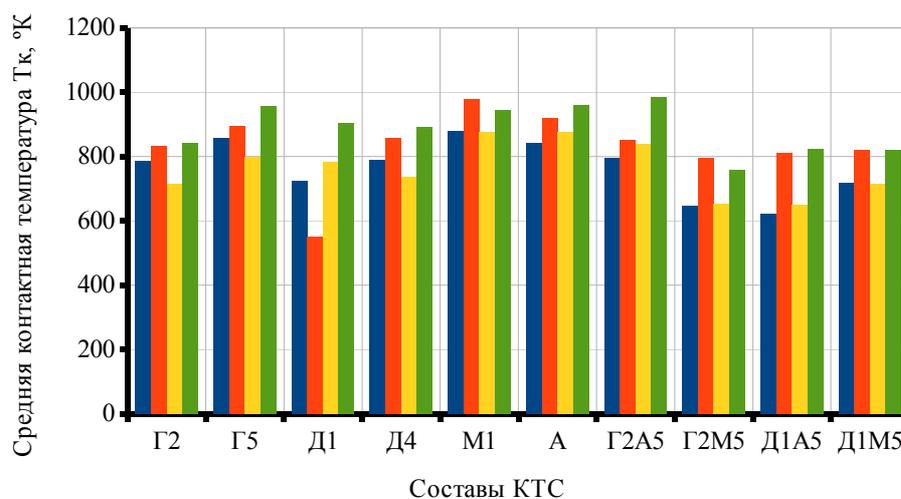


Рис. 3. Зависимость средней контактной температуры T_k от врезной подачи $S_{вр}$ и состава ТСМ: материал заготовки – сталь Р6М5; круг – 1 300' 40' 76' 25А F60 М 5 V А; $V_k = 35$ м/с, $V_{стр} = 5$ м/мин; Г2 - Д1М5 – составы ТСМ по таблице; ■ – $T_{кр}$, $S_{вр} = 0,01$ мм/дв. ход; ■ – $T_{кз}$, $S_{вр} = 0,01$ мм/дв. ход; ■ – $T_{кр}$, $S_{вр} = 0,03$ мм/дв. ход; ■ – $T_{кз}$, $S_{вр} = 0,03$ мм/дв. ход

Составы ТСМ

Обозначение состава	Компоненты, % масс.						
	Голубая глина	Парафин	Графит	Диатомит	Дисульфид молибдена	Нанопорошок меди	Нанопорошок алюминия
М1	–	60	10	–	30	–	–
Г2	40	60	0	–	–	–	–
Г5	25	60	15	–	–	–	–
Д1	–	60	0	40	–	–	–
Д4	–	60	15	25	–	–	–
Г2М5	40	59,5	0	–	–	0,5	–
Г2А5	40	59,5	0	–	–	–	0,5
Д1М5	–	59,5	0	40	–	0,5	–
Д1А5	–	59,5	0	40	–	–	0,5

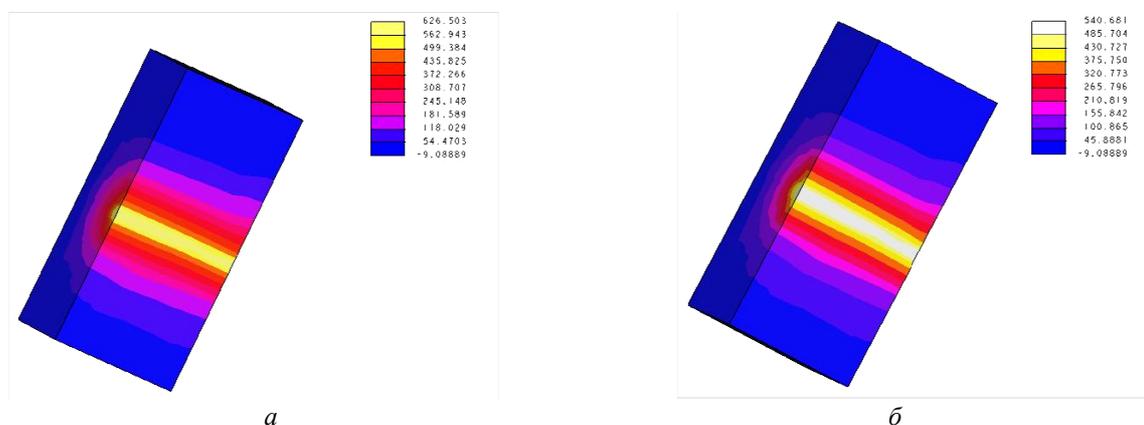


Рис. 2. Результаты численного моделирования температурного поля в заготовке, шлифованной кругом 25А F60 М 5 V А, в программном пакете Creo 2.0 с решателем ANSYS.

Режимы обработки: $V_{стр} = 15$ м/мин, $S_{вр} = 0,03$ мм/дв. ход. Состав ТСМ:

а – состав Г2. $T_{max} = 626,5$ °С = 899,5 °К; б – состав Г2М5. $T_{max} = 540,7$ °С = 813,7 °К

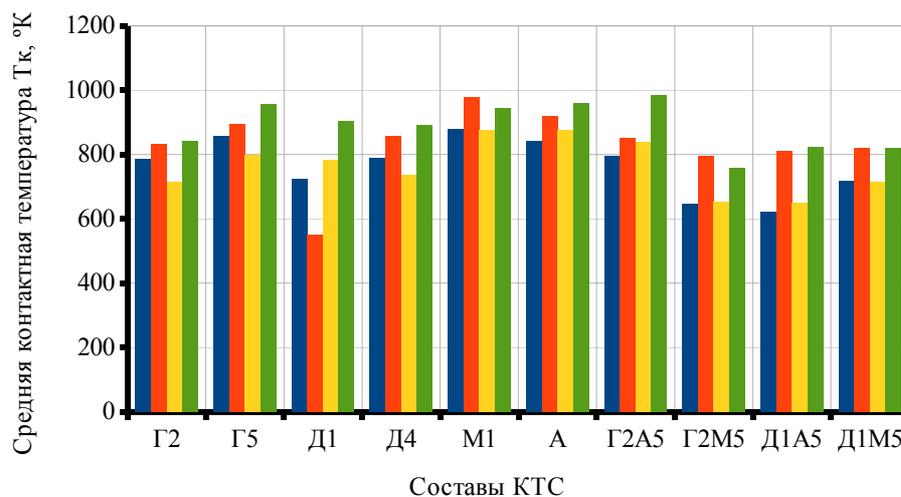


Рис. 3. Зависимость средней контактной температуры T_k от врезной подачи $S_{вр}$ и состава ТСМ: материал заготовки – сталь Р6М5; круг – 1 300' 40' 76' 25А F60 М 5 V А; $V_k = 35$ м/с, $V_{стр} = 5$ м/мин; Г2 - Д1М5 – составы ТСМ по таблице; ■ – $T_{кр}$, $S_{вр} = 0,01$ мм/дв. ход; ■ – $T_{кз}$, $S_{вр} = 0,01$ мм/дв. ход; ■ – $T_{кр}$, $S_{вр} = 0,03$ мм/дв. ход; ■ – $T_{кз}$, $S_{вр} = 0,03$ мм/дв. ход

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием : справочник / Л. В. Худобин [и др.] / под общ. ред. Л. В. Худобина. – М. : Машиностроение, 2006. – 544 с.; ил.
2. Пат. 96117774 РФ, МПК 6 А, С10М141/04. Твердая смазка для абразивной обработки металлов / М. А. Булатов, В. И. Кононенко, В. Г. Лундина (РФ) [и др.]. – № 96117774/04; заявл. 04.09.1996; опубл. 20.11.1998.
3. Пат. 96120057 РФ, МПК 6 А1, С10М125/04, С10М169/04. Твердая смазка для абразивной обработки сталей и твердых сплавов (ее варианты) и антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов / Стариков С. В., Прушак В. Я., Богданович П. Н. (РФ). – № 96120057/04; заявл. 03.10.1996; опубл. 27.06.1997.
4. Пат. 2114903 РФ, МПК6 С1, С10М141/04. Твердая смазка для абразивной обработки металлов / Булатов М. А., Кононенко В. И., Лундина В. Г. (РФ) [и др.]. – № 96117774/04; заявл. 04.09.1996; опубл. 10.07.1998.
5. Пат. 2005134068 РФ, МПК 6 А, С10М141/00. Твердая смазка для абразивной обработки материалов / Кононенко В. И. (RU), Алехина В. Д. (RU), Байдалин Ю. А. (RU) [и др.]. – № 2005134068/04; заявл. 03.11.2005; опубл. 10.05.2007.
6. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.
7. Худобин, Л. В. Шлифование композиционными кругами / Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 256 с.
8. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.

Редактор
Н. Н. Кваша

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИИ № 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 2016 г. Поз. № 7ж. Подписано в печать 03.06.2016 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 10,99.
Тираж 150 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.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научном журнале «Известия Волгоградского государственного технического университета», серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований и представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области прогрессивных технологий в машиностроении.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной–двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.